

SS AVS-TH-4C53

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER- GRENOBLE 1
SCIENCES ET GEOGRAPHIE

N°

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER

Discipline : Sciences de la Terre et de l'Univers

Présentée et soutenue publiquement par :

CHOPART Jean Louis

le 25 octobre 1999

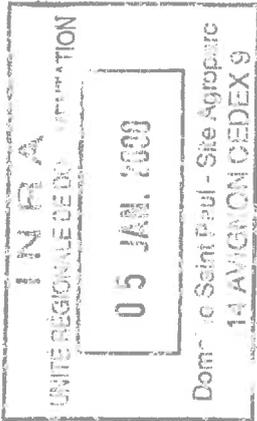
**Relations entre état physique du sol, systèmes racinaires
et fonctionnement hydrique du peuplement végétal :
outils d'analyse *in situ* et exemples d'études en milieu tropical
à risque climatique élevé.**

Directeur de thèse :
M. M. VAUCLIN

Composition du Jury :

M. L. CHARLET, Professeur UJF, LGIT, Grenoble	Président
M. L. ABBADIE, Directeur de recherche CNRS, Paris	Rapporteur
M. H. MANICHON, Professeur INA P-G, Paris	Rapporteur
M. F. MARAUX, Chef du programme Agronomie CIRAD AMIS, Montpellier	Examineur
M. F. TARDIEU, Directeur de recherche INRA, Montpellier	Examineur
M. M. VAUCLIN, Directeur de recherche CNRS, LTHE, Grenoble	Examineur

Thèse préparée au sein du
CIRAD (Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement)
en collaboration avec le
Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE, UMR 5564)



AVANT- PROPOS

Ce mémoire est une synthèse d'une partie de mes travaux conduits depuis 30 ans dans plusieurs pays d'Afrique. Il est à la fois le fruit d'une expérience de terrain dans ces pays et de contacts avec des scientifiques qui ont guidé, encouragé et nourri ma démarche.

Ce sont eux qui me viennent tout d'abord à l'esprit au moment où je commence cette page. En trente ans, ils ont été nombreux et je ne pourrai ici citer que les principaux, que les autres veuillent bien m'en excuser. Il serait également présomptueux de ma part d'afficher une quelconque hiérarchie parmi eux. Pour tourner cette difficulté, j'ai retenu un strict classement par ordre d'entrée en scène.

Il y a d'abord eu Robert Nicou, et René Tourte qui m'ont accueilli à la station de Bambey (Sénégal) en 1969. Ils ont d'emblée fait confiance au tout jeune que j'étais. Ils ont guidé mes premiers pas (puis bien d'autres par la suite, en particulier R. Nicou) dans le monde de l'agronomie tropicale. Dans le même temps, une autre personne, que je n'ai pourtant jamais eu l'honneur de rencontrer, a compté dans l'éveil de mon intérêt pour la physique du sol appliquée à l'agronomie. Il s'agit de Monsieur S. Hénin. La lecture attentive et passionnée de son livre "Le profil cultural " m'a encouragé dans mes premiers travaux sur l'enracinement au champ et aidé à surmonter la difficulté de ce type d'activité comparée à des études de laboratoire.

Ensuite, les travaux de Claude Maertens et un stage chez lui en 1976 m'ont conforté dans mes orientations et m'ont fait entrevoir tout le parti qu'on pouvait tirer d'une meilleure connaissance des racines en termes d'accès à l'eau et aux éléments minéraux de la culture et donc de compréhension du fonctionnement du peuplement végétal.

Peu après, en 1977, un enseignant de l'Agro Paris est venu en visite à Bambey ; celui-ci était jeune, mais sa notoriété était déjà parvenue jusqu'à ce petit coin de brousse sénégalaise. Il s'agit d'Hubert Manichon. Il m'a rapidement convaincu de l'intérêt à m'ouvrir à des études en milieu paysan et a su, en quelques mots, me montrer qu'on pouvait y avoir une approche "modes de gestion du sol" aussi scientifique qu'en station. A la suite de son passage j'ai initié des premières enquêtes sur le travail du sol en milieu réel. Malheureusement, suite à un rapide changement d'affectation (départ en Côte d'Ivoire), ces tests conduits sur ses conseils n'ont pu se traduire en terme d'article scientifique et ne pourront donc être cités dans ce travail sur publications. Toutefois ces travaux et les discussions que j'ai eues alors avec H. Manichon ont constitué une étape marquante dans mon parcours. A Hubert Manichon, je voudrais associer ici Francois Tardieu, même s'il est en fait apparu un peu plus tard. Grâce à leurs recherches en commun dans les années 80, ils ont contribué de façon déterminante au renouvellement de ma réflexion sur les racines. On est bientôt en l'an 2000, ils ont changé de sujet ou d'échelle de travail, mais leurs avancées d'alors sur les relations entre structure du sol, racines et alimentation hydrique n'ont pas pris de rides et restent ma référence.

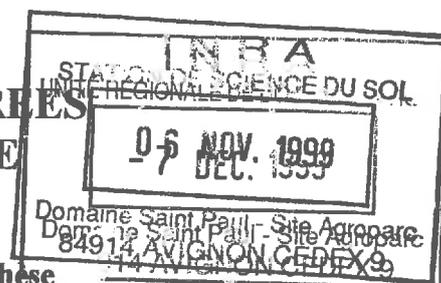
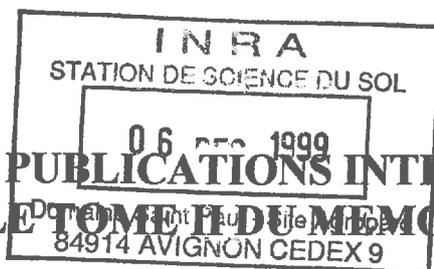
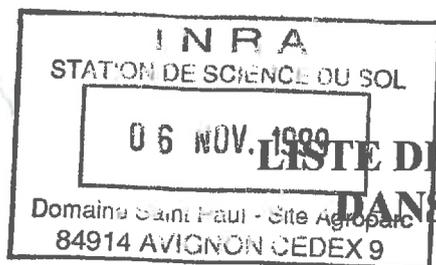
Il y a maintenant 20 ans, un chercheur du CNRS est venu me voir en tant qu'expert de l'AIEA dans le cadre d'un projet de cet organisme, pour m'appuyer dans mes travaux sur le bilan hydrique fondé sur l'humidimétrie neutronique. Cet expert était spécialiste de "mécanique des fluides". Le terme d'expert, la spécialité et l'appartenance au CNRS du missionnaire le rendait, pour moi, jeune agronome, a priori très impressionnant. Il l'était d'autant plus que ses collègues et lui avaient la réputation de manier avec aisance des concepts physiques et des équations complexes, qui n'étaient pas mon sport favori ni le quotidien de l'agronome moyen de cette époque. Or, grâce à sa pédagogie, sa simplicité, ce monde complexe est devenu compréhensible. Finalement, il ne faisait que traduire en langage mathématique un certain nombre d'observations et d'intuitions "agronomiques". Avec une grande capacité d'écoute de sa part, le pur physicien et l'agronome ont pu trouver un langage commun. Depuis vingt ans, nous avons poursuivi une collaboration très enrichissante pour moi. Aujourd'hui, ce qui m'impressionne le plus chez Michel c'est, malgré ses hautes responsabilités, sa disponibilité et sa capacité d'écoute restées intactes, sa curiosité pour des domaines qui ne sont pas les siens, son "adaptabilité" aux problèmes et contraintes de l'agronomie, et sa capacité de faire des aller retour parfois fulgurants entre le théorique et le concret.

Enfin, depuis mon arrivée en Côte d'Ivoire, j'ai bénéficié de l'appui sans faille de Pierre Siband, collègue du CIRAD, qui m'a ouvert (un peu !) à l'écophysiole, m'a encouragé à poursuivre mes travaux sur l'enracinement et l'eau dans des moments où j'étais tiraillé entre approches analytique et systémique. Par sa rigueur scientifique et son exigence de qualité, il a été un exemple que j'ai essayé de suivre. Mais, à côté de cette exigence, il a toujours su être à mon écoute et m'encourager dans les moments de doute.

Tous, R. Nicou, R. Tourte, S. Hénin et les co-auteurs du profil cultural, H. Manichon, C. Maertens, M. Vauclin, F. Tardieu, P. Siband., ont donc contribué à leur manière et à leur heure, à alimenter ma réflexion scientifique ; ils m'ont beaucoup plus appris qu'à l'école. Ils ont aussi contribué à maintenir chez moi un équilibre, certes fragile, entre des tendances vers plus de "science" ou vers plus d'"appliqué", vers plus sol ou vers plus de plante. Que toutes ces références soient ici collectivement remerciées, sincèrement et chaleureusement.

A côté de ces appuis purement scientifiques, j'ai pu bénéficier d'accueil, d'encadrement, de conseils, de financements et de facilités diverses mais O combien indispensables de la part des responsables nationaux des structures de Recherche à l'intérieur desquelles j'ai conduit mes travaux. Ces structures nationales ont été principalement, l'ISRA au Sénégal, l'IDESSA en Côte d'Ivoire (maintenant CNRA) et l'INERA au Burkina Faso. Ces responsables scientifiques et administratifs, ces collègues, ont été si nombreux en 30 ans que je ne peux les citer tous ici, mais sachez que je ne vous oublie pas et vous exprime, ici, ma très sincère reconnaissance.

Je voudrais associer dans cette reconnaissance mes collègues de terrain en particulier Sékou Doumbia, Patrice Autfray et Hubert Charpentier qui m'ont ouvert leur terrain d'expérimentation en station ou en milieu paysan pour que j'y mène des travaux en collaboration avec eux. Je remercie aussi Eric Guei Ba, mon assistant des dernières années de Côte d'Ivoire et Thérèse ma toujours souriante secrétaire de l'IDESSA pour leur aide précieuse.



**LISTE DES PUBLICATIONS INTEGRÉES
DANS LE TOME II DU MÉMOIRE**

**24 références d'articles de J.L. Chopart
classées par thème et ordre de citation dans la synthèse**

A : Variabilités spatiales du milieu physique et des effets des modes de gestion du sol

- 1 : CHOPART J.L. et NICOU R., 1989 Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. L'Agron. Trop. 44.4 269-281.
- 2 : VAUCLIN M. et CHOPART J.L., 1991 Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale de dispositifs agronomiques. In : "Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride". Aupelf-Uref John Libbey Eurotext édit. Paris pp.307-315.

B : Etat hydrique du sol, bilans hydriques sous culture

- 1 : CHOPART J.L. et VAUCLIN M., 1990 Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. Soil Science Soc. America Journal., vol 54, 5, sept. oct. 1377-1384.
- 2 : CHOPART J.L., SIBAND P., 1988 PROBE : Programme de Bilan de l'Eau. Collection Mémoires et Travaux de l'IRAT n° 17. 76 p. CIRAD éditeur BP 5035 34032 Montpellier cedex France.
- 3 : CHOPART J.L., 1989 Effect of tillage on a corn-cotton sequence in Côte d'Ivoire. In : "Soil crop and water management in the Sudano-Sahelian Zone" ICRISAT edit. pp. 325-331.
- 4 : VAUCLIN M. et CHOPART J.L., 1991 Water balance modelling of a cropped soil : deterministic and stochastic approaches. In : "Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian". ICRISAT. IAHS Public. n° 199 pp. 471-482.
- 5 : CHOPART J.L., 1984 Soil erosion and control methods of rice cropping systems. Some west african exemples. In : "An overview of upland rice cropping". Int. Rice Res. Inst. (IRRI) édit. pp. 479-491.
- 6 : CASTA P., CHOPART J.L., JANEAU J.L. et VALENTIN C., 1989 Mesure du ruissellement sur un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire après six ans de culture continue avec ou sans labour. L'Agron. Trop. 44.4 255-262.
- 7 : VAUCLIN M. et CHOPART J.L., 1992 L'infiltrométrie multidisques pour la

- 2 : CHOPART J.L., 1990 Rôle du travail du sol sur les termes du bilan hydrique - enracinement-rendement des cultures pluviales (cas du Sénégal et de la Côte d'Ivoire). In : "Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales" pp. 223-237. IRAT CIRAD édit. Montpellier.
- 3 : NICOU R., CHARREAU C. et CHOPART J.L., 1993 Tillage and soil physical properties in semi arid west Africa. Soil and Tillage Research, 27 125-147.
- 4 : CHOPART J.L. et KONE D., 1994 Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en région centre Côte d'Ivoire. In : "Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale". Aupelf Uref John Libbey Eurotext édit. pp. 39-47.
- 5 : CHOPART J.L., NICOU R. et VACHAUD G., 1979 Le travail du sol et le mulch pailleux. 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 (AIEA) edit. 235.22 pp. 199-221.
- 6 : CHOPART J.L. et KONE D., 1985 Influence de différentes techniques de travail du sol sur l'alimentation hydrique du maïs et du cotonnier en Côte d'Ivoire. L'Agron. Trop. 40 3 223-229.
- 7 : NICOU R. et CHOPART J.L., 1979 Water management methods in sandy Soils of Sénégal. In : "Soil tillage and crop production". IITA proc. sér. N°2, 248-257.

détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire. L'Agron. Trop. 46.4 11-27.

- 8 : CHOPART J.L., VAUCLIN M. et NICOU R., 1991 Le bilan hydrique : dilettantisme ou nécessité pour comprendre les relations milieu physique-culture en zone tropicale sèche ? In : "Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone". ICRISAT. IAHS Public. N° 199 pp. 345-355.

C : Dynamique et fonctionnement des systèmes racinaires

- 1 : 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. Académie des Sciences Paris. Sér. D : Sci. nat., t. 284, 1285-1287.
- 2 : CHOPART J.L., 1983 Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. L'Agron. Trop. 38.1 37-46.
- 3 : CHOPART J.L. 1996 Comparison of several methods of studying the maize deep root system under field conditions. Poster 5ème Symp. Int de la Société Int. de recherches sur les racines. 14-18 07 96. Clemson Univ. Caroline du sud (USA). Conf prog. and abstracts, p.138.
- 4 : CHOPART J.L. et SIBAND P., 1999. Development and validation of a model to describe root length density of maize from root counts on soil profiles. Plant and Soil (1 14) (sous presse).
- 5 : CHOPART J.L., 1985 Développement racinaire de quelques espèces annuelles cultivées en Afrique de l'Ouest et résistance à la sécheresse. In : "La Sécheresse en zone intertropicale - Pour une lutte intégrée" CILF édit. Paris. pp. 145-154.
- 6 : NICOU R. et CHOPART J.L., 1979 Root growth and development in sandy and sandy clay soils of Senegal. In : "Soil physical properties and crop production in the tropics" - J. Wiley and sons. édit. New-York, pp. 375-384.
- 7 : CHOPART J.L. et NICOU R., 1976 Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. L'Agron. Trop. 31-1-7-28.

D : Application aux relations entre modes de gestion du sol, état de la parcelle, alimentation hydrique et rendement

- 1 : PENE C.B. et CHOPART J.L., 1997 Gestion de l'irrigation en culture de canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) Sous climat tropical humide, à travers le cas des régions Nord et Centre de la Côte d'Ivoire. Sécheresse, vol 8, n°2, p87-98.

À mon père,

forestier.

Tu m'as donné la curiosité et le goût du monde végétal et du sol.
Il y a quarante ans, lors de martelages avec toi, j'ai compris pourquoi
tu sacrifiais des arbres jeunes et sains : pour que la forêt soit à la fois
plus rentable, plus durable, plus belle, et plus "naturelle".
Tu m'as ainsi initié, par la pratique, dans le milieu, sans discours,
au futur concept de "gestion durable des ressources naturelles".

"Ne retire pas trop de ton champ,
n'épuise pas toute sa fertilité,
mais laisse dedans un peu de ton cœur"

Pline l'Ancien.

(In : Revue Cérès, novembre 1990)

"Rien n'est aussi dangereux
que la certitude d'avoir raison".

F. Jacob

(Le jeu des possibles, 1981)

DOCUMENTS DE J.L. CHOPART, SUPPORT DE LA THESE

Les documents suivants (42) ont servi de support à cette synthèse. Ils sont listés par ordre chronologique. Les publications principales, au nombre de 24, sont jointes dans le tome n° II en tant que partie intégrante de la thèse, regroupées par thèmes. Elles sont indiquées ici par leur référence (entre parenthèses) dans le Tome II.

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. et NICOU R., 1976. Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. L'Agron. Trop. : (31) 7-28. (TII C.7)

CHOPART J.L., 1977a. Caractérisation de certains paramètres morphologiques des systèmes racinaires à partir d'échantillons représentatifs. Doc. mult. INRA Toul. et CIRAD Mont. 82 p.

CHOPART J.L., 1977b. Contribution à la mise au point d'une méthode d'étude de profils racinaires par localisation de rubidium. Doc. mult. ENSA Montpellier et CIRAD. 45 p.

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. Académie des Sciences Paris. Sér. D : (284) 1285-1287. (TII C.1)

CHOPART J.L., NICOU R. et VACHAUD G., 1979. Le travail du sol et le mulch pailleux. 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 (AIEA) édit. : n° 235. 22. 199-221. (TII D.5)

NICOU R. et CHOPART J.L., 1979a.. Water management methods in sandy Soils of Sénégal. In : "Soil tillage and crop production". IITA édit. proc. sér. : n° 2. 248-257. (TII D.5)

NICOU R. et CHOPART J.L., 1979b. Root growth and development in sandy and sandy-clay soils of Sénégal. In : "Soil Physical properties and crop production in the tropics" J. Wiley and sons edit. New York, 375-384. (TII C.6)

CHOPART J.L., 1980. Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales

au Sénégal (arachide, mil, sorgho, riz pluvial). Thèse de doctorat de l' INP Toulouse. 162 p.

CHOPART J.L. *et al.*, 1981. Comparaison de différentes techniques de travail du sol en trois écologies de l'Afrique de l'ouest. Doc. Mult. IRAT Mont., 65 p.

CHOPART J.L., 1983. Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. L'Agron.Trop. : (38 1) 37-46. (TII C.2)

CHOPART J.L., 1984. Soil erosion and control methods of rice cropping systems. Some West African exemples. *In* : "An overview of upland rice cropping". Int. Rice Res. Inst. (IRRI) édit. 479-491. (TII B.5)

CHOPART J.L., 1985. Développement racinaire de quelques espèces annuelles cultivées en Afrique de l'Ouest et résistance à la sécheresse. *In* : "La Sécheresse en zone intertropicale - Pour une lutte intégrée" CILF édit. Paris. 145-154. (TII C.5)

CHOPART J.L. et KONE D., 1985. Influence de différentes techniques de travail du sol sur l'alimentation hydrique du maïs et du cotonnier en Côte d'Ivoire. L'Agron. Trop. : (40 3) 223-229. (TII D.6)

CHOPART J.L., et SIBAND P., 1988. PROBE : Programme de Bilan de l'Eau. Collection Mémoires et Travaux de l'IRAT CIRAD éditeur Montpellier France : n° 17. 76 p. (TII B.2)

CHOPART J.L., 1989a. Effect of tillage on a corn-cotton sequence in Côte d'Ivoire. *In* : "Soil crop and water management in the Sudano-Sahelian Zone" ICRISAT édit. 325-331. (TII B.3)

CHOPART J.L., 1989b. Scruter les racines à travers des grilles. Une méthode fort utile. Article dans "Info R3S" : n° 2, p 5. (lettre du réseau CORAF R3S).

CHOPART J.L., 1989c. Méthodes d'étude de l'enracinement à mettre en oeuvre dans le cadre du projet R3S PF2, recommandations. Note tech. n° 4/89 Idessa Bouaké RCI, 16 p.

CHOPART J.L. et NICOU R., 1989. Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. L'Agron. Trop. : (44 4) 269-281. (TII A.1)

CASTA P., CHOPART J.L., JANEAU J.L. et VALENTIN C., 1989. Mesure du ruissellement sur un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire après six ans de culture continue avec ou sans labour. L'Agron. Trop. : (44.4) 255-262. (TII B.6)

CHOPART J.L., 1990a. Conditions d'alimentation hydrique du riz pluvial et du maïs à Guéménédou et Mahibuo dans les expérimentations du PES de Gagnoa. Evaluation par modélisation du bilan hydrique (modèle PROBE). Note tech. Idessa CIRAD : n° 40/90/FS. 56 p.

CHOPART J.L., 1990b. Rôle du travail du sol sur les termes du bilan hydrique - enracinement - rendement des cultures pluviales (cas du Sénégal et de la Côte d'Ivoire). *In* : "Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales" IRAT CIRAD édit. Montpellier. 223-237. **(TII D.2)**

CHOPART J.L., 1990c. Variable effects of soil cultivation on maize production in the Ivory Coast as a function of conditions affecting water supply. *In* : "Climatic risk in crop production: Models and management in the semi-arid tropics and sub-tropics". Poster papers from Int. Symposium Brisbane. Muchow and Bellamy CSIRO edit. Australie. 104-105.

CHOPART J.L. et VAUCLIN M., 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. *Soil Science Soc. America Journal.* : (54, 5) 1377-1384. **(TII B1)**

CHOPART J.L., 1991. Etude au champ de certains paramètres racinaires utiles pour l'évaluation de la distribution spatiale et de la longueur des racines à partir de comptages d'impacts sur un plan. Note techn. n°17/91, Idessa Bouaké, RCI, 26p.

CHOPART J.L., VAUCLIN M. et NICOU R., 1991. Le bilan hydrique : dilettantisme ou nécessité pour comprendre les relations milieu physique-culture en zone tropicale sèche ?. *In* : "Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone". ICRISAT. IAHS Public : n° 199 : 345-355. **(TII B.8)**

VAUCLIN M. et CHOPART J.L., 1991a. Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale de dispositifs agronomiques. *In* : "Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride". Aupelf-Uref John Libbey Eurotext édit. Paris. 307-315. **(TII A.2)**

VAUCLIN M. et CHOPART J.L., 1991b. Water balance modelling of a cropped soil : deterministic and stochastic approaches. *In* : "Soil Water balance in the Sudano-sahelian", ICRISAT- IAHS public. n° 199 : 471- 482. **(TII B.4)**

VAUCLIN M. et CHOPART J.L., 1992. L'infiltrométrie multidisques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire. *L'Agron. Trop.* : (46 4) 11-27. **(TII B7)**

CHOPART J.L. et SIBAND P., 1993. A method for annual plant root system studies in the field by root mapping : advantages and problems. Poster abstract. *In* : "Abstracts of presentations at the first Int. Symposium on the biology of adventitious root formation", Dallas (USA) avril 1993. USDA General Tech. : report n° NC 154. 80.

NICOU R., CHARREAU C. et CHOPART J.L., 1993. Tillage and soil physical properties in semi arid west Africa. *Soil and Tillage Research* : (27) 125-147. **(TII D.3)**

CHOPART J.L. et KONE D., 1994. Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en région centre Côte d'Ivoire. *In* : "Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale". Aupelf

Uref John Libbey Eurotext édit. 39-47. **(TII D.4)**

CHOPART J.L. et MARION D., 1994. Caractérisation au champ de l'enracinement de la canne à sucre. Application à l'élaboration d'une méthode d'évaluation de la biomasse racinaire. Rapp. ATP Cirad 14/92. Note tech. Idessa : n°7/94 RD. 28 p.

CHOPART J.L., 1995a. Etat physique du sol de parcelles paysannes du nord de la Côte d'Ivoire après cinq ans de culture continue sous différents modes de gestion du sol. Note tech. Idessa CIRAD: n° 125/95 RD, 27 p.

CHOPART J.L., 1995b. Profondeur d'enracinement d'une culture de maïs : Comparaison de différentes méthodes d'estimation *in situ*. Note tech. Idessa CIRAD : 13/95. 24 p.

CHOPART J.L., 1995c. Techniques de gestion du sol et alimentation hydrique des cultures tropicales. In : "Deuxième programme science et technique au service du développement . Sous programme : agriculture tropicale et subtropicale. Projets de recherches 1987-1991 vol. Résumés des rapports". Risopoulos édit. CTA Wageningen Pays-Bas. 3-7.

CHOPART J.L., 1996. Comparison of several methods of studying the maize deep root system under field conditions. Poster 5ème Symp. Int de la Société Int. de recherches sur les racines. Clemson Univ. Caroline du sud (USA). Conf. prog. and abstracts : 14-18 07 96. p.138. **(TII C.3)**

CHOPART J.L., 1997a. Synthèse des résultats 1996 de l'opération de recherche : Fertilité physique du sol, fonctionnement du profil cultural. Note RD/DCV Idessa CIRAD. 30 p.

CHOPART J.L., 1997b. Distribution spatiale des racines de maïs dans un sol ferrugineux tropical. Application à l'estimation des densités de longueurs racinaires à partir de comptages sur un profil de sol. Note tech. Inera-Cirad 18 p.

PENE C.B., CHOPART J.L. et ASSA A., 1997. Gestion de l'irrigation en culture de canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) sous climat tropical humide, à travers le cas des régions Nord et Centre de la Côte d'Ivoire. Sécheresse : (8, 2) 87-98. **(TII D.1)**

SIBAND P. et CHOPART J.L., 1998. Utilisation par une culture des ressources du sol. Application à l'utilisation de l'azote par le maïs. Document de travail Cirad Montpellier, 26p..

JOURDAN C. et CHOPART J.L., 1998. Méthodes d'étude des systèmes racinaires au champ menées au CIRAD. Poster, 16ème congrès mondial de Sc. du Sol, Montpellier août 1998. 1 p.

CHOPART J.L. et SIBAND P., 1999. Development and validation of a model to describe root length density of maize from root counts on soil profiles. Plant and Soil (114) (sous presse). **(TII C.4)**

SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I : POSITION DU PROBLÈME</u>	5
1 LE CADRE PHYSIQUE ET HUMAIN	5
<u>11 LE MILIEU PHYSIQUE</u>	
111 Le climat	
112 Les sols	
<u>12 LE MILIEU HUMAIN ET SON EVOLUTION</u>	
<u>13 LES SYSTEMES DE CULTURE ET LEUR EVOLUTION</u>	
131 Les systèmes traditionnels	
132 Evolution probable des systèmes et risques associés	
133 Vers une diversification et une optimisation des choix	
2 LE CADRE SCIENTIFIQUE	11
<u>21 PLACE DE L'EAU DANS LE FONCTIONNEMENT DU SOL ET DE LA PLANTE</u>	
211 L'eau déterminant de la saison de culture	
212 L'eau facteur et milieu de vie	
213 L'eau facteur potentiel de dégradation du milieu et de dysfonctionnement de la culture	
<u>22 PLACE DES RACINES DANS LE FONCTIONNEMENT DU SOL ET DE LA PLANTE</u>	
221 Fonction d'ancrage dans le sol	
222 Fonction de puits	
223 Les racines source de carbone et d'azote	
224 Les racines protectrices du sol	
3 OBJECTIFS DE RECHERCHE	14
<u>31 PROBLEMATIQUE DE LA SYNTHÈSE</u>	
311 Les enjeux	
312 La complexité du problème	
313 Le rôle clé de la couche de sol recevant les racines	
314 Deux points à étudier en priorité	
<u>32 DOMAINE ET LIMITES DE L'ETUDE</u>	
4 SYNTHÈSE DE LA POSITION DU PROBLÈME	17

<u>CHAPITRE II : DISPOSITIFS ET METHODES SUPPORTS DE LA SYNTHESE</u>	19
1 DISPOSITIFS D'ETUDE ET TRAITEMENTS	19
11 <u>DISPOSITIFS D'ETUDE</u>	
111 Dispositifs en station expérimentale	
112 Etudes en milieu réel	
12 <u>LES ETATS DU SOL CREES</u>	
121 Caractéristiques générales des modes de gestion du sol étudiés.	
122 Relations entre mode de gestion du sol et état du sol dans les milieux étudiés	
123 Principaux états "types" du sol rencontrés au moment du semis	
124 Définition des traitements expérimentaux	
2 RAPPEL DES METHODES "CLASSIQUES" MISES EN OEUVRE	28
<u>21 ANALYSE DE LA VARIABILITE SPATIALE DES DISPOSITIFS D'ETUDE.</u>	
<u>22 EVALUATION DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE</u>	
221 Mesures tensio-neutroniques du drainage et de L'ETR	
222 Evaluation de l'aptitude du sol au ruissellement par simulation de pluies	
<u>23 ETUDE DES SYSTEMES RACINAIRES</u>	
231 Prélèvements d'échantillons de sol contenant des racines	
232 Caractérisation des racines contenues dans les échantillons de sol	
<u>CHAPITRE III : RESULTATS</u>	33
1 MISE EN EVIDENCE DE VARIABILITES DU MILIEU PHYSIQUE ET DES EFFETS DES MODES DE GESTION DU SOL, CONSÉQUENCES	33
<u>11 OBSERVATIONS DE VARIABILITÉS INTER-ANNUELLES ET AU COURS D'UNE MÊME ANNÉE DU FONCTIONNEMENT DU PEUPEMENT VÉGÉTAL</u>	
111 Essais de longue durée à Bambey, Sénégal	
112 Série d'essais à Bouaké, Côte d'Ivoire	
<u>12 CONSEQUENCES : BESOINS DE RECHERCHE ET D'OUTILS ADAPTES</u>	
2 CONTRIBUTIONS D'ORDRE METHODOLOGIQUE	35
<u>21 TEST DE LA VARIABILITE SPATIALE DES DISPOSITIFS AGRONOMIQUES</u>	
<u>22 EVALUATION DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE</u>	
221 Informatisation du traitement des données relatives au bilan hydrique parcellaire	
222 Adaptation d'un modèle de simulation du bilan hydrique à l'échelle de la parcelle cultivée	

223 Evaluation des caractéristiques hydrodynamiques de la surface du sol

23 CARACTERISTIQUES ET FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES RACINAIRES

231 Recherche de points représentatifs de prélèvements d'échantillons de racines

232 Estimation des diamètres racinaires

233 Estimation des fronts verticaux et horizontaux

234 Adaptation de la méthode de cartographie des racines pour estimer leur longueur

235 Estimation du taux d'exploration racinaire dans le sol par modélisation

3 ETATS DU SOL, SYSTEMES RACINAIRES ET BILAN HYDRIQUE 65

31 RELATIONS ENTRE ETAT DU SOL ET COMPORTEMENT HYDRIQUE

311 Mesure du ruissellement avec le mini-simulateur de pluies.

312 Etat du sol et caractéristiques hydrodynamiques de surface

32 DYNAMIQUE DES SYSTEMES RACINAIRES DES CULTURES ANNUELLES EN RELATION AVEC L'ETAT DU SOL

321 Dynamique des systèmes racinaires en bonnes conditions de culture

322 Gradients horizontaux et variabilité spatiale de distribution

323 Etat physique du sol et systèmes racinaires

33 FONCTIONNEMENT DES RACINES DANS LE SOL

331 Systèmes racinaires et alimentation hydrique des cultures

332 Tests et utilisation du modèle de taux d'exploration racinaire

4 APPLICATIONS A L'ETUDE DES RELATIONS ENTRE MODES DE GESTION DU SOL, ETAT DE LA PARCELLE, ALIMENTATION HYDRIQUE ET RENDEMENT 80

41 ANALYSE DE LA VARIABILITE DU RENDEMENT ET DES EFFETS DES MODES DE GESTION DU SOL

411 Variabilité interannuelle à Bambey, Sénégal

412 Variabilité spatiale du rendement sur le même site la même année Bouaké 1989

42 CONTRIBUTION AU RAISONNEMENT DES EFFETS ET DE L'INTERET DES MODES DE GESTION DU SOL

421 Les modes de travail du sol conventionnel

422 Les nouveaux modes de gestion du sol

43 CONTRIBUTION A LA GESTION DE L'IRRIGATION DE LA CANNE A SUCRE

44 SYNTHESE ET FORMALISATION DES RELATIONS ETUDIEES

CONCLUSION 97

Bibliographie 104

Liste des symboles

- CE : coefficient de passage de la longueur théorique (DLRt) à la longueur mesurée (DLRm)
CO : coefficient de passage du nombre d'impacts racinaires à la densité de longueur théorique
CV : coefficient de variation en %
D : drainage total pendant la culture en mm
Da : densité apparente
DLRc : densité de longueur racinaire calculée, calculée par le modèle NI.CO.CE en $m\ m^{-3}$
DLRm : densité de longueur racinaire mesurée en $m\ m^{-3}$
DLRt : densité de longueur racinaire théorique, calculée par le modèle NI.CO en $m\ m^{-3}$
 d_m : diamètre moyen des racines dans un échantillon en mm
DP : distance entre la base de la plante et le point de comptage des impacts racinaires. en m
EG : taux pondéral de sol refusé au tamisage à 2 mm (éléments grossiers)
 E_k : teneur pondérale du sol en un élément à une cote k
EMR : écart moyen entre les racines en cm
ETM : évapotranspiration maximale de la culture en $mm\ jour^{-1}$
ETR : évapotranspiration réelle de la culture en $mm\ jour^{-1}$
ETP : évapotranspiration potentielle de la culture en $mm\ jour^{-1}$
EX : taux d'exploration du sol par les racines dans un volume de référence ($EX = VE/V$)
FR : front racinaire en cm
H : charge hydraulique en cm d'eau
h : ordonnée de l'intersection des cônes de sol exploré (modèle linéaire d'exploration, (fig.11))
 h_0 : pression capillaire en cm d'eau
Il : Intensité limite de ruissellement en $m\ h^{-1}$
JAS : jours après semis
Kc : coefficient cultural
 $K_{(\theta)}$: conductivité hydraulique en $mm\ jour^{-1}$
L : longueur totale d'un échantillon de racines en mm
MAWSR : réserve maximale en eau utile du sol (anglais) en mm
MET (anglais) évapotranspiration maximale de la culture en $mm\ jour^{-1}$
NI : nombre d'impacts racinaires sur un plan par m^2
P : probabilité d'une absence de signification d'une régression
Pl : pluviosité totale pendant la culture en mm
PET : ETP (anglais) en $mm\ jour^{-1}$
 P_x : indice de direction préférentielle des racines par rapport à une face x de référence
q : flux hydrique en $mm\ jour^{-1}$
 QE_k : masse d'élément contenu dans une maille de cote k en g
QEacc : quantité d'élément accessible dans un volume de sol en g
r : rayon d'exploration racinaire en cm
 R^2 : coefficient de régression
R : rendement de la culture en $kg.ha^{-1}$

RLDC : densité de longueur racinaire calculée (anglais), le modèle NI.CO.CE en $m\ m^{-3}$
 RES : Taux d'exploration racinaire du sol (anglais) en %
 RUr : Réserve en eau utile du sol entre la surface et la cote du front racinaire en mm
 RUs : Réserve en eau utile du sol par cm de sol en $cm.cm^{-3}$
 RUz : réserve maximale en eau utile entre la surface et la cote z en cm
 Sd : surface diamétrale d'un échantillon de racines en mm^2
 SDD : degré d'assèchement du sol
 $S_{(0)}$: Sorptivité capillaire à la pression $h_{(0)}$ en $mm.h^{-0.5}$
 S_{dr}^2 : variance des diamètres des racines dans un échantillon
 T : nombre d'années de culture depuis la défriche ou un apport de chaux
 t_p : temps de submersion (minutes)
 Vr : volume d'un échantillon de racines en mm^3
 V : volume élémentaire total de sol en m^3
 VE : volume de sol exploré autour des racines en m^3
 VGR : Vitesse de croissance du front racinaire (anglais) en $cm\ jour^{-1}$
 z : cote de calcul du drainage en cm
 λ_m : dimension moyenne de pore hydrauliquement fonctionnel en μm

INTRODUCTION

Cette thèse est fondée sur des **travaux agronomiques** réalisés dans le cadre de recherches en coopération avec principalement deux pays, le **Sénégal** et la **Côte d'Ivoire**, entre 1970 et 1996. Des séjours plus brefs dans deux autres pays, Cameroun (1975) et **Burkina Faso** (1997), ont permis d'élargir l'éventail des milieux physiques et humains. Sans prétendre à l'exhaustivité, elle présente une synthèse des principaux résultats obtenus, dont la plupart ont fait l'objet de publications ou communications plus spécifiques.

L'Agronomie est définie par M. Sebillotte comme "l'étude, menée simultanément dans le temps et dans l'espace, des relations au sein de l'ensemble constitué par le peuplement végétal et le milieu physique, chimique et biologique et sur lequel l'homme agit pour en obtenir une production" (cité par Capillon, 1993). La **parcelle cultivée** comprend la couche de sol à l'intérieur de laquelle les plantes vont s'approvisionner en eau et en nutriments. La **limite** de cette couche **dépend** donc étroitement de la profondeur maximale **des racines**.

Dans cette étude sur les relations entre état physique du sol, systèmes racinaires et fonctionnement du peuplement végétal, on a été conduit à mettre en pratique une **approche agronomique à l'échelle de la parcelle** (avec les acceptions des termes "agronomie" et "parcelle" venant d'être définis), d'en **cerner l'intérêt et les contraintes** et de vérifier que, du fait des relations complexes entre les éléments mentionnés ci-dessus, chaque parcelle cultivée est différente de sa voisine. L'agronome ne doit donc pas avoir une approche trop réductrice de ces milieux et doit être attentif à ne pas extrapoler trop hâtivement des résultats locaux. Il faut alors disposer **d'outils d'analyse et de diagnostic simples** permettant une approche aussi scientifique que possible, partant d'observations de terrain aussi nombreuses que nécessaires pour **tenir compte de la variabilité des situations locales**.

Toutefois, l'**Agronomie** est aussi une science appliquée, une **science pour l'action**. L'agronome est appelé, avec d'autres, à relever les grands défis alimentaires des prochaines décennies dans les pays des régions chaudes à très forte démographie. Pour être utile, il doit donc avoir aussi une capacité de réduction raisonnée de cette variabilité naturelle, une capacité de synthèse, de mise en évidence des contraintes majeures physiques, techniques et humaines. Cela conduit à une **étude intégrée** de ces facteurs dans des milieux plus ou moins homogènes, identifiés par des typologies

(Capillon, 1993) d'une part, et à une approche écorégionale, fondée sur un zonage agro-écologique (Manichon, 1995) d'autre part. La **modélisation** (modèles de bilan hydrique et de fonctionnement des cultures) constitue, à cet égard, un outil très utile et particulièrement bien adapté.

Ceci peut paraître contradictoire avec l'affirmation première de l'intérêt d'une approche individuelle, prenant en compte la réalité du terrain avec sa diversité et sa variabilité. Mais un diagnostic individuel doit se fonder sur la connaissance de lois régissant les relations définissant l'agronomie. Cela est encore plus évident si le diagnostic doit aboutir à un pronostic. **Il faut donc concilier les deux nécessités de diagnostic local et d'aptitude à la synthèse.**

Même à l'échelle de la parcelle cultivée, il n'a pas été possible d'aborder toutes les relations relevant de l'Agronomie. On a plus particulièrement approfondi certaines d'entre elles et certains compartiments car, dans les milieux étudiés, ils nous paraissent jouer un rôle plus important que d'autres dans les processus visant à une amélioration durable de la production, tout en préservant le milieu. C'est ainsi qu'ont été privilégiées, pour des raisons précisées ultérieurement, les **relations entre l'état du sol et le fonctionnement hydrique du peuplement végétal**. Il est clair que l'amélioration durable de la production et encore moins l'Agronomie ne se limitent aux aspects abordés ici. Ceux-ci n'en sont qu'une pierre. On a d'ailleurs travaillé au sein d'**équipes** prenant en compte d'autres aspects de l'agronomie, **en vue d'une approche systémique plus complète.**

Dans une **première partie** (tome I), après avoir situé le cadre et la **finalité de nos travaux** (chapitre I), puis rappelé brièvement les principaux **dispositifs et méthodes** utilisés (chapitre II), on présentera une synthèse des **résultats** obtenus (chapitre III). Dans ce chapitre, on séparera les contributions d'ordre directement **méthodologique** et celles permettant d'avoir une meilleure **compréhension** du fonctionnement hydrique des parcelles cultivées. On tirera enfin les principaux **enseignements** de ces travaux de terrain obtenus sur une période de presque 30 ans, en mettant l'accent sur les aspects méthodologiques et sur la démarche utilisée en discutant de sa contribution à la mise au point de modes de gestion du sol, durables, adaptés aux conditions pédo-climatiques locales et prenant en compte les contraintes techniques.

La **seconde partie** (Tome II) rassemble une **sélection d'articles ayant servi de support à cette synthèse**. Ils sont regroupés en 4 thèmes:

- Le premier est relatif à la mise en évidence d'une variabilité de la production et des effets des modes de gestion du sol particulièrement importante, montrant l'intérêt d'une meilleure compréhension des origines de cette variabilité.
- Dans les deux thèmes suivants, on présente les travaux relatifs aux outils d'étude, développés, adaptés et/ou mis en oeuvre pour étudier le comportement hydrique du sol sous culture d'une part, la dynamique et le fonctionnement des systèmes racinaires d'autre part.
- Le quatrième thème regroupe les résultats de travaux à caractère plus synthétique ou finalisé, traitant des relations entre les facteurs étudiés : modes de gestion des sols, état et comportement du sol, eau dans le sol, systèmes racinaires, alimentation hydrique et rendement. On y utilise les outils présentés dans les deux thèmes précédents pour en particulier mieux expliquer les résultats du premier thème. Enfin, des exemples d'utilisation de ces outils sont donnés pour un meilleur raisonnement de l'intérêt de différents modes de gestion du sol ou de l'irrigation.

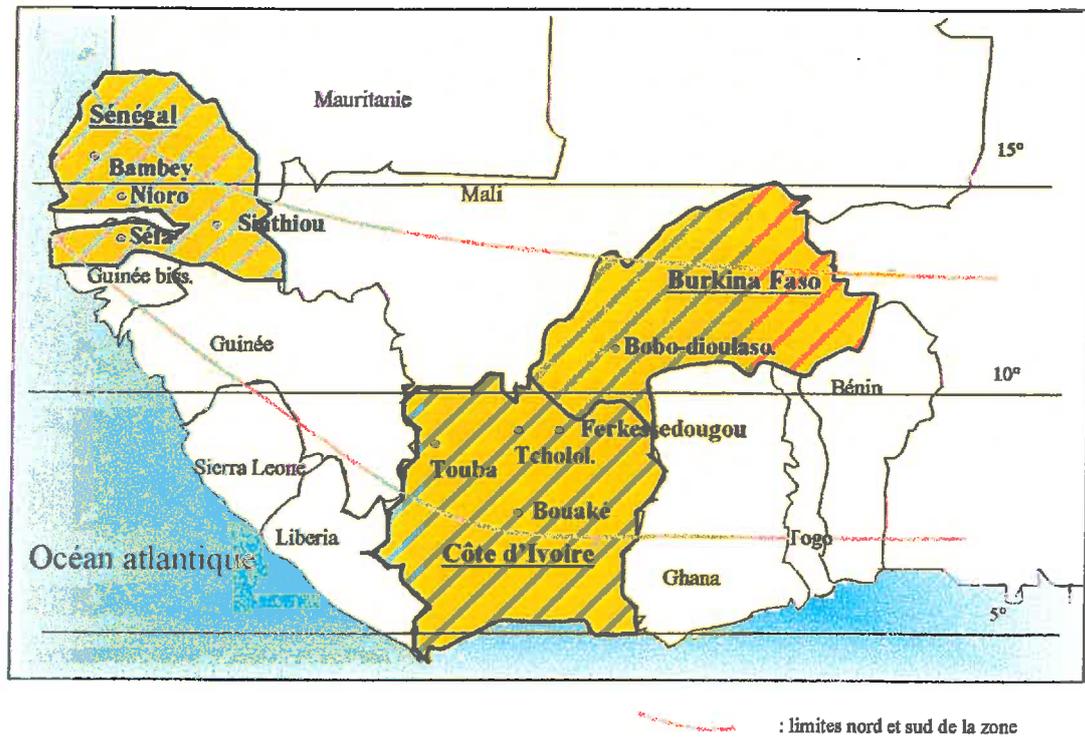


Figure n°1 Localisation de la zone concernée par l'étude et des principaux points d'appui expérimentaux

CHAPITRE I : POSITION DU PROBLEME

1 LE CADRE PHYSIQUE ET HUMAIN

11 LE MILIEU PHYSIQUE

Les travaux de terrain (figure n°1) support de cette étude ont été menés principalement dans différentes localités du Sénégal, à partir de l'isohyète 500 mm, entre les latitudes 15° et 13° N et dans les parties Nord et Centre de la Côte d'Ivoire, entre 10° et 7.5° N (figure n° 1). On a aussi travaillé dans la partie méridionale du Burkina Faso (11° N environ). Les milieux physiques du Sénégal et de la partie nord de la Côte d'Ivoire ont fait l'objet d'une synthèse (Charreau et Nicou, 1971). Celui de la Côte d'Ivoire a aussi fait l'objet d'une étude complète (Avenard *et al.*, 1971).

111 Le climat

Le climat de la zone d'Afrique occidentale au Sud du Sahara et son incidence globale dans la production végétale ont été étudiés par Cochemé et Franquin (1967). On note en particulier que les isohyètes sont grossièrement parallèles à l'équateur, au moins jusqu'à la latitude 9° N. Des indications plus synthétiques et plus directement appliquées à la problématique de l'étude figurent dans des travaux plus récents (Nicou *et al.*, 1993).

Le climat du **Sénégal et de la partie nord de la Côte d'Ivoire** est caractérisé par un **fort contraste entre une saison sèche et une saison des pluies estivale**. Si l'on admet qu'un mois pluvieux est défini par une pluviosité totale supérieure à 50 mm, la durée de la saison des pluies va de 2 mois à l'extrême nord de la zone à la hauteur de St Louis (latitude 16° N), à 6 mois à l'extrême sud vers Ferkessédougou (latitude 9.5° N). La hauteur des pluies passe de 200 à 1300 mm entre ces deux extrêmes. Le gradient de pluviosité est particulièrement marqué au Sénégal où il passe de 200 à 1200mm en moins de 800 km. L'ETP (voir liste des symboles) est forte, elle baisse en saison des pluies mais, même pendant cette période, elle est de l'ordre de 3 à 5 mm/jour. Par ailleurs, les pluies tombent souvent avec une très forte intensité. Celle-ci est régulièrement supérieure à 100 mm/h.

Aux plus basses latitudes, on passe progressivement à une zone à deux saisons des pluies : la durée de la période humide augmente plus que la hauteur d'eau, avec une diminution de la pluviosité au milieu de cette période de plus en plus marquée, au fur et à mesure que la latitude diminue. Ainsi, la **partie centrale de la Côte d'Ivoire** est localisée dans une bande de transition entre les régions à une et à deux saisons des pluies. Cette zone de transition, d'où sont issus la plupart de nos travaux en Côte d'Ivoire, est caractérisée par une **très grande irrégularité des précipitations**, ce qui fait que le risque climatique pour les cultures annuelles est élevé, plus grand que dans les zones plus septentrionales (Chopart, 1995d). Les limites de la zone concernée par l'étude correspondent au nord à un risque hydrique trop élevé pour autoriser une agriculture basée sur les cultures annuelles pluviales et au sud à la disparition de la contrainte hydrique (figure n°1).

1.12 Les sols

a) Grandes unités pédologiques

Les sols inondés d'alluvions récentes et les vertisols n'entrent pas dans le champ de l'étude. Ils représentent une proportion relativement faible des surfaces cultivées. Ils peuvent avoir une grande importance économique, mais la contrainte hydrique n'y est généralement pas majeure (forte réserve en eau utile ou apport d'eau par irrigation). En dehors de ceux-ci, les principaux sols cultivés rencontrés dans la région peuvent, en simplifiant, être séparés en trois classes :

- Sols ferrugineux faiblement lessivés (Ustrocepts). Ces sols sont principalement formés à partir de dépôts éoliens dans la zone comprise entre 400 et 800 mm de pluie.
- Sols ferrugineux lessivés (Ustalfs). Ce sont les sols les plus fréquemment rencontrés. Formés sur différents matériaux (Granito-gneiss, grés plus ou moins argileux), ils ont des profils très différenciés, avec un enrichissement en argile mais aussi souvent en éléments grossiers (>2mm) en profondeur (quartz, ou concrétions ferrugineuses).
- Sols ferrallitiques faiblement ou modérément désaturés (Alfic Eutrustox, Alfisol). Ces sols localisés dans les régions les plus méridionales et humides de la zone sont issus principalement de schistes ou de roches granitiques. Comme les sols ferrugineux lessivés, ils peuvent contenir une proportion importante d'éléments grossiers.

Ces trois types de sols représentent une très forte proportion des surfaces cultivables. Malgré leur diversité, ils ont des caractéristiques physiques et chimiques communes :

b) Caractéristiques physiques

- ◆ Les horizons superficiels sont généralement **sableux ou sablo-argileux** ;

- ◆ La kaolinite et les sesquioxides sont prédominants dans la fraction argileuse (Pieri, 1977). La kaolinite peut être altérée dans les sols ferrallitiques ;
- ◆ la **profondeur du sol** dans les zones de culture, est généralement **assez grande** (> 80 cm).

La combinaison de ces caractéristiques a pour conséquences :

- ◆ une quasi **inexistence de phénomènes de retrait-gonflement** liés aux variations d'humidité et permettant le maintien naturel de la structure du sol. La densité apparente de ces sols est donc assez forte, de l'ordre de 1.6 en absence d'éléments grossiers ;
- ◆ une **réserve en eau utile des sols relativement faible**, de 0.06 à 0.12 cm³.cm⁻³ de teneur en eau, compensée au moins en partie par la profondeur du sol, à condition que les racines des cultures puissent atteindre ces horizons profonds ;
- ◆ des **difficultés de croissance des racines**, en particulier dès que le sol commence à sécher.

c) Caractéristiques chimiques et physico-chimiques.

Les teneurs en P₂O₅ total et assimilable de ces sols sont généralement faibles, de l'ordre de 100 à 200 ppm pour le P₂O₅ total et de 5 à 20 ppm pour le P₂O₅ assimilable. La capacité d'échange cationique est limitée, en relation avec la teneur et la nature de l'argile (Pieri, 1977). Le complexe absorbant est faiblement saturé en cations avec peu de potassium échangeable (0.05 à 0.1 meq/100g). Il y a une nette tendance à l'acidification du sol après quelques années de culture continue, due au lessivage et à l'insuffisance des restitutions minérales (Pieri, 1976). Cela a pour conséquences un accroissement de la solubilité de l'aluminium, une diminution de l'assimilabilité du phosphore consécutive à la libération des ions AL⁺⁺⁺, et une perturbation de l'activité biologique. Les teneurs en azote total varient de 0.02 à 0.1% en surface avec une nette diminution en profondeur et celles en azote minéral sont très faibles, sauf au moment des premières pluies, en relation avec une forte reprise de l'activité biologique (Blondel, 1971). Ensuite, la minéralisation devient très lente, sauf dans la rhizosphère où se maintient une activité biologique favorable à la minéralisation et à la nitrification de l'azote (Siband, 1999). Le rapport C/N varie de 8 à 15.

d) Aptitude des sols à l'infiltration, au ruissellement et à l'érosion.

L'aptitude à l'infiltration des sols ferrugineux et ferrallitiques est bien sûr très variable, ce qui justifiera des mesures locales et les valeurs de référence fortement dépendantes de la méthode de

mesure. Mais il semble que les valeurs trouvées avec des méthodes de terrain en cas de l'érosion (Pieri, 1967), avec un simulateur de pluie (Casta et al, 1989), ou avec un perméamètre à disques (Vauclin et Chopart, 1992) donnent des valeurs de conductivité hydraulique du sol de l'ordre de 5 à 15 mm/h. Ces caractéristiques hydro-dynamiques du sol et la détachabilité de celui-ci font que, contrairement à une idée très généralement répandue, **les sols tropicaux étudiés ne résistent pas moins que d'autres à l'érosion hydrique**. Une revue des coefficients K (facteur sol) de l'équation de Wischmeier (Chopart, 1984) montre que ceux-ci, compris entre 0.02 et 0.2 sont du même ordre de grandeur que ceux de beaucoup d'autres sols. Ce sont **les pluies de 3 à 60 fois plus fortes en Afrique occidentale qu'en Europe** (Roose, 1981) qui sont **le principal facteur des pertes de sol par érosion plus grandes** en Afrique de l'Ouest qu'en Europe. Néanmoins, l'agressivité des pluies et la faible stabilité structurale des sols font qu'il existe une tendance marquée à la formation de croûtes de surface qui peuvent réduire nettement la capacité du sol à infiltrer l'eau (Casenave et Valentin, 1989).

12 LE MILIEU HUMAIN ET SON EVOLUTION

En Afrique de l'Ouest, la densité moyenne de population est encore relativement faible mais le taux d'accroissement de la population est parmi les plus importants du monde, de l'ordre de 3 % par an (3.6 % pour la Côte d'Ivoire). **La population double tous les 23 ans environ**. Ceci est dû principalement, en plus d'un taux de natalité traditionnellement élevé, aux progrès dans la maîtrise de la santé humaine qui a réduit la mortalité infantile. De plus, on assiste, parallèlement, à une **urbanisation très rapide**. Dans certaines zones plus denses, les systèmes traditionnels de culture se transforment rapidement. Ces poches de fortes densités de population où les systèmes évoluent peuvent être anciennes (pays Sérère au Sénégal, et pays Sénoufo dans le nord de la Côte d'Ivoire par exemple), ou récentes (ceintures péri-urbaines),

13 LES SYSTEMES DE CULTURE ET LEUR EVOLUTION

131 Les systèmes traditionnels

Les modes de cultures traditionnels restent majoritaires. On cultive pendant quelques années sur défriche de jachère forestière ou herbacée, puis on laisse de nouveau en jachère. Les restitutions organiques et minérales concernent de faibles surfaces. Seules les cultures dites de rente comme le coton ou les cultures maraîchères bénéficient de facteurs d'intensification plus poussés (amendement organique, herbicides, pesticides, travail du sol).

Les techniques de préparation du sol varient en fonction des ethnies et des cultures (Pélissier, 1966; Raulin, 1984; Sigaut 1984). Traditionnellement, **l'agriculteur sème sur un sol travaillé superficiellement**, essentiellement pour maîtriser les mauvaises herbes avant et après le semis. Le travail du sol profond (supérieur à 10 ou 15 cm) concerne surtout les cultures à organe de réserve souterrain (igname, manioc), sous forme de buttage ou de billonnage. Un terrain meuble est en effet nécessaire à un bon grossissement de la racine ou du tubercule. D'autres cultures pluviales (igname, arachide, mil etc..) sont toutefois buttées, en particulier dans les régions les plus pluvieuses, pour réduire les risques d'engorgement temporaire au niveau du pied.

132 Evolution probable des systèmes et risques associés

Pour relever ce défi de nourrir une population doublant presque tous les 20 ans et de fournir aux agriculteurs des revenus leur permettant de rester dans leurs villages, il faudra augmenter la production dans une agriculture fixée et sans augmentation des surfaces, c'est à dire évoluer vers une **intensification des systèmes**. Toutefois, cette évolution doit se faire dans le respect :

- ◆ de l'environnement, notamment grâce à une gestion du sol qui préserve le milieu,
- ◆ des contraintes et des équilibres macro-économiques au niveau du pays,
- ◆ des contraintes de faisabilité ou d'acceptabilité par l'agriculteur.

De nombreuses études ont été menées depuis plusieurs années pour mettre au point de tels systèmes de culture. Des résultats significatifs ont été obtenus dans le domaine de l'amélioration de la fertilité chimique (engrais, amendements organiques, chaulage), dans le domaine de la maîtrise des mauvaises herbes et des parasites, etc... En revanche, les résultats obtenus en matière de maintien ou d'amélioration de l'état physique du profil sont plus variables et contrastés (Charreau et Nicou, 1971; Lal, 1974, 1976).

a) Solutions conventionnelles

Des améliorations par rapport aux pratiques traditionnelles ont pu être obtenues grâce à un approfondissement de la couche travaillée, notamment en introduisant la **charrue** (Charreau et Nicou, 1971; Nicou *et al.*, 1993). On arrive alors à des itinéraires techniques se rapprochant de ceux pratiqués en Europe. La diffusion de ces itinéraires techniques et leur introduction dans les systèmes se heurtent toutefois à des **contraintes** dont les principales sont d'ordre technique (jours disponibles pour travailler) et économique (coût des équipements, rentabilité aléatoire de l'opération), (Bigot, 1985). A cela, s'ajoutent des **risques de dégradation** immédiate du sol si la qualité du travail n'est pas satisfaisante (risque d'érosion), et à plus long terme si celui-ci n'est

pas (ou pas suffisamment) accompagné d'autres facteurs ou conditions de production (apport de matière organique, restitutions minérales, etc...).

b) Les solutions alternatives

A côté de cette approche "conventionnelle" de la gestion des sols, il existe maintenant une alternative fondée sur le **semis sur un sol non travaillé, protégé par un paillis** composé des résidus de récolte et (ou) de plantes de couverture vivantes ou mortes. En fait, l'intérêt agronomique des plantes de couverture dans le milieu étudié a été mis en évidence depuis longtemps (Botton, 1958). Elles sont utilisées depuis de nombreuses années en Afrique de l'Ouest en cultures pérennes (hévée, palmier à huile). En ce qui concerne les cultures annuelles, la technique du semis direct avec les résidus de récolte laissés sur le terrain a d'abord été testée avec succès au Nigéria dans la zone à deux saisons des pluies (Lal, 1974, 1976). Elle a ensuite été introduite au Sénégal mais avec des effets peu marqués aussi bien en terme d'économie de l'eau (Chopart *et al.*, 1979) que de fonctionnement du peuplement végétal. En Afrique de l'Ouest, cette approche a été renouvelée plus récemment par l'étude de systèmes ayant montré leur intérêt ailleurs, notamment au Brésil (Charpentier, 1990). Il s'agit de systèmes reposant sur l'utilisation de plantes de couverture associées à la culture principale, sans travail du sol, après, éventuellement, un travail profond à la mise en place du système. Outre leurs **effets sur le profil cultural**, et sur le bilan organique du sol, ces méthodes peuvent aussi avoir des effets bénéfiques sur la **maîtrise des mauvaises herbes**, la **gestion de l'eau** et l'activité biologique du sol, la fertilité chimique (Charpentier *et al.*, 1991).

Comme les itinéraires techniques fondés sur le travail conventionnel, ceux reposant sur le semis direct avec protection du sol sont soumis à des **contraintes techniques et économiques**. Malgré leur intérêt agronomique avéré, il n'est pas sûr qu'il soit ni possible ni souhaitable de les mettre en oeuvre partout sans **vérification locale**.

133 Vers une diversification et une optimisation des choix

Les milieux physiques et humains et les systèmes de cultures de la région étudiée sont caractérisés par une grande diversité spatiale et une rapide évolution dans le temps, avec en plus, un fort risque hydrique. Dans ces conditions, la **pluralité des solutions techniques paraît indispensable**. Un des enjeux du futur semble être de pouvoir identifier les milieux où chacun des différents itinéraires techniques est le mieux adapté, à partir de critères biophysiques et techniques objectifs, avant de prendre en compte, dans une approche interdisciplinaire et systémique, les contraintes socio-économiques et humaines. Ce **diagnostic local de l'intérêt technique des différents**

modes de gestion du sol pourrait aboutir, dans le futur, à des actions de conseil de gestion du sol. Mais il faut pour cela :

- ◆ bien **comprendre**, avant de les modéliser, **les relations** complexes entre l'état du sol, la dynamique de l'eau dans le profil cultural, son accessibilité et son utilisation ou non par la culture ;
- ◆ disposer d'**outils de diagnostic et de pronostic agronomiques** opérationnels, y compris chez les acteurs.

2 LE CADRE SCIENTIFIQUE

L'importance de la connaissance des relations entre le sol, l'eau et le fonctionnement des végétaux, pour mieux comprendre le processus de production agricole et mieux gérer l'environnement, est largement admise. De nombreux travaux ont donc déjà été réalisés dans le domaine des relations entre le sol et l'eau, du plus fondamental au plus appliqué, et à différents niveaux de perception de l'agrégat au bassin versant. En revanche, la sphère racinaire a été beaucoup moins étudiée et paraît actuellement le maillon le plus faible de la "chaîne" de relations permettant de passer du sol et de l'eau au rendement. A l'échelle de la parcelle, on essaiera seulement de dégager brièvement les quelques points des relations entre le sol, l'eau et la plante,, paraissant importants dans notre approche agronomique de ces liaisons, sans chercher à être exhaustif.

21 PLACE DE L'EAU DANS LE FONCTIONNEMENT DU SOL ET DE LA PLANTE.

211 L'eau déterminant de la saison de culture.

Dans le milieu tropical étudié, l'eau (**la pluie**) **détermine le début et la fin des saisons des cultures**, jouant ainsi le rôle de la température dans les pays tempérés. Le sol étant très sec en saison sèche, il n'est généralement pas possible de le travailler pendant cette saison. Comme il n'est pas non plus possible de travailler celui-ci immédiatement après une pluie, l'eau et l'état hydrique du sol déterminent aussi fortement **le calendrier des travaux de l'agriculteur**.

212 L'eau facteur et milieu de vie

L'eau dans le sol est indispensable à la vie de la plante. Elle en consomme, en continu, des quantités très grandes, particulièrement dans le milieu tropical de l'étude où une **culture de maïs**

ou de riz pluvial doit trouver dans le sol de l'ordre de 60 m³ ha⁻¹ chaque jour au moment de la floraison. Or, cette ressource est rare, parfois insuffisante, avec un renouvellement aléatoire. Il faut donc faire en sorte que le maximum de l'eau de pluie puisse être réellement mis à la disposition de la plante en assurant en particulier une bonne infiltration de celle-ci dans le sol, en luttant contre les mauvaises herbes, et en faisant en sorte que le réservoir sol dans lequel la plante va s'approvisionner soit le plus grand possible. L'eau est aussi un milieu permettant une activité biologique du sol le plus souvent favorable. C'est aussi le milieu dans lequel va se faire la diffusion des nutriments dans le sol, puis du sol vers les racines.

213 L'eau facteur potentiel de dégradation du milieu et de dysfonctionnement de la culture.

L'eau de pluie, si elle est mal gérée, peut ruisseler et provoquer de l'érosion. Ceci est particulièrement vrai en zone tropicale où l'intensité des pluies est plus forte qu'en Europe (Roose 1981). L'excès d'eau peut aussi entraîner un accroissement des pertes d'éléments naturels du sol ou de fertilisants par **lixiviation**, conduisant à une dégradation de celui-ci ou (et) pollution des nappes. Enfin, un excès d'eau peut agir plus directement sur le fonctionnement du peuplement végétal à travers un manque d'oxygène au niveau des racines (**anoxie**).

22 PLACE DES RACINES DANS LE FONCTIONNEMENT DU SOL ET DE LA PLANTE

En plus de leur rôle principal d'approvisionnement de la plante en eau et en éléments nutritifs, les racines ont des fonctions et effets très divers, parmi d'autres :

- ◆ elles influencent la géochimie du sol par les acides qu'elles libèrent, par les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère qu'elles facilitent, au moins pour certaines plantes, et enfin par les remontées d'éléments de la profondeur vers la surface ;
- ◆ elles contribuent à la création et au maintien de la structure du sol ;
- ◆ elles participent au bilan organique du sol et constituent même, parfois, la seule restitution régulière ;
- ◆ elles créent dans leur environnement immédiat une niche écologique particulière, où l'activité biologique est plus intense et où elle se maintient plus longtemps en cas de stress.

On ne reprendra ici que les fonctions et effets agissant directement sur les relations entre le comportement hydrique du sol et le fonctionnement de la culture.

221 Fonction d'ancrage dans le sol

La plante est ancrée dans le sol par ses racines. C'est la fonction première des racines. Elle permet à la plante de maintenir sa position dans l'espace malgré les forces liées au vent, à la pluie, etc... Une plante mal enracinée sera beaucoup plus sensible à la verse. **Mais les plantes, immobiles, ne peuvent accroître leur accès aux nutriments qu'en accroissant le volume de sol réellement exploré, c'est à dire en augmentant la taille de leur système racinaire.**

222 Fonction de puits

C'est bien sûr le rôle principal des racines, permettant à la plante de s'approvisionner en eau et en éléments minéraux. A l'échelle des observations retenues ici, on peut considérer que pour les éléments minéraux majeurs, les déplacements de masse (solutés dans l'eau qui diffuse) liés au flux transpiratoire ne rendent compte que d'une faible proportion des éléments utilisés par une culture, surtout en sols pauvres en éléments nutritifs comme ceux auxquels on s'intéresse. Le processus majeur est la diffusion des formes solubles dans la phase liquide du sol. Ainsi, **le volume de sol pouvant approvisionner une racine dépend de la mobilité de l'élément considéré.** Cette mobilité est d'abord spécifique de l'élément, puis elle dépend secondairement de l'état hydrothermique du sol.

L'eau accède également à la racine par diffusion dans le sol sur une distance limitée, de quelques centimètres (Maertens *et al.*, 1974). Pour l'eau, la concentration dans le sol en "eau utile" est classiquement appréhendée à partir d'analyses de laboratoire (presse de Richards), sans prendre en compte le véritable "capteur", le système racinaire. Or, **même si le sol est bien pourvu en eau utile, cette eau ne sera pas utile à la plante s'il n'y a pas, à proximité, une racine pour l'intercepter.**

Dans le cadre d'études sur le bilan hydrique dans les sols cultivés et en particulier de modélisation de ce bilan, **la connaissance du système racinaire est donc indispensable. C'est un élément fondamental à la fois du comportement hydrique du sol et du fonctionnement du peuplement végétal.**

223 Les racines source de carbone et d'azote.

Après la récolte, la biomasse qui reste dans le sol est variable d'une espèce à l'autre mais peut atteindre environ 1000 kg/ha pour des espèces comme le riz ou le sorgho (Chopart, 1985). Les valeurs réelles de biomasse racinaire produite peuvent être supérieures du fait d'une dégénérescence d'une partie du système racinaire avant la récolte. Cette matière organique laissée

dans le sol a la caractéristique d'être très intimement liée à celui-ci et d'être localisée en partie à une profondeur supérieure à celle des enfouissements par voie mécanique. D'ailleurs, dans la majorité des terrains intéressés par cette synthèse, les racines sont la seule restitution organique régulière. Bien que le C/N des racines soit relativement élevé, les racines constituent également un apport d'azote. Les racines peuvent provenir des plantes cultivées, mais aussi des plantes de couverture ou de la végétation naturelle dans le cas de la jachère (Abbadie *et al.*, 1992)

224 Les racines protectrices du sol.

Les racines de la plupart des plantes, et en particulier des plantes cultivées, sont en contact étroit avec le sol, et plus spécialement en surface où la densité d'exploration est maximale. Elles forment un maillage, une armature, qui devrait **protéger les sols à structure fragile**, facilement détachable. Cela doit avoir une incidence sur la protection du sol et la réduction de l'érosion. Cet effet des racines est rarement cité. Cela pourrait pourtant expliquer en partie pourquoi, par exemple, un sol de prairie, sans empêcher le ruissellement, est moins sensible à l'érosion qu'un sol accueillant une culture sarclée.

3 OBJECTIFS DE RECHERCHE

31 PROBLEMATIQUE DE LA SYNTHÈSE

311 Les enjeux

a) Sur le plan agronomique

Dans le contexte présenté précédemment, il apparaît qu'une des priorités de l'agriculture et donc de la recherche agronomique est **d'augmenter la production agricole (et/ou le rendement) tout en réduisant les fluctuations interannuelles**. Il faut aussi **maintenir ou améliorer** au moindre coût et de façon durable la **fertilité du sol**. Des études, dont certaines sont présentées dans le tome II et reprises dans ce document montrent que, non seulement le risque climatique est un facteur limitant majeur du rendement des cultures annuelles, mais que c'est aussi un agent de la dégradation du sol. En effet, le déficit hydrique, par une baisse de croissance de la culture, entraîne une moins bonne protection du sol et une moins bonne interception racinaire des nutriments avec pour conséquence l'érosion et la lixiviation.

L'amélioration durable du rendement dépend de nombreux facteurs biophysiques, économiques et humains. Toutefois, dans le milieu étudié, plus que dans d'autres, il apparaît que **les facteurs liés à l'eau sont déterminants** comme on l'a déjà souligné (ch.I par. 11 et 21).

b) Sur le plan méthodologique

Les irrégularités des conditions pluviométriques, et en conséquence la variabilité des rendements, compliquent l'analyse des données relatives à la gestion durable des sols. Elles réduisent la capacité d'extrapolation à de plus grandes surfaces de résultats expérimentaux, forcément ponctuels. Dans le cadre d'études visant à l'amélioration durable de la production de l'agriculteur, tout en préservant l'environnement, il est donc souhaitable de **promouvoir un raisonnement plus local des choix techniques de l'agriculteur prenant en compte le risque climatique et les conditions physiques du sol.**

312 La complexité du problème

Les effets des interventions de l'homme, et en particulier des modes de gestion du sol, sur le sol et sur la production, ont fait l'objet de nombreux travaux en Afrique de l'Ouest surtout depuis 1960. Les résultats, obtenus dans différents milieux, ont été très variables voire contradictoires en particulier ceux concernant l'intérêt ou non d'un travail profond du sol (labour). Des synthèses ont été faites (Charreau et Nicou, 1971; Chopart *et al*, 1981; Nicou *et al*, 1993), Lal (1974, 1976).

313 Le rôle clé de la couche de sol recevant les racines

On a essayé de suivre cette approche pour mieux comprendre les relations entre les états du sol et le fonctionnement des cultures. On s'est plus particulièrement focalisé sur **l'étude du fonctionnement physique et hydrique des couches de sol superficielles**, car :

- la dynamique de l'eau dans le sol puis dans la plante est étroitement liée à l'état du sol de la zone racinaire, qui sert de lieu de stockage de l'eau et de croissance du capteur (racines),
- les modes de gestion du sol peuvent modifier le fonctionnement de ces couches, pour améliorer ou au contraire réduire l'alimentation hydrique du peuplement végétal.

Il paraît donc nécessaire de mieux connaître et donc de mesurer localement le fonctionnement hydrique du sol cultivé : infiltration de l'eau dans le sol, accès de la plante à l'eau stockée grâce à son système racinaire, utilisation par la plante de cette eau.

314 Deux points à étudier en priorité

Les points à étudier en priorité dans le milieu tropical sec concerné par cette synthèse découlent des constats présentés précédemment (ch. I par. 2 et 3).

a) L'infiltration de l'eau dans le sol.

Les relations purement physiques entre le sol et l'eau sont conceptuellement bien connues et permettent assez facilement des transpositions de modèles issus des milieux tempérés. Toutefois, la **capacité du sol cultivé à infiltrer l'eau de pluie** était encore assez mal appréhendée sur le terrain à cause de sa difficulté de mesure et de sa variabilité dans le temps (effets des techniques de culture) et dans l'espace (forte influence des variations locales des caractéristiques physiques du sol : texture et structure).

b) Le capteur racinaire

En revanche, **le capteur d'eau que constitue le système racinaire** des cultures d'Afrique de l'Ouest était encore très mal connu quand nous avons commencé à travailler dans ce milieu, il y a presque 30 ans. C'est ainsi que, dans leur ouvrage sur l'amélioration du profil cultural en Afrique de l'Ouest, Charreau et Nicou (1971) remarquent que : "Si un certain nombre d'observations ont été faites sur la morphologie des systèmes racinaires, **on ne trouve, par contre, dans la littérature, que fort peu de données quantitatives sur les poids, longueurs et surfaces racinaires**" (Charreau et Nicou, 1971). C'était encore plus vrai pour les relations entre le sol et les racines ainsi que les modalités d'interception racinaire de l'eau en conditions naturelles.

Or, dans les sols cultivés des zones sèches étudiées, les besoins en eau d'une culture sont proches de la pluviosité totale de l'année ; toute l'eau devrait donc pouvoir être utilisée pour une production optimale. Or, l'enracinement de la plante dimensionne le volume de sol utile, et c'est par lui que va transiter la plus grande partie de l'eau de pluie infiltrée. **L'interception racinaire de l'eau est donc le terme le plus important dans le bilan hydrique.**

Par ailleurs, **le système racinaire est aussi un indicateur biologique de l'état physique du sol** en général et de son comportement hydrique en particulier. Ainsi, Hénin (1969), notait "L'examen du **système racinaire** constitue la **clef de voûte** de la méthode de **diagnostic** basée sur l'observation du profil cultural." (Henin *et al.*, 1969)

32 DOMAINE ET LIMITES DE L'ETUDE

Pour délimiter le domaine scientifique de l'étude, on a tenté de tenir compte des facteurs limitants de l'amélioration durable de la production identifiés et des besoins de connaissances qui ont été brièvement présentés dans les cadres physique, humain et scientifique. Mais il n'est pas question d'aboutir dans cette synthèse à des conclusions pratiques relatives aux modes de gestion du sol. Il faudrait considérer d'autres volets (systèmes de culture et de production, contraintes socio-économiques, politiques, filières etc...) qui sortent du sujet.

On se limitera ici à l'étude de différents milieux cultivés, déjà modifiés par le travail du sol, le semis direct, ou par d'autres pratiques, en s'appliquant à caractériser la réalité du milieu physique dans lequel l'acteur va avoir à prendre des décisions et à mieux comprendre les mécanismes d'action de ces techniques.

Toutefois, des relations situées à la périphérie de l'objet principal de recherche seront parfois abordées. Il s'agit des liaisons entre l'itinéraire technique et l'état de la parcelle, et celles entre le fonctionnement du peuplement végétal et le rendement. L'itinéraire technique sera abordé comme source de variation de l'état physique et hydrique du sol et le rendement comme indicateur final et synthétique du fonctionnement plus ou moins bon du peuplement végétal.

4 SYNTHÈSE DE LA POSITION DU PROBLÈME

Une analyse rapide des milieux physiques, des systèmes de cultures et des facteurs humains de notre zone de travail a conduit à identifier les principaux facteurs limitants du rendement et du maintien de la fertilité du sol. Des insuffisances de connaissance ont été relevées.

Il est apparu que le comportement hydrodynamique du sol et l'alimentation hydrique de la culture jouent un rôle important et encore insuffisamment connu dans le fonctionnement du peuplement végétal et l'élaboration du rendement à l'échelle de la parcelle cultivée. Le bilan hydrique sous culture apparaît donc comme un outil indispensable pour comprendre le fonctionnement du peuplement végétal et la variabilité de la production en fonction des différents facteurs techniques, climatiques ou pédologiques.

Deux postes paraissent jouer un rôle majeur : **la capacité du sol à infiltrer l'eau et l'accès de la plante à l'eau, au travers de son système racinaire.** Or, dans ces deux postes, il y a un déficit de références de terrain et de méthodes adaptées à des diagnostics *in situ*.

Le domaine principal de cette synthèse se limite à l'étude des relations entre l'état physique et hydrique du sol et le fonctionnement de la parcelle cultivée. Mais la **finalité pratique de ce travail** est de contribuer, avec d'autres, à permettre un **choix plus raisonné et local par l'agriculteur des pratiques culturales**, tenant compte des caractéristiques actuelles de son champ et de sa demande. Cela correspond à une priorité de recherche dans les pays où l'on a travaillé et à un choix. C'est pourquoi, les **outils et méthodes seront choisis ou mis au point**, autant que possible, **pour leur portabilité et leur aptitude à être mis en oeuvre chez l'agriculteur**.

CHAPITRE II : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET METHODES SUPPORTS DE LA SYNTHÈSE

La diversité du milieu (sols, climat) est grande (chapitre I, paragraphe 1). On va montrer que les modes de gestion du sol mis en oeuvre dans les dispositifs expérimentaux conduisent à une grande variabilité des états du sol. Ceci devrait logiquement conduire à une grande variabilité dans le fonctionnement du profil cultural et des peuplements végétaux, qui devra être caractérisée. Pour ce faire, il faut donc mettre en oeuvre des outils de mesure, d'analyse des données et de modélisation, adaptés à la problématique, à l'échelle de mesure et aux contraintes locales.

La plupart des méthodes utilisées sont issues de la littérature et ne seront que brièvement rappelées. On a aussi été amené à adapter, voire à mettre au point des outils permettant de mieux répondre aux objectifs d'étude et aux contraintes et opportunités locales. Ces derniers seront décrits de façon plus détaillée dans la partie "résultats méthodologiques".

1 DISPOSITIFS D'ETUDE ET TRAITEMENTS

Les supports des études de terrain ont été nombreux. On ne présentera ici que ceux qui ont été les plus utilisés. Il s'agit principalement d'essais comparant différents modes de gestion du sol. On ne s'intéressera pas directement, ici, aux résultats en tant qu'éléments de création et de raisonnement d'itinéraires techniques, mais en tant que facteurs générateurs d'une variabilité d'états du sol susceptible de modifier le fonctionnement du sol et de la plante.

11 DISPOSITIFS D'ETUDE

111 Dispositifs en station expérimentale

La description des expérimentations est détaillée par ailleurs dans des articles figurant dans les publications formant le tome II de cette synthèse :

- Essai "travail du sol de longue durée" à Bambey (Sénégal), dans Chopart et Nicou, (1989).
- Essai "mulch-labour" à Bambey, dans Chopart *et al.* (1979).
- Essai "semis direct avec paillage (G13)" à Bouaké (Côte d'Ivoire), dans Chopart, (1989).
- Essais "techniques de gestion du sol et résistance à la sécheresse (R3S)" à Bouaké dans Vauclin et Chopart (1991).

- Essai "alimentation en eau du riz pluvial en fonction de la densité de peuplement" à Bouaké dans Chopart et Vauclin (1990).

112 Etudes en milieu réel

Les résultats des études en milieu réel utilisés dans le cadre de cette synthèse proviennent principalement du dispositif dit "point d'étude système" (PES), dans le terroir du village de Tchololévogo, dans le nord de la Côte d'Ivoire. Ce dispositif en milieu réel a été mis en place et conduit par H. Charpentier. Un document, comprenant une description du dispositif a été rédigé (Charpentier, 1995). Il fait la synthèse de 6 années de recherche et intègre les résultats de notre intervention dans ce dispositif.

12 LES ETATS DU SOL CREES

L'état physique et hydrique d'une parcelle à un moment donné est la résultante des caractéristiques et variables du milieu lui-même (sol, climat) et des itinéraires techniques pratiqués précédemment.

A l'intérieur des itinéraires techniques, les modes de gestion du sol (travail du sol, semis direct, paillis), offrent la possibilité de modifier notablement ces états. On sera ainsi amené à étudier le sol modifié par différents modes de gestion.

Ceux-ci sont en général décrits dans les documents auxquels on fait référence. On pourra s'y reporter pour des informations précises. On se contentera ici d'en définir les principaux traits. Il s'agira de regrouper dans une même dénomination des techniques différentes mais créant, en conditions normales de réalisation, des états assez proches pour autoriser cette typologie.

121 Caractéristiques générales des modes de gestion du sol étudiés.

Dans le domaine des modes de gestion du sol, il est courant d'appeler "semis direct" tout processus de **mise en place d'une culture sans travail du sol**, ou au moins sans travail du sol "significatif". On l'a nous même utilisé dans ce sens dans nos articles. Toutefois, ce terme de semis direct peut prêter à confusion car il peut aussi signifier : semis en même temps (dans la même opération) que le travail du sol, et il est effectivement utilisé dans ce sens en France. Il serait donc plus juste de parler de semis ou de culture sans travail du sol. Malgré le manque de précision du

terme “semis direct”, on a conservé celui-ci car il a été employé dans nos travaux passés et un changement de terme aurait compliqué la lecture couplée de la synthèse et des publications. Le terme semis direct s’appliquera toujours ici à un semis sans travail du sol autre qu’un très léger grattage manuel.

La technique de **semis direct** dite “**traditionnelle**” étudiée est la plus représentative possible de la pratique paysanne locale, c’est à dire le plus souvent, un grattage superficiel sur une profondeur de l’ordre de 5 cm, sans couverture du sol avec différents instruments dont le plus courant est la daba (photo n°1). On a aussi étudié l’itinéraire technique consistant en un **semis direct** dans un sol sur lequel on a appliqué, sous forme de **paillis**, les résidus de récolte des cultures précédentes (Photos n° 3 et 4). Dans ce cas, la maîtrise des mauvaises herbes se fait par des traitements herbicides de post-levée, en remplacement de l’herbicide de pré-levée.

Dans les milieux étudiés, le travail du sol est principalement réalisé en **traction animale** (Sénégal) ou avec des **petits tracteurs** (Côte d’Ivoire). Dans ce dernier pays, la motorisation conventionnelle est plus rarement utilisée. La technique qui a été la plus étudiée est le **labour à la charrue à soc** (de 10 à 12 pouces) travaillant à une profondeur de 10 à 15 cm en traction bovine (photo n° 2), et de 15 à 25 cm en traction motorisée. Le travail est généralement réalisé en conditions de sol humide. Après le travail principal, il est recommandé d’intervenir le moins possible, les pluies se chargeant, dans ces sols peu structurés, de réduire les mottes.

On a aussi participé en Côte d’Ivoire à des études sur des systèmes de culture **combinant le semis direct avec une couverture du sol nettement plus complète**. Cette protection du sol est obtenue grâce à l’utilisation d’une **plante de couverture** cultivée en même temps que la culture principale, ou de façon plus ou moins décalée. Ces plantes de couverture ont un rôle complexe, dépassant largement le simple effet de protection du sol. Dans ces systèmes, on a parfois recours à un travail du sol profond, en “ouverture”, avant de passer à un mode de gestion en semis direct.

Afin de faciliter l’identification des différents modes de gestion cités, sans avoir à les décrire en détail à chaque fois, il est proposé, dans le tableau n° 1, des identificateurs simples.

Tableau n°1. Principales caractéristiques des modes de gestion du sol des dispositifs d'étude.
Modes de travail du sol : SD : Semis Direct, L: Labour, TS : Travail Superficiel, TT : Travail Traditionnel, TR : Travail Trad. en Relief (buttage ou billonnage), TL : Travail Localisé sur la ligne de semis.
Gestion des pailles et plantes de couverture P: Paillage des résidus de récolte, enf.: pailles enfouies par un travail du sol, exp. pailles exportées. C plante de Couverture.
Energie A : culture manuelle (Agriculteur), B: traction Bovine, M : traction Motorisée,
Outils : S charrue à Socs (10 pouces en traction animale, 12 pouces en traction motorisée), D charrue ou pulvérisateur à Disques, H instrument traditionnel (Houe, daba)
Etat hydrique du sol au moment du travail principal : Hum : sol humide, sec : sol sec, var. : variés

Définition des modes de gestion du sol	Travail du sol principal				Résidus de récolte (t/ha)	Plantes de couver ture
	Energie	Outil	Profond. (cm)	sol : état hydrique		
SDT (Semis Direct Traditionnel)					exp.	non
SDP1 (SD + Paillage du sol réaliste)					P (4-6)	non
SDP2 (SD + Paillage complet du sol)					P (12)	non
SDC1 (SD + plante de Couverture)					P var.	oui
SDC2 (SDC1 + labour 1ère année)	B M	S	20-25	hum	P var.	oui
TT (Travail superficiel Traditionnel)	A	H	5-8	var.	exp.	non
TR (Travail en Relief (buttes, billons)	A	H	5 à 10	hum	exp.	non
TSD (Travail Superficiel aux Disques)	M	D	10 -15	hum	exp.	non
TLP (travail localisé avec paillage)	M	S	8-10	hum	P (4-6)	non
LB1 (LB sur sol sec avant la culture)	B	S	14-18	sec	exp.	non
LB2 (LB sur sol hum. avant la culture)	B	S	18-20	hum	exp.	non
LB3 (LB post-récolte, pailles enfouies)	B	S	18-20	hum.	enf. (4-6)	non
LMS (LM avant culture, charr. à socs)	M	S	25-30	hum	enf. (4-6)	non
LMD (id.LMS mais charrue à disques)	M	D	20-25	hum	enf. (4-6)	non

122 Relations entre modes de gestion du sol et état du sol dans les milieux étudiés

Dans les sols présentés ci-dessus (par. 111), dont les caractéristiques physiques naturelles sont plutôt défavorables, et par rapport aux pratiques traditionnelles des paysans (SDT), un travail du sol profond (LB ou LM) permet principalement :

- d'accroître la porosité du sol (Nicou, 1974; Chopart, 1989a),
- de réduire sa résistance à la pénétration (Nicou, 1975).



Photo n° 1 outil traditionnel de travail du sol manuel : la daba (SDT)

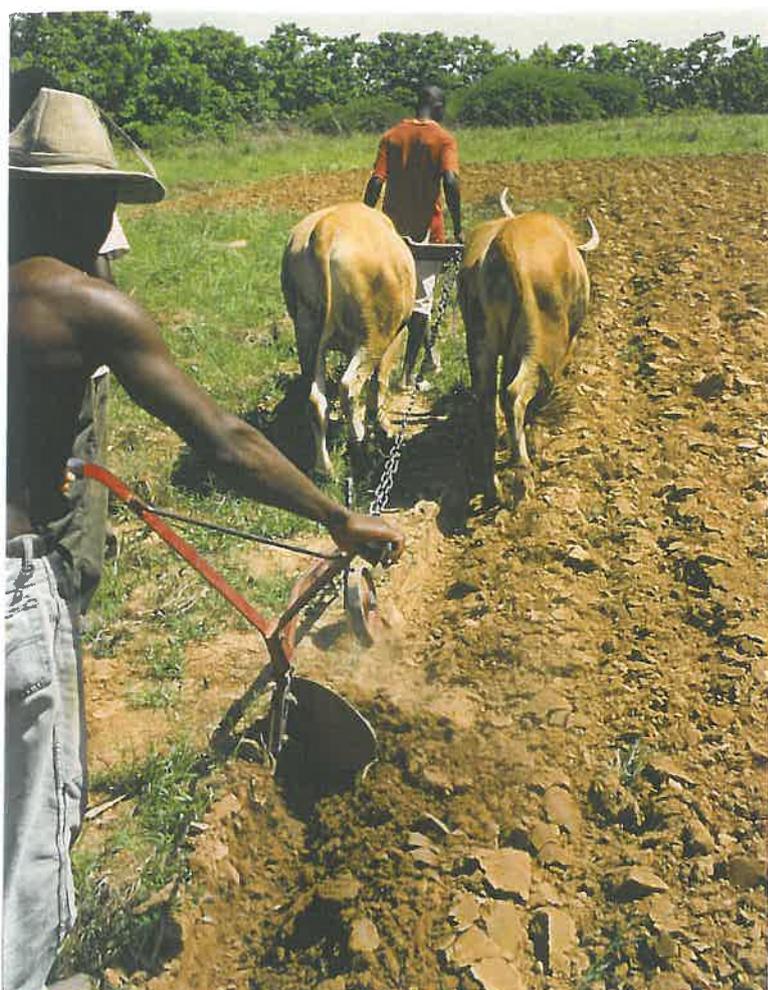


Photo n° 2 Labour à la charrue à soc en traction bovine (charrue 12 pouces) et état de surface du sol consécutif à ce passage (LB2)

- d'enfourir les mauvaises herbes.

Le labour (L), quand il est pratiqué après la récolte en début de saison sèche, crée un état du sol motteux et rapidement sec permettant de limiter les pertes d'eau par évaporation sous la couche travaillée et ainsi de contribuer à un report des réserves hydriques du sol résiduelles jusqu'au début de la culture suivante (Chopart *et al.*, 1979). Le labour permet aussi de limiter la croissance des mauvaises herbes en début de cycle et donc la concurrence de celles-ci pour l'eau. Par ailleurs, quand il est réalisé à la charrue à soc, il n'entraîne pas, sauf exception, l'apparition de semelle de labour, du fait de la nature sableuse ou sablo-argileuse de la couche labourée. Il faut néanmoins être attentif à ses conditions de réalisation (humidité du sol, réglage de l'outil).

Les techniques de semis direct (SD) sont plus variées mais les études publiées relatives à leurs effets sur l'état du sol sont moins nombreuses. On observe une amélioration de l'activité biologique susceptible de participer à la structuration du sol quand les conditions de milieu (sol, climat) s'y prêtent et que la couverture du sol est suffisante. Ces conditions peuvent être remplies en Côte d'Ivoire (Charpentier, 1995), mais sont beaucoup plus rares au Sénégal (Chopart *et al.*, 1979). **Les effets des modes de gestion du sol sur l'état du profil cultural sont donc divers.** On a quand même tenté d'en synthétiser, dans le tableau n°2, les principaux, par rapport à la technique du semis direct traditionnel local (SDT). Ces appréciations synthétiques sont tirées, aussi objectivement que possible, d'une expérience personnelle, et de nombreux travaux en particulier de Tourte, Charreau, Nicou, Séguy etc... (Charreau et Nicou, 1971; Charpentier 1995; Nicou *et al.*, 1993). Il est clair qu'une telle généralisation peut être mise en défaut localement.

Tableau n° 2. Principaux effets, par rapport au semis direct traditionnel (SDT), de quelques modes de gestion du sol sur l'état du profil cultural (en surface et dans les 20 premiers cm).

Le nombre de + ou de - (de 0 à 3) indique l'intensité de l'effet favorable ou défavorable du mode de gestion du sol par rapport à la pratique du "témoin" (SDT). On considère ici les effets directs et cumulatifs, dans les conditions de milieu physique des sites où ils ont été étudiés. Les définitions des modes de gestion du sol sont données dans le tableau n° 1.

Modes de gestion	Etat du Sol (0-20 cm)					Etat de Surface	
	densité apparente	cohésion	semelle de labour	matière organique	température	croûte	herbes
SDP1	=	=	=	+	+	+	-
SDP2	+	=	=	++	+++	++	+
SDC1	+	+	+	+++	+++	++	++
SDC2	++	++	+	+++	+++	++	++
TT	+	+	=	=	=	=	+
TR	+	+	=	=	=	=	++
TSD	+	+	--	-	=	-	+
TLP	+	+	=	+	+	+	-
LB1	+++	+++	=	-	=	=	++
LB2	+++	+++	=	-	=	-	++
LB3	+++	+++	=	+	=	-	++
LMS	+++	+++	-	+	=	-	++
LMD	++	++	--	+	=	--	++

123 Principaux états "type" du sol rencontrés au moment du semis

Les différents modes de gestion du sol, appliqués dans les conditions pédo-climatiques du milieu d'études aboutissent à des états du sol variés selon les caractéristiques du sol, son état initial, l'état des outils, le climat etc... On a quand même tenté de définir dans les tableaux n° 3 et 4, **un état "type" pour chaque mode de gestion**, dans le but de décrire les "traitements" dans les expérimentations. Il correspond à l'état au semis ou à la levée, après la dernière intervention culturale.



Photo n° 3 Etat de surface du sol et culture d'arachide en semis direct avec paillage de tiges de mil (SDP1) à Bambey (1979).



Photo n° 4 Etat de surface du sol et culture de cotonnier en semis direct avec paillage de tiges de maïs (SDP1) à Bouaké (1984).

Tableau n° 3 Etats de surface “types” résultant des différents modes de gestion du sol pratiqués, rencontrés au moment du semis et de la levée. 0 signifie absence et la croix présence de l’objet constitutif de l’état de surface; le nombre de croix (de 0 à 3) indique l’intensité de la présence.

Modes de gestion	Mottes au semis	Paillage du sol	Plante de couverture	Herbes avant semis	Micro relief après semis	Turricules de vers de terre
SDT	0	0	0	+++	0	+
SDP1	0	+	0	++	0	+
SDP2	0	++	0	++	0	++
SDC1	0	+	++	0	0	++
SDC2	0	+	++	0	0	++
TT	0	0	0	++	0	+
TR	+	0	0	+	++	0
TSD	+	0	0	+++	0	0
TLP	0	+	0	++	0	+
LB1	+	0	0	++	0	0
LB2	++	0	0	+	0	0
LB3	++	0	0	+	0	
LMS	+++	0	0	0	+	0
LMD	++	0	0	+	0	0

On a effectué une partition verticale du profil en 4 horizons : la couche située entre 0 et 8 à 10 cm concernée par le travail superficiel, celle située entre 8 et 20 cm, concernée par le labour en traction bovine et par le labour à la charrue à disques, celle concernée par le labour motorisé à la charrue à socs, entre 18 et 25 ou 30 cm. Le dernier horizon est celui situé en dessous de 25 ou 30 cm, jamais travaillé dans les situations ici considérées. Il n’a pas été rencontré, dans les milieux étudiés, de croûtes et de fissures. Ces états du sol ne sont donc pas intégrés dans les tableaux.

On est conscient du caractère simpliste, réducteur et parfois arbitraire d’une telle classification des modes de gestion du sol, de leurs effets sur le profil cultural et des états du sol au semis qui en résultent. Ainsi la “qualité” de tel ou tel travail peut être fortement fluctuante en fonction des conditions de réalisation et un même mode de gestion peut conduire à des états du sol variés voire contrastés. Cette typologie ne prétend donc nullement être exhaustive, et n’a **aucune vocation à donner une image figée des modes de gestion pratiqués**. Ceci ne remplace donc pas des études

fines et locales des relations entre techniques culturales et état du sol, notamment par des méthodes de diagnostic de terrain (Manichon, 1982). Ces études servent à la fois au diagnostic de la qualité du travail et au pronostic de l'évolution future du profil, notamment pour décider des interventions à faire sur le sol. Elles servent aussi à mieux définir les modes de gestion étudiés. Mais ces études fines des relations entre le mode de gestion du sol et le profil cultural sortent du cadre de ce mémoire.

124 Définition des traitements expérimentaux

Les **traitements** seront donc principalement définis par les **états types du sol** décrits dans les tableaux n° 3 et 4, consécutifs aux modes de gestion du sol décrits dans le tableau n° 1. Les études ont porté sur les relations entre cet état de la parcelle et les fonctionnements hydriques du sol et de la culture, puis sa production. D'après ces choix et en toute rigueur, on devrait donc discuter des effets, sur la culture C, d'un état du sol consécutif à un passage d'un outil X1 suivi d'un autre X2, réalisés dans des conditions initiales de sol Y, qui ont conduit aux états du sol Z1, Z2, Z3, dans les différentes couches du profil cultural. Une telle description, outre qu'elle n'a pas toujours pu être réalisée de façon détaillée et homogène, aurait singulièrement alourdi le texte. De plus, l'état décrit à un moment donné est en fait très évolutif, surtout dans les milieux étudiés (sols à faible stabilité structurale, forte agressivité des pluies).

On se contentera de présenter les modes de gestion du sol en clair et (ou) avec leur abréviation, laissant au lecteur le soin de se référer aux états de surface type correspondant à partir des tableaux n° 3 et 4). Il sera parfois fait état d'effet du mode de gestion sur la culture (racines ou parties aériennes). Il s'agira alors d'un raccourci sémantique, dans un souci de simplification, mais constituant, en toute rigueur, un abus de langage.

Tableau n° 4. Etats structuraux et hydriques "types" du sol résultant des différents modes de gestion du sol pratiqués, rencontrés au semis (levée).

0 : absence et + : présence de l'objet constitutif de l'état du sol.

Hori- zons (cm)	Modes de gestion	Porosité	Cohésion sol		Eléments structuraux discernables		Risques de tasse- ment	Matière organique libre
			sec	hum	>1cm	<1 cm		
0-8 à 0-10	SDT	0	++	+	0	0	0	+
	SDP	+	++	+	0	0	0	++
	SDP2	++	++	+	0	+	0	+++
	SDC1	++	++	+	0	++	0	+++
	SDC2	+++	+	0	0	+++	0	+++
	TT	++	+	0	0	0	0	+
	TR	++	+	0	0	+	++	+
	TSD	++	+	0	0	+	+++	+
	TLP	+	++	0	0	0	0	++
	LB1	++	+	0	0	+	0	+
	LB2	+++	+	0	0	++	0	+
	LB3	+++	+	0	0	++	0	+++
	LMS	+++	+	0	++	++	+	++
LMD	++	+	0	+	++	+	+	
8-10 à 18-20	SDT,TT, SDP1, TLP,TSD,TR	+	+++	+	0	+	0	+
	SDP2, SDC1	+	+++	+	0	+	0	+
	SDC2	++	++	+	+	+	0	+
	LB1	++	++	0	0	+	+	0
	LB2	++	++	0	+	++	+	0
	LB3	++	++	0	+	++	+	+++
	LMS	+++	+	0	++	++	0	++
	LMD	++	++	0	+	++	+++	++
18-20 à 25-30	SDC1, SDC2	+	++	+	0	0	0	+
	LMS	++	+	+	++	++	+	+
25-30	Autres	+	+++	+	0	0	0	0
>30	tous modes	+	+++	+	0	0	0	0

2 RAPPEL DES METHODES "CLASSIQUES" MISES EN OEUVRE

21 ANALYSE DE LA VARIABILITE SPATIALE DES DISPOSITIFS D'ETUDE.

Il faut connaître les caractéristiques initiales du sol quand on veut mettre en place un dispositif d'étude de terrain. Cela sert à éviter les situations extrêmes ou particulières et à faciliter l'interprétation des résultats. On effectue généralement des mesures d'indicateurs pertinents et spatialisés permettant un repérage des hétérogénéités, une cartographie plus ou moins fine du site et des analyses statistiques courantes (variance, covariance).

Mais l'analyse statistique classique de la situation de départ, puis des effets de modes de gestion du sol sur le sol ou (et) sur les rendements, généralement mesurés sur de petites surfaces élémentaires suppose l'indépendance des variables mesurées (Snedecor et Cochran, 1967). Il faut donc que la surface des parcelles élémentaires permette le respect de cette condition. Compte tenu des fortes interactions entre les propriétés du sol et le rendement et des dimensions parcellaires réduites en expérimentation, cette hypothèse de base apparaît bien souvent problématique (Bresler *et al.*, 1981). Elle n'est pourtant que très rarement testée dans les dispositifs agronomiques. Il a donc semblé utile, à la mise en place de dispositifs "lourds" visant à étudier les relations milieu-plante, de procéder à une analyse géostatistique de la variabilité naturelle de ces milieux.

Ainsi, à la mise en place d'une expérimentation intitulée "mode de gestion du sol et résistance à la sécheresse", effectuée dans le cadre d'un projet de recherche s'inscrivant dans un réseau sur la résistance à la sécheresse (R3S) et financé par la Communauté Européenne, on a commencé par réaliser une culture homogène de maïs puis de cotonnier. Le dispositif est décrit par ailleurs (Vauclin et Chopart, 1991). La variabilité spatiale du terrain a été évaluée par des mesures de quelques caractéristiques physiques du sol. Les variables suivantes ont été mesurées sur 20 sites répartis sur l'ensemble d'une parcelle d'environ 8000 m², d'apparence homogène et ayant été cultivée l'année précédente suivant un même système de culture : la teneur en éléments grossiers (0-90 cm) la densité apparente (0-20 cm) et le stock d'eau au moment de l'implantation de tubes d'accès pour humidimètre neutronique (0-90cm). Les rendements de cotonnier obtenus sur 108 parcelles de 62 m² ont également été mesurés. Toutes ces mesures ont été réalisées en repérant leur position exacte dans l'espace permettant une **étude géostatistique de la variabilité du milieu**. La description détaillée de la méthode appliquée pour ce dispositif figure par ailleurs (Vauclin et Chopart, 1991). L'analyse des fonctions de semi-variogramme correspondantes (équation n° 4 de Vauclin et Chopart, 1991) a permis en particulier d'établir la distance moyenne pour laquelle les observations restent auto-corrélées (équation n°7 de Vauclin et Chopart, 1991).

22 EVALUATION DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE

221 Mesures tensio-neutroniques du drainage et de l'ETR .

L'évaluation *in situ* des termes du bilan hydrique est réalisée avec un humidimètre à neutrons et des tubes d'accès pour l'évaluation de l'humidité du sol. La relation entre les résultats donnés par l'humidimètre (nombre de coups/seconde correspondant à des neutrons ralentis par la collision avec un noyau d'hydrogène) et la teneur en eau du sol a été établie *in situ* par étalonnage avec des mesures gravimétriques. L'évaluation du sens des flux hydriques est effectuée grâce à des tensiomètres à mercure. Ils sont situés en particulier à la cote de calcul du drainage. Pour évaluer celui-ci, par la loi de Darcy généralisée aux milieux insaturés, il faut également connaître la conductivité hydraulique du sol à la cote de drainage ($K_{(z)}$)

$$q = - K_{(z)} \text{grad. } H \quad (1)$$

où H est la charge hydraulique mesurée à différentes cotes avec les tensiomètres.

La conductivité hydraulique à la cote de drainage est évaluée préalablement par la méthode dite du drainage interne (Vachaud *et al.*, 1977). Les termes du bilan hydrique sont alors calculés suivant des procédures et équations suffisamment classiques maintenant pour ne pas être rappelées ici.

222 Evaluation de l'aptitude du sol au ruissellement par simulation de pluies

Un simulateur de pluie est un appareil apportant au sol de l'eau à une intensité contrôlée, constante et homogène à l'intérieur de l'espace à mesurer. L'appareil utilisé permet de mesurer l'infiltration sur une surface de 1 m² (Asseline et Valentin, 1978; Casenave, 1982). Cet appareil a été utilisé (photo n° 5) pour comparer les effets de différents modes de gestion du sol sur le risque de ruissellement et la sensibilité du sol à l'encroûtement (Casta *et al.*, 1989).

23 ETUDE DES SYSTEMES RACINAIRES

Il a été montré (ch.I par.22) la nécessité de prendre en considération les racines, dans le cadre d'études sur les relations entre l'état du sol et l'alimentation de la plante. Le moyen le plus simple pour cela consiste en des observations de racines, suivant la méthode dite du profil cultural (Hénin *et al.*, 1969). On dégage un profil de sol perpendiculairement au travail du sol principal et aux lignes de semis. Le but est de mettre en évidence les caractéristiques des diverses couches constituant le

terrain, d'examiner la façon dont elles sont exploitées par les racines et d'évaluer dans la mesure du possible les causes de leur différenciation. C'est un très bon outil de diagnostic rapide de l'état du sol et des effets d'une intervention culturale, mais il ne produit pas de données quantitatives pour comparer ou suivre des situations dans l'espace et dans le temps. Des travaux ultérieurs ont permis d'obtenir, à partir de profils culturaux, des informations plus facilement objectives (Manichon, 1982). Mais la méthode est alors plus complexe sans fournir, pour les racines, de données faciles à exploiter pour des analyses quantitatives.

231 Prélèvements d'échantillons de sol contenant des racines

Pour avoir des données **quantitatives**, la méthode de **référence** utilisée est celle dite des "**monolithes**." On prélève, par tranches horizontales, tout le sol situé en dessous d'une placette cultivée (Lee, 1927 ; Chopart, 1980). La surface de terrain prélevée doit alors être un multiple de la surface occupée par un pied. Cette méthode permet une bonne évaluation de la biomasse racinaire totale et la comparaison, par exemple, avec la biomasse de la partie aérienne située au-dessus. Elle permet une évaluation des racines profondes et du **front racinaire**, mais elle entraîne le prélèvement de volumes très importants de sol (photo n° 6). Elle devient donc vite très **lourde**, et perturbe fortement le milieu.

On peut aussi prélever des échantillons de sol de la parcelle à étudier en ayant recours, pour cela, à des techniques de **carottages avec des cylindres** (Maertens, 1964; Bonzon et Picard, 1969). N'ayant qu'une faible partie du sol, il faut faire en sorte que ces petits échantillons soient aussi représentatifs que possible du système sol-racine. Ceci n'est pas facile, à cause de l'hétérogénéité du sol et de diverses sources de variabilité de la distribution des racines (gradients verticaux et horizontaux, variabilité spatiale, croissance).

232 Caractérisation des racines contenues dans les échantillons de sol

Une fois les échantillons prélevés, il faut en extraire les racines. Pour cela, on procède à un tamisage du sol sous jet d'eau, avec un tamis à mailles de 1 millimètre. Une fois les racines extraites et séparées des débris organiques, on mesure leurs caractéristiques physiques.

a) Poids des racines

Grandeur la plus simple à mesurer, elle peut être obtenue après un séchage rapide de la surface des racines sur papier filtre. Si celles-ci sont restées à leur turgescence maximale; on peut ainsi estimer leur volume, leur densité étant proche de 1 (Chopart, 1977). Mais la mesure la plus



Photo n° 5 Méthodes classiques : Le mini-simulateur de pluies de L'ORSTOM sur le dispositif "semis direct avec paillage" (Casta *et al*, 1989, TII B6)



Photo n° 6 Méthodes "classiques" : étude du système racinaire du mil par la méthode des monolithes, évaluation du front racinaire à 180 cm (Chopart, 1983, TII C2).

couramment utilisée est le poids sec (24h à 60 °C). Le poids sec est utile pour évaluer la biomasse racinaire et donc la biomasse totale du peuplement et les rapports massiques entre les parties aériennes et souterraines. Il est aussi utile pour établir les bilans organiques et minéraux dans le sol.

b) Densité de longueur des racines

Maertens *et al.* (1974) ont montré que le **poids sec des racines**, jusqu'alors le seul paramètre racinaire usuellement mesuré, **n'est pas le plus pertinent pour étudier le système racinaire en tant que capteur d'eau et d'éléments nutritifs**. La **variable pertinente** est plutôt la **densité de longueur racinaire** (longueur totale de racines par unité de volume de sol). La méthode proposée par Newman (1966) et modifiée par Tennant (1975) a alors été testée et retenue pour l'évaluation de la longueur racinaire (Chopart, 1980, 1983).

c) Estimation des distances moyennes entre les racines

A partir de la densité de longueur racinaire (DLR), on peut inférer le concept de "distance moyenne entre les racines"(EMR), suivant différents modèles donnant des résultats voisins:

$$EMR = \alpha (DLR^{0.5})^{-1} \quad (2)$$

$$\text{Avec } \alpha = (4/\pi)^{0.5} \quad (\text{Newman, 1969})$$

$$\alpha = 1 \quad (\text{Maertens } et al. 1974)$$

Il s'agit là, bien sûr, d'une représentation très simplifiée de la réalité qui suppose que les racines sont équidistantes dans le volume considéré.

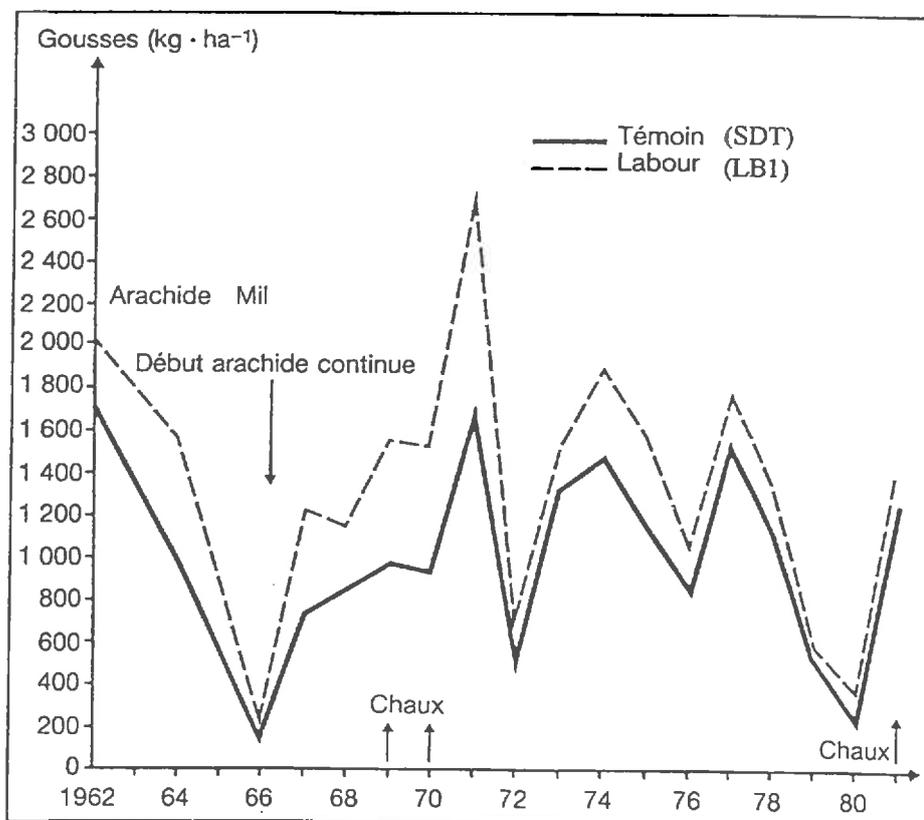


Figure n° 2 : Variabilité inter-annuelle du rendement d'arachide (gousses kg/ha) et de l'effet du travail du sol à Bambey (Sénégal) dans une expérimentation de longue durée (entre 1962 et 1981). Extrait de Chopart et Nicou (1989), [voir tome II, publication A1], Chopart et *al.*(1991a)

CHAPITRE III : RESULTATS

1 MISE EN EVIDENCE DES VARIABILITES DU MILIEU PHYSIQUE ET DES EFFETS DES MODES DE GESTION DU SOL, CONSEQUENCES.

En Afrique de l'Ouest, depuis longtemps, des travaux visent à la mise au point de méthodes de culture plus adaptées, plus rentables, plus reproductibles pour contribuer à une agriculture durable. Toutefois, peu de dispositifs testant réellement la durabilité des modes de gestion des sols existent à l'exception notable de ceux au Burkina Faso (Bado *et al.*, 1997), en Côte d'Ivoire (non publié) et au Sénégal. Nous avons personnellement conduit celui du Sénégal pendant 10 ans et analysé les résultats après 20 ans de culture continue (Chopart et Nicou, 1989). Ce dispositif servira à illustrer la problématique de la variabilité inter-annuelle des rendements et de l'effet des modes de gestion du sol.

11 OBSERVATIONS DE VARIABILITES INTER-ANNUELLES ET AU COURS D'UNE MEME ANNEE DU FONCTIONNEMENT DU PEUPEMENT VEGETAL.

111 Essai de longue durée à Bambey, Sénégal.

Au cours des **20 années de mesures**, on observe (Chopart et Nicou, 1989) une **très grande variabilité inter-annuelle** du rendement d'arachide, allant de 200 kg ha⁻¹ environ à plus de 2500 kg ha⁻¹, **sans tendance marquée dans le temps** (figure n° 2). Deux années consécutives (1971, 1972) ont même conduit à des rendements parmi les plus contrastés. Cette variabilité rend délicate, en les masquant, la mise en évidence d'éventuelles tendances de variation dans le temps de la production et des effets des facteurs étudiés (ici le labour en sec de type LB1) par rapport au semis direct (SDT).

112 Série d'essais à Bouaké, Côte d'Ivoire en 1989

A Bouaké (Côte d'Ivoire) en 1989, sur un même site, on a mis en place 4 expérimentations comprenant deux traitements identiques : le semis direct (SDP1, tableau n° 5) et le labour de type LMS (Chopart 1990,b,c, 1995c). Les seules différences notables dans les itinéraires techniques sont des dates de semis échelonnées sur un mois, et des irrigations d'appoint sur l'un des essais.

Tableau n° 5. Rendements d'une même variété de maïs (CD) sur des expérimentations voisines, dans un même sol, à Bouaké en 1989. (d'après Chopart, 1990b)

Traitements		Site n°1 pluvial strict	Site n°2 pluvial strict	Site n°3 pluvial strict	Site n°4 + irrigation
Date de semis		16-03	22-03	04-04	04-04
Pluies reçues pendant le cycle (mm)		297	333	464	547
Rendement tiges + feuilles (kg/ha)	0 labour (SDP1) labour (LMS)	1160 2030	1780 2480	2650 3830	4100 5000
Rendement grains (kg/ha)	0 labour (SDP) labour (LMS)	400 1090	1140 1650	780 200	3400 3850

Non seulement les rendements du maïs sont très variables, de 400 à 3400 kg ha⁻¹ sur le semis direct (STD (tableau n° 5)), mais l'influence du travail du sol (LMS) sur la production passe d'un effet nettement positif à un effet nettement négatif. Par ailleurs, si l'on excepte le dispositif irrigué, c'est sur celui ayant eu le plus d'eau que les rendements sont les plus faibles en conditions de culture avec engrais et labour.

12 CONSEQUENCES : BESOINS DE RECHERCHE ET D'OUTILS ADAPTES

La recherche de l'origine de ces variabilités de la production et de l'effet des modes de gestion du sol est évidemment un préalable à toute interprétation valable de l'effet des facteurs étudiés. Ce type de variabilité est communément attribué, dans la zone concernée, à la variabilité des pluies. Malheureusement, dans les deux cas cités, il n'y a pas de liaison claire entre la hauteur des pluies pendant la culture et le rendement (R) ou l'effet des pratiques étudiées (Chopart et Nicou, 1989; Chopart, 1990b). Ainsi au Sénégal, on a obtenu la quasi-absence de corrélation suivante :

$$R(\text{SDT}) = 0.92 \text{ P1} + 453 \quad R^2 = 0.08 \quad n = 18 \quad (3)$$

$$R(\text{LB1}) = 0.91 \text{ P1} + 482 \quad R^2 = 0.15 \quad n = 18 \quad (4)$$

où R(SDT) et R(LB1) sont les rendements (kg/ha) en semis direct (SDT) et labour (LB1) respectivement, P1 la pluviosité totale (mm) pendant la culture, n le nombre d'observations.

Les deux exemples cités confirment et illustrent l'insuffisance des liaisons directes entre les techniques culturales et le rendement d'une culture pour expliquer et prévoir ce dernier. Celui du Sénégal a attiré notre attention sur la nécessité de bien considérer le climat pour comprendre les

relations entre milieu physique, modes de gestion du sol et production sans se limiter à la variable pluie.

2 CONTRIBUTIONS D'ORDRE METHODOLOGIQUE

21 TEST DE LA VARIABILITE SPATIALE DES DISPOSITIFS AGRONOMIQUES

Les deux exemples présentés montrent l'intérêt de bien cerner la variabilité du milieu, source possible de variabilité de la croissance des plantes. Or, il apparaît une grande variabilité spatiale des propriétés physico-chimiques des sols, même à l'échelle de la parcelle agronomique (Vauclin, 1983). Cela est confirmé par des travaux réalisés sur nos dispositifs en particulier sur celui intitulé "modes de gestion du sol et résistance à la sécheresse sur lequel à été conduit une étude de la variabilité du milieu à la mise en place du dispositif. Si la densité apparente est relativement peu fluctuante en surface, avec un CV de 5 %, le taux d'éléments grossiers (CV 30%) et les stocks d'eau (CV 14%) sont nettements plus variables (Vauclin et Chopart, 1991a, voir tome II, publication A.2). Les rendements en grains (CV 24%) et pailles (CV 28%) sont également très fluctuants. Cette variabilité du milieu physique paraît être encore plus spectaculaire dans les champs des agriculteurs en Afrique de l'Ouest, à cause du caractère encore peu anthropisé des sols cultivés, de la présence de termitières, de l'histoire très variable de parcelles voisines et de taille réduite, etc... (Chopart, 1997)

Or, l'étude des effets des modes de gestion du sol sur le rendement et de la variabilité spatio-temporelle de ceux-ci, suppose une homogénéité du terrain au début de celle-ci ou au moins une connaissance des variations spatiales des caractéristiques du sol et (ou) de la production.

On a ainsi montré, dans deux dispositifs de Côte d'Ivoire : "modes de gestion du sol et résistance à la sécheresse" à Bouaké et à Ferkessedougou (Vauclin et Chopart, 1991a), que les variables étudiées (taux d'éléments grossiers, densité apparente, stocks d'eau, rendements) ne sont pas aléatoirement distribuées (figure n° 3 pour le dispositif de Bouaké). Elles présentent une structure spatiale pouvant être caractérisée par une échelle intégrale (voir eq. (7), tome II, publication A.2), dépendant de la fonction semi- variogramme (Lumley et Panofsky, 1964). Sa valeur, de l'ordre de 9 mètres dans l'expérimentation de Bouaké, a conduit à proposer une distance entre deux centres de parcelles voisines de 15 mètres pour assurer l'indépendance spatiale des observations, condition nécessaire à la mise en oeuvre des méthodes classiques de traitement statistique (Vauclin et Chopart, 1991a). A Bouaké, la surface parcellaire initialement retenue (187 m²) était ainsi limitée,

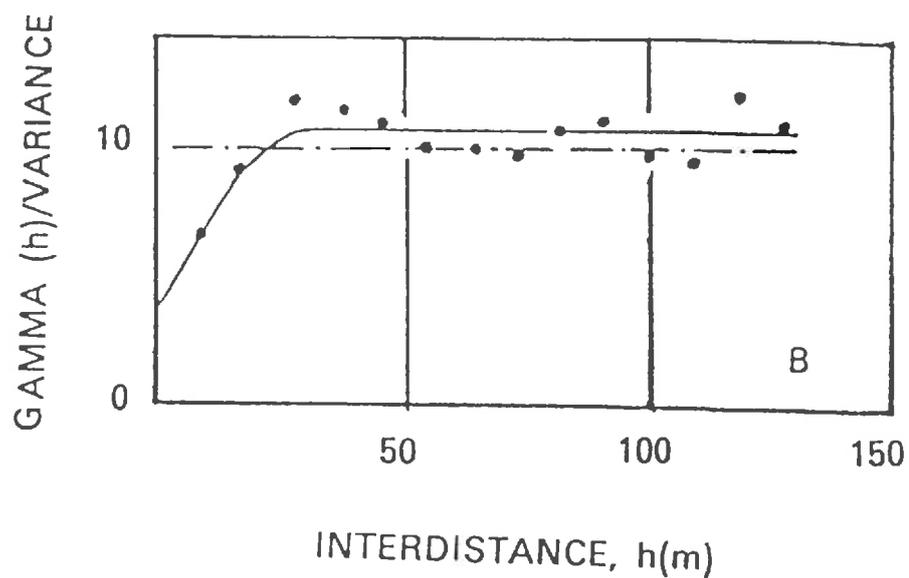
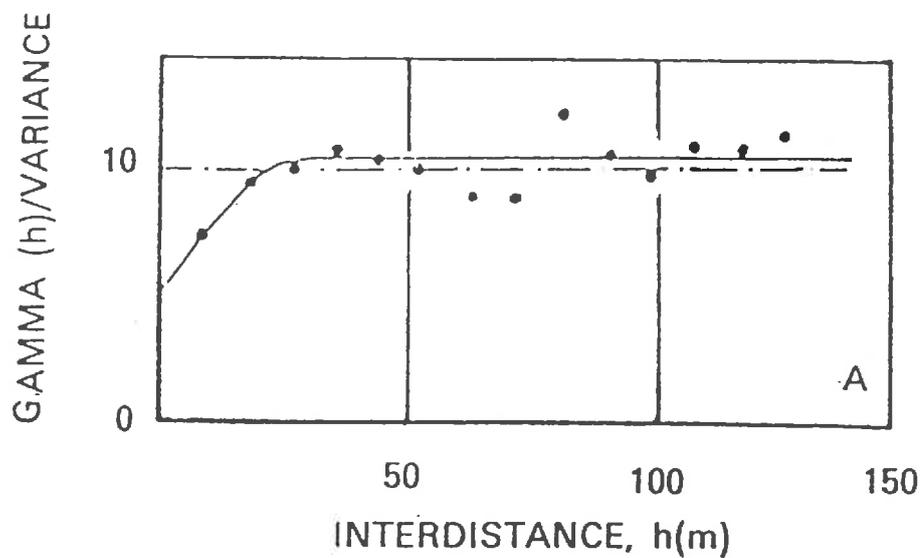


Figure n° 3 : Etude de la variabilité spatiale du milieu d'un dispositif d'études agronomiques en première année de culture homogène de cotonnier à Bouaké (Côte d'Ivoire). Semi-variogrammes expérimentaux (●) et théoriques (—) du rendement de cotonnier en tiges + feuilles (A) et graines (B). Extrait de Vauclin et Chopart (1991), [voir tome II, publication A.2].

mais acceptable. En revanche, dans l'autre expérimentation testée, à Ferkessedougou, les résultats (voir tome II publication A.2) ont conduit à modifier la taille et la forme des parcelles d'essai.

A Bouaké, le dispositif où l'étude géostatistique a été effectuée est l'un des 4 essais sur lesquels il a été mis en évidence une grande variabilité de rendement et d'effet du travail du sol. Il y a eu un effet spectaculairement négatif du labour en 1989 (tableau n° 5). L'étude de la variabilité spatiale, faite en 1988 (Vauclin et Chopart, 1991a) a permis de vérifier que cet effet négatif n'est, en aucune façon, imputable à une variabilité naturelle du milieu. Les autres dispositifs situés à proximité n'ont pas bénéficié de cette étude géostatistique, mais ils ont tous des surfaces de parcelles élémentaires supérieures ou égales à celles du dispositif étudié en détail. On peut admettre que la structure spatiale des autres dispositifs voisins est la même, et donc que la condition d'indépendance des variables mesurées entre deux parcelles est également respectée. Les faibles différences observées sur le site n° 4 en culture avec irrigation d'appoint (tableau n° 5) ne peuvent donc être attribuées à une auto-corrélation entre les résultats.

Les résultats de ces études géostatistiques ont donc permis de dimensionner les parcelles d'étude de telle façon que les variables mesurées soient **indépendantes** les unes des autres, rendant plus fondée leur comparaison. On ne doit pas se contenter, en agronomie, du seul cadre statistique "Fischerien" pour mener des recherches dans des dispositifs expérimentaux. Les méthodes de l'analyse objective **complètent les méthodes classiques, sans toutefois les remplacer.**

22 EVALUATION DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE

221 Informatisation du traitement des données relatives au bilan hydrique parcellaire

La mesure directe *in situ* des termes **du bilan hydrique** par la méthode tensio-neutronique est **indispensable pour comparer** les effets des modes de gestion du sol, de l'eau ou pour comparer des variétés. Elle sert aussi à estimer la réserve en eau utile du sol (Marcesse, 1967), les besoins en eau maximum (ETM) dont on tire les coefficients culturaux (Kc) (Dancette, 1983). Ces mesures de terrain servent également à **alimenter les modèles de bilan hydrique, à les tester et les valider** (Chopart et Vauclin, 1990, voir tome II, publication B1).

Mais l'évaluation des termes du bilan hydrique par cette méthode met en jeu un nombre important de données, et devient rapidement assez **lourde**. Par ailleurs, la grande variabilité spatiale des paramètres mesurés ou utilisés, et l'imprécision qui entache les mesures, conduisent à multiplier les

sites d'observation. Il faut également procéder rapidement à des vérifications sur la qualité des mesures. Le principal problème auquel on est alors confronté, pour ce genre d'étude, est **le volume des données à gérer dans des délais courts** et le caractère répétitif des opérations.

C'est pour lever, en partie, ces contraintes qu'un outil informatique a été élaboré (Chopart et Siband, 1988, voir tome II, publication B.2). Ce **logiciel**, appelé PROBE (Programmes de Bilan de l'Eau) :

- **sauvegarde les informations** recueillies sur le terrain (relevés neutroniques et tensiométriques, de pluie, d'ETP, conductivité hydraulique à la cote de drainage),
- **effectue le calcul des termes du bilan hydrique** en appliquant les lois de conservation de la masse et de Darcy généralisée aux milieux insaturés,
- **restitue et met en forme les variables de sortie** du bilan en faisant éventuellement un traitement simple des données.

Cet outil, permettant un traitement rapide des mesures, facilite grandement l'analyse des résultats. Il a servi à analyser les données de plusieurs études rapportées dans différentes publications (Chopart et Vauclin 1990; Chopart, 1989a, voir tome II B.3); Péné *et al.*, 1997, voir tome II D.1) et s'inscrivant dans des projets de recherche de Sciences et Techniques du Développement de l'UE (Chopart, 1995c).

222 Adaptation d'un modèle de simulation du bilan hydrique à l'échelle de la parcelle cultivée

Le suivi *in situ* des composantes du bilan hydrique par humidimétrie neutronique et tensiométrie (Vachaud, 1985) peut être considéré comme la référence pour évaluer les termes du bilan (la réflectométrie dans le domaine temporel peut maintenant remplacer l'humidimètre à neutrons pour l'évaluation de l'humidité). Cette méthode a effectivement été mise en oeuvre dans plusieurs expérimentations (Chopart *et al.*, 1979; Chopart et Koné 1985; Chopart et Vauclin, 1990). Mais elle est lourde et elle perturbe le milieu (caractérisation hydrodynamique du sol à la cote de drainage, mise en place des tubes de sondes et mesures répétées). La mise en oeuvre est souvent difficile, voire exclue. C'est le cas, en particulier, d'essais de longue durée comme l'expérimentation du Sénégal présentée au paragraphe 21 ou d'études conduites directement chez l'agriculteur.

Vers 1980, un **modèle de simulation du bilan hydrique** (Franquin et Forest, 1977) était proposé et utilisé. Il s'agit d'un modèle capacitif, au sens défini par Vauclin (1994), avec un seul réservoir. Ce modèle était bien **adapté à des études agroclimatiques** et à des études fréquentielles des bilans

hydriques régionaux. Mais des premiers tests avaient montré qu'il n'était pas toujours très fiable pour des études à l'échelle de la parcelle.

a) Adaptation et test du modèle PROBE, version déterministe.

Le modèle initial (Franquin et Forest, 1977) a été **adapté** et on a proposé une version (PROBE) dont la cible est, de façon spécifique, **la parcelle cultivée** (Chopart et Siband, 1988). Les principales modifications auxquelles il a été procédé portent sur :

- le passage d'un pas de temps pentadaire à un pas de **temps de calcul journalier**,
- l'introduction d'un terme **évaporation sol nu** pour le début de cycle, pour le calcul de l'ETR,
- le dimensionnement du réservoir par le **front racinaire** de la culture, ce qui a abouti à un réservoir d'eau utile racinaire (RU_r) variable en fonction du stade de végétation.

Le sol est donc assimilé à deux réservoirs, l'un est fixe (RU_z), dimensionné par la profondeur *z* du sol, servant au calcul du drainage; l'autre (RU_r) est dimensionné par le front racinaire (FR) du jour (*j*) concerné, et sert au calcul de l'ETR :

$$RU_z = RU_s \times z \quad (5)$$

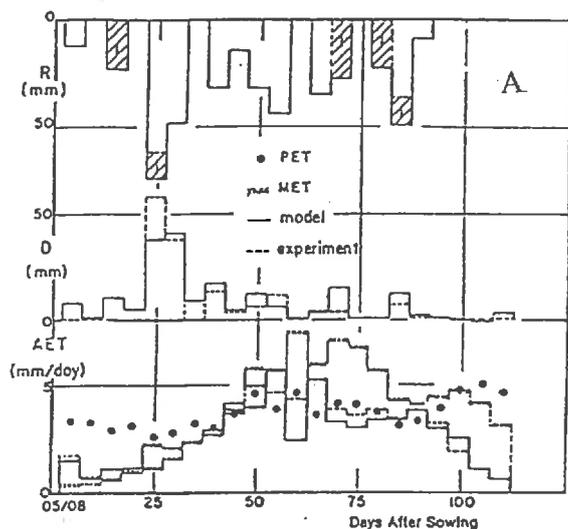
$$RU_r = RU_s \times FR(j) \quad (6)$$

avec : FR, *z* en cm, RU_s en cm.cm⁻¹, RU_z et RU_r en cm

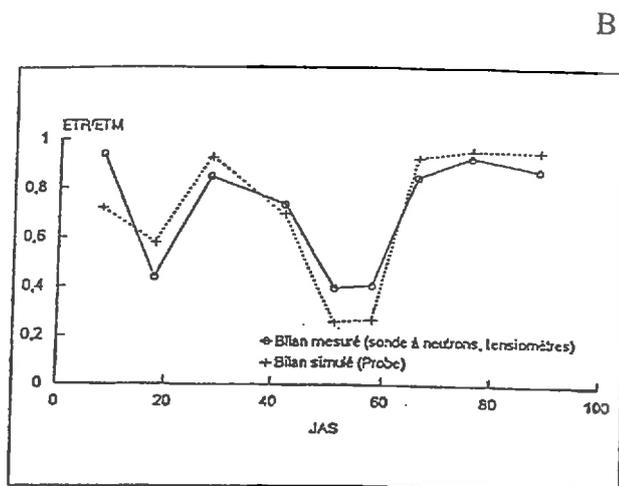
Cette version, prenant notamment en compte le front racinaire, est plus réaliste que le modèle original (Franquin et Forest, 1977), tout en restant très simple et robuste.

Les sorties du modèle, dont les détails et équations fonctionnelles sont donnés dans Chopart et Siband (1988, tome II B.2) et dans Chopart et Vauclin (1990, tome II B1), ont été confrontées aux résultats expérimentaux obtenus sur le terrain par la méthode de référence (variation des stocks d'eau à la sonde à neutrons et calculs des flux à la cote de drainage en utilisant la loi de Darcy) et par des mesures en lysimètres. Ces tests ont été réalisés à Bouaké, en culture de riz pluvial (Chopart et Vauclin, 1990, tome II B1) et de maïs (Chopart, 1990b). Ils ont montré (figure n°4) la **capacité du modèle à prévoir valablement l'ETR et le drainage**, à la fois sur des pas de temps de l'ordre de 5 jours et sur l'ensemble du cycle cultural.

Des tests de sensibilité du modèle (Chopart et Vauclin, 1990) ont également montré (figure n°5) **qu'il est possible de se limiter à une paramétrisation assez grossière de l'évaporation du sol, de la réserve maximale en eau utile et de la vitesse de croissance racinaire**, sans entraîner



Comparison between the measured and calculated drainage at 0.9-m depth (D) and actual evapotranspiration (AET) at Site BII-T1. The values of the maximum transpiration (MET) and potential transpiration (PET) are also given, along with the measured rainfall pattern (R) and irrigation events (hatched areas).



Evolution des taux de satisfaction des besoins en eau du mois à Bouaké en 1989. Comparaison des résultats du bilan hydrique par des mesures in situ avec une sonde à neutrons + tensiomètres et par le modèle de simulation PROBE.

Figure n° 4 : Test du modèle de simulation du bilan hydrique PROBE. Comparaisons avec des mesures tensio-neutroniques in situ sur riz pluvial (A, extrait de Chopart et Vauclin, (1990), tome II, B.1), et sur maïs (B, extrait de Chopart, (1995)).

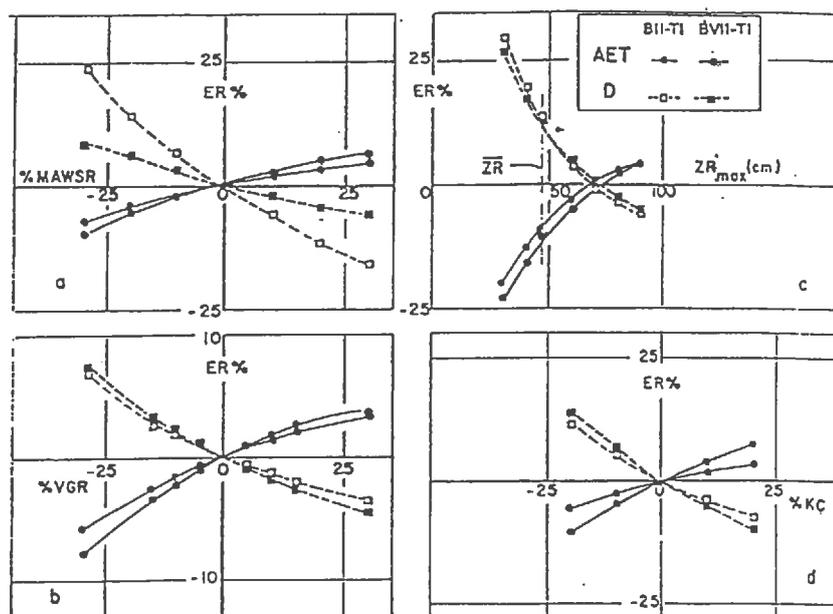


Figure n° 5 : Test de sensibilité du modèle PROBE à une variation des variables d'entrée dans les conditions de deux sites de l'expérimentation "alimentation en eau du riz pluvial". Erreur relative (ER%) sur le drainage (D) et l'ETR pour des variations de : (a) réserve maximale en eau utile (MAWSR), (b) vitesse de croissance racinaire (VGR), (c) front racinaire maximum (ZR_{max}), (d) coefficient culturaux (KC). Extrait de Chopart et Vauclin (1990), voir tome II, B.1.

d'erreurs grossières sur les variables de sorties. Il est toutefois indispensable de faire varier le réservoir (RU) en fonction de la profondeur du système racinaire, surtout en cas de déficit hydrique. Si on considère le réservoir d'eau utile comme fixe ($R_{Ur} = R_{Uz}$), les erreurs d'évaluation de l'ETR peuvent dépasser 100% sur des périodes de 5 jours (Chopart et Vauclin, 1990).

b) Version stochastique du modèle PROBE.

Les résultats précédents issus du modèle PROBE original, procèdent d'une approche "déterministe", ce qui est le cas de la plupart des modèles de bilan hydrique. On utilise des variables d'entrée "moyennes" à l'échelle d'une unité de surface, pour obtenir des variables de sortie également "moyennes".

Or, on l'a vu (par.1), la variabilité spatiale des caractéristiques du sol est la règle. La grande variabilité des résultats des mesures des termes du bilan hydrique observée dans nos expérimentations le confirme (Chopart et Vauclin,1990). **Un défaut majeur des modèles déterministes** (c'est à dire de la plupart des modèles courants) appliqués à l'agronomie est donc de **donner une image faussement précise des variables de sortie**, puisqu'elles ne sont pas accompagnées des estimateurs classiques de précision, comme, par exemple, l'intervalle de confiance du résultat.

Pour y remédier, une version stochastique du modèle PROBE a été développée dans le cadre d'une collaboration avec le LTHER (Marchand, 1988) et appliquée au dispositif en riz pluvial de Bouaké déjà utilisé pour la version déterministe. On a mis en oeuvre cet outil pour faire des comparaisons entre les résultats des deux versions et pour étudier l'influence de la variabilité spatiale du terrain sur les variables de sortie du modèle (Vauclin et Chopart, 1991b). Dans cette étude, on a considéré que la réserve maximale en eau utile (RUs) était variable spatialement. Le modèle PROBE déterministe présenté ci-dessus a été couplé à une distribution de RUs, décrite statistiquement. Les équations stochastiques qui en résultent ont été résolues par la méthode de Monte-Carlo (Marchand, 1988).

Le dispositif a été discrétisé en 400 placettes de surface égale et à chaque placette a été attribuée une valeur de RUs. Les valeurs de RUs sont générées par la méthode des bandes tournantes (Mantoglou et Wilson, 1982), modifiée par Munoz-Pardo *et al.* (1990). On considère que la RUs est une fonction aléatoire : distribution normale (moyenne = 0.058 cm cm^{-1} , écart type 0.022 cm cm^{-1}), variogramme isotrope, de type exponentiel (portée 9.5 m). Ces caractéristiques de RUs sont tirées de mesures sur le lieu même pour la valeur moyenne (Chopart et Vauclin,1990) ou sur un terrain très voisin pour la distribution spatiale (Vauclin et Chopart,1991a). On a simulé le bilan

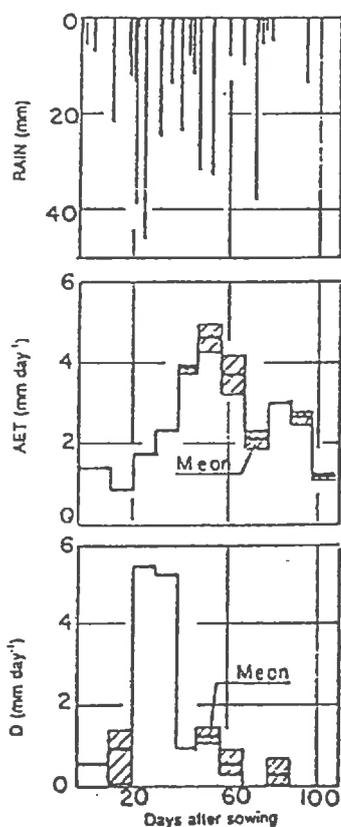


Figure n° 6 Test de la version stochastique du modèle PROBE. Evolution dans le temps de la valeur moyenne de l'évapotranspiration et du drainage. 50% des valeurs se trouvent dans les surfaces hachurées. Extrait de Vauclin et Chopart (1991b), voir tome II, B.4.

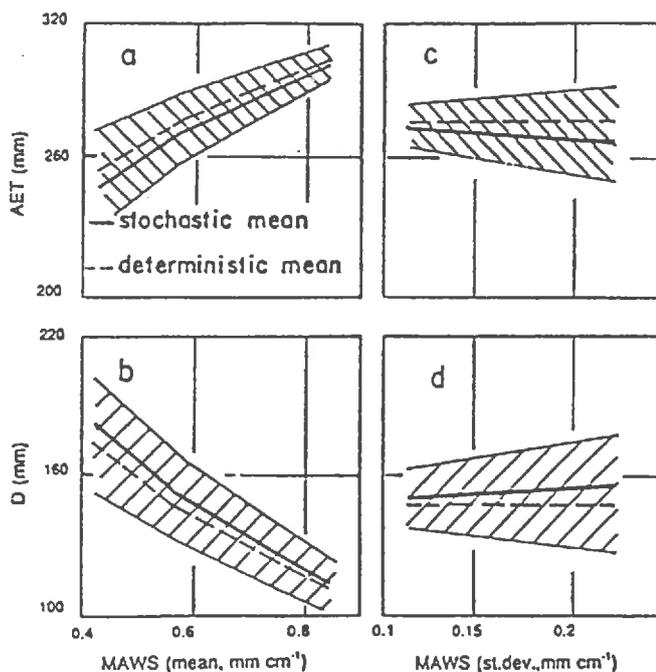


Figure n° 7. Test du modèle PROBE. Comparaison, pour différentes valeurs de réserve maximale en eau utile, des moyennes déterministes et stochastiques d'ETR (a) et de drainage (b), et des écarts-types correspondants (c et d). Pour la modélisation stochastique, 50% des valeurs se trouvent à l'intérieur des surfaces hachurées. Extrait de Vauclin et Chopart (1991b), voir tome II, B.4.

hydrique dans chacune des placettes, avec un premier tirage aléatoire des RUs. Puis on a recommencé 200 fois l'opération (tirage aléatoire de RUs sur les 400 placettes).

Les résultats obtenus (Vauclin et Chopart, 1991b, voir tome II, B.4) en faisant ainsi varier RUs montrent principalement que :

- les distributions des variables de sortie, c'est à dire l'ETR et le drainage (D) sont dissymétriques malgré la distribution normale de RUs,
- la structure spatiale (décrite par les caractéristiques du variogramme) des variables de sortie est comparable à celle de la variable d'entrée (RUs),
- l'intervalle de confiance de la moyenne stochastique des variables de sortie (ETR et drainage), lié à la variabilité de RUs dépend d'autres variables comme la pluie et l'ETP (figure n° 6),
- la prise en compte d'une variabilité de RUs a donc une incidence plus ou moins grande sur l'estimation de l'ETR et du drainage, au cours du cycle cultural (figure n° 6),
- sur l'ensemble du cycle, et pour des conditions pédo-climatiques décrites dans le test du modèle déterministe (Chopart et Vauclin, 1990), les valeurs moyennes des variables d'ETR et de drainage, obtenues par les deux versions déterministe et stochastique sont peu différentes (figure n° 7)
- les moyennes stochastiques d'ETR et de D sont néanmoins, respectivement légèrement inférieures et supérieures aux moyennes déterministes, quelle que soit la valeur moyenne de RUs (figure n° 7),
- **si la valeur moyenne de RUs est bien estimée, on peut donc obtenir une bonne prédiction des termes du bilan hydrique par la version déterministe, la plus simple. Mais une estimation erronée associée à des conditions fluctuantes d'alimentation hydrique peut conduire à des erreurs inacceptables dans l'estimation des termes du bilan hydrique.**

En considérant la réserve en eau utile comme un processus stochastique bi-dimensionnel, il en résulte donc des **variables de sorties du bilan hydrique exprimées en termes probabilistes** donc susceptibles de conduire in fine à une analyse de risques. Ceci est beaucoup **plus réaliste que dans une approche déterministe** où la parcelle est considérée implicitement comme un milieu parfaitement homogène, justifiant une variable de sortie unique, entachée d'aucune variabilité ou incertitude.

c) Exemples d'utilisation

PROBE a fait l'objet d'une utilisation systématique dans nos différentes expérimentations de terrain pour caractériser les conditions d'alimentation hydrique de la culture. Il a été utilisé en station expérimentale (Marchand, 1988, Chopart, 1990b (voir tome II, D2),c ; Chopart *et al.*, 1991 ;

Chopart, 1995d ; Sérana, 1997), mais aussi en milieu paysan où l'utilisation de l'humidimétrie neutronique et de la tensiométrie est problématique voire impossible (Chopart, 1990a).

Les différents tests effectués sur **PROBE** montrent la **capacité de ce modèle, pourtant très simple, à prédire les termes du bilan hydrique dans les conditions expérimentales**, à condition d'y introduire des variables d'entrée réalistes. Il est donc **opérationnel pour des études agronomiques en station mais aussi chez l'agriculteur**.

Sa **simplicité lui permet en outre d'être utilisé dans une version stochastique** pour étudier l'effet de la variabilité des caractéristiques du sol sur le bilan hydrique. En effet, l'utilisation d'une approche stochastique avec des modèles mécanistes plus complexes et donc plus gourmands en données et paramètres, aboutit rapidement à une très grande lourdeur de calcul.

Toutefois, ce type de modèle à réservoir présente le **défaut de ne pas tenir compte des remontées capillaires**. De plus, il ne fait pas la part, dans les excès d'eau (débordement du réservoir), de ce qui est évacué par drainage et de ce qui ruisselle. Il faut pour cela coupler en amont du modèle de base, un module qui partitionne la pluie entre infiltration et ruissellement.

223 Evaluation des caractéristiques hydrodynamiques de la surface du sol

a) Justification de la mesure

De nombreux résultats en milieux tempérés et surtout en milieu tropical à pluies plus agressives, ont montré **qu'un des effets majeurs des modes de travail ou de non travail du sol est de modifier les caractéristiques hydrodynamiques des couches superficielles du sol** et donc l'aptitude de ce dernier à l'infiltration, au ruissellement puis à l'érosion hydrique. Une mauvaise infiltrabilité peut avoir des conséquences à la fois sur le sol lui-même (érosion) et sur la culture (l'eau ruisselée est perdue pour la culture). Or, il y a une grande diversité d'effets favorables ou défavorables des modes de gestion du sol sur le ruissellement et l'érosion en zone tropicale (Chopart, 1984, tome II, B5).

La mesure de cette caractéristique du sol et sa modélisation sont donc nécessaires pour **juger des effets des modes de gestion du sol** (favorables ou néfastes) et pour faire la part, dans les modèles de bilan hydrique, de **l'eau de pluie qui va entrer dans le sol et de celle qui va ruisseler**.

b) Revue des méthodes disponibles

Les techniques classiques de mesure de l'infiltration ou du ruissellement ne nous paraissent **pas adaptées** à l'évaluation de la perméabilité ou de l'infiltrabilité du sol **au niveau de la parcelle cultivée**. Dans les milieux étudiés, la perméabilité mesurée par la méthode de Hénin (Hénin *et al.*, 1969) est de l'ordre de $1 \cdot 10^{-2} \text{ m h}^{-1}$ dans des sols sablo-argileux du sud du Sénégal (Chauvel, 1966, cité par Charreau et Nicou, 1971). Mais il s'agit là de mesures sur de très petits échantillons de sol remanié. Les mesures *in situ* (Muntz ou Porchet) donnent des valeurs nettement plus élevées, d'environ 0.1 à 0.2 m h^{-1} dans les mêmes sols du Sénégal où la perméabilité au laboratoire est dix fois plus faible. Dans des sols sableux de la partie centrale du Sénégal, les valeurs mesurées au champ sont même comprises entre 0.2 et 0.5 m h^{-1} . Si ces valeurs étaient réalistes, il n'y aurait aucun risque de ruissellement dans ces sols, ce qui n'est clairement pas le cas. En fait, les méthodes classiques au laboratoire (perméabilité de Hénin ou *in situ* (double anneau, Muntz ou autres méthodes de ce type) mesurent l'infiltration à charge **positive**, ce qui ne peut donner de résultats représentatifs du comportement réel du sol soumis à une pluie.

Pour étudier l'infiltrabilité du sol, on peut **mesurer directement le ruissellement** dans des dispositifs dits "**cases d'érosion**", qui permettent d'évaluer les termes de l'équation proposée par Wischmeier et Smith (1960) pour estimer les pertes en terre d'un sol. Connaissant les apports d'eau, on peut donc facilement évaluer l'infiltration à l'intérieur du dispositif. Les résultats obtenus (Pieri, 1967), de 5 à $7 \cdot 10^{-3} \text{ m h}^{-1}$ sont très inférieurs à ceux obtenus *in situ* par les méthodes décrites précédemment. Ces dernières valeurs obtenues dans des cases d'érosion nous paraissent donner des résultats nettement plus représentatifs du comportement du sol sous pluie. Ces dispositifs ont été utilisés avec succès pour des études de mécanismes, en particulier en pédologie pour étudier la dynamique actuelle des sols sous l'action du climat (Roose, 1981). Mais la technique mise en oeuvre est **très lourde et perturbe le milieu** (cases de quelques dizaines à quelques centaines de m^2 , complètement isolées, avec en aval, un dispositif de partition, de recueil, et de mesure des volumes importants d'eau et de sol). Elle ne peut donc pas être facilement mise en oeuvre dans des études agronomiques.

Le **mini-simulateur de pluie**, décrit au paragraphe du chapitre "méthodes", a été utilisé en Côte d'Ivoire et a donné des résultats intéressants (Casta *et al.* 1989, tome II, B6). Son **coût et sa lourdeur d'utilisation** ne peuvent toutefois le faire considérer comme un outil simple et portable.

c) Tests d'un infiltromètre à disques (système TRIMS)

Malgré l'intérêt du simulateur de pluie, on restait à la recherche d'une technique fiable mais plus légère. Vers 1988, une nouvelle méthode est apparue (Perroux et White, 1988; Smetten et Clothier,

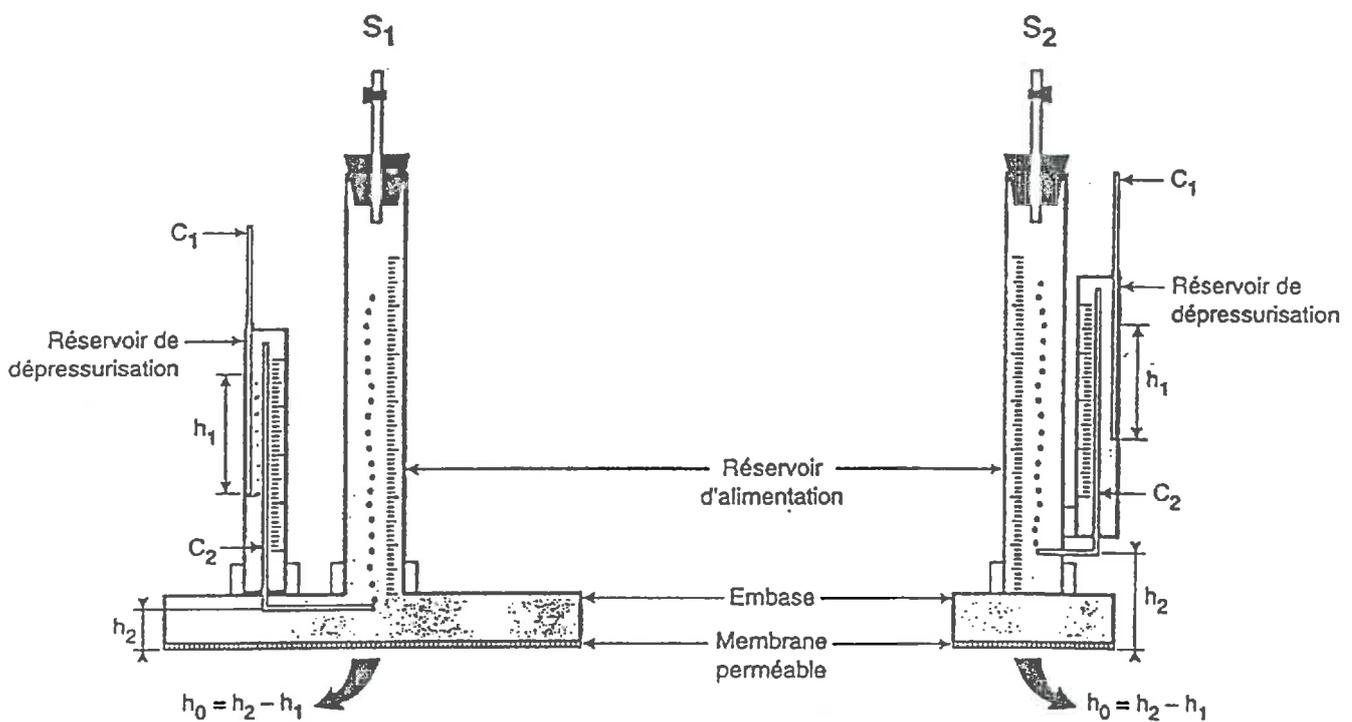


Figure n° 8. Schéma des infiltromètres à disques utilisés pour la détermination *in situ* des caractéristiques hydrodynamiques du sol. Diamètre des embases : 250 mm. (S1), et 80 mm. (S2). Extrait de Vauclin et Chopart (1992), Tome II, B7.

1989; Vauclin *et al.*, 1991). Il s'agit d'un **outil tout à fait nouveau** appelé TRIMS (Triple Ring Infiltrometer at Multiple Suctions).

i) Test en station expérimentale

Grâce à une collaboration avec le LTHE de Grenoble qui a contribué à la mise au point de l'appareil, on a pu le mettre en oeuvre dès le début de l'année 1991, sur le terrain en Côte d'Ivoire (Vauclin et Chopart, 1992, tome II, B.7). C'était **l'un des premiers tests de l'appareil en milieu tropical** (photos n° 7 et 8).

La méthode permet d'évaluer *in situ*, en conditions de pression voisine de zéro mais légèrement **négative** par rapport à la pression atmosphérique, les deux paramètres phénoménologiques de l'infiltrabilité du sol : la **conductivité hydraulique** ($K_{(h_0)}$) et la **sorptivité** ($S_{(h_0)}$). A partir de ces résultats, on peut estimer un paramètre hydrologique important : le **temps de submersion** (t_p) à partir duquel la surface du sol atteint la saturation, sous une pluie d'intensité constante (Boulier *et al.*, 1987; Holgarth *et al.* 1991). Le schéma de l'appareil est présenté dans la figure n° 8. Sa description ainsi que celle de la technique de mesure sur le terrain et de la méthode d'analyse des essais figurent dans un article méthodologique (Vauclin et Chopart, 1992) donné au tome II du document. On y trouve en particulier les expressions pour calculer la conductivité hydraulique : Eq.(6a) p. 264, la sorptivité : Eq.(10) p.264, le temps de submersion : Eq.(17) p.268, la dimension de pores hydrauliquement fonctionnels : Eq.(15), p.266.

Les résultats TRIMS ont été **validés** localement (Vauclin et Chopart, 1992) en les **comparant** à ceux :

- observés sur le même sol sous une **pluie réelle** survenue à la fin des mesures de terrain,
- d'un sol voisin, cultivé suivant les mêmes itinéraires techniques, et soumis à un apport d'eau par le simulateur **de pluie** (Casta *et al.*, 1989, tome II, B6).
- obtenus avec une méthode d'infiltration à charge positive.

Ces comparaisons amènent aux conclusions suivantes (Vauclin et Chopart, 1992) :

- les conductivités hydrauliques moyennes mesurées par le TRIMS avec une pression $h_0 = -0.02$ m et les intensités limites de ruissellement obtenues avec le simulateur de pluies (Casta *et al.*, 1989 tome II, B6) sont identiques (0.007 m h^{-1}),
- le temps de submersion (t_p) déterminé à l'aide des paramètres $K_{(h_0)}$ et $S_{(h_0)}$ et celui réellement observé sur le terrain (au cours d'une pluie réelle survenue à la fin de l'expérimentation) sont également similaires,

- l'utilisation, parallèlement à la technique du TRIMS, d'une méthode proche de la méthode Muntz, avec infiltration à travers des anneaux (de diamètre sensiblement égaux à ceux des embases TRIMS) alimentés en eau de façon à maintenir une lame d'eau sensiblement constante de 0.2 m, donne des valeurs de conductivité supérieures à 0.1 m h^{-1} , non conformes au comportement réel du sol.

Les résultats vont donc dans le même sens que ceux obtenus sur le même terrain avec le simulateur de pluie. Toutefois, le TRIMS est plus léger et surtout il permet d'évaluer les deux paramètres phénoménologiques de l'infiltration (conductivité hydraulique et sorptivité). Ceci permet, en particulier, de contribuer à une modélisation du ruissellement à travers le concept de temps de submersion c'est à dire la durée pendant laquelle un sol va pouvoir infiltrer complètement une pluie si l'on connaît l'intensité de celle-ci et l'humidité initiale.

ii) Etudes en milieu réel

Cette première étude a permis de vérifier l'intérêt de cette technique dans les conditions tropicales, à la fois sur le plan scientifique et sur le plan de son aptitude à travailler localement en milieu paysan. Cette méthode a par la suite effectivement été mise en oeuvre dans des dispositifs en milieu paysan ivoirien (Chopart, 1995a) pour tester l'effet de différents modes de gestion du sol sur l'infiltrabilité, dans le cadre d'un projet visant à la mise au point de nouveaux systèmes de culture. Dans ces études finalisées en milieu réel, on a privilégié les résultats ayant un intérêt pratique plus immédiatement perceptible par les agronomes spécialisés dans la gestion des systèmes de culture et les décideurs. A cet égard, le temps de submersion paraît tout à fait intéressant. Pour le rendre encore plus attrayant, il est appelé ici temps d'apparition du ruissellement (ou temps de ruissellement), considérant en simplifiant que, dans le cadre d'une approche hydrologique hortonienne, dès qu'un sol non endigué est saturé en surface, il y a apparition de ruissellement au cours d'une pluie. Ce concept, plus synthétique que ceux de conductivité et de sorptivité est plus facilement appropriable par les spécialistes des systèmes de culture et les acteurs du développement.

iii) Évaluation de l'outil

L'évaluation de la capacité du sol à infiltrer l'eau et la modélisation de celle-ci, paraissent primordiales dans des études sur les systèmes de culture. Même si le temps d'apparition du ruissellement est une valeur calculée, elle est en effet apte à donner des éléments d'appréciation utiles aux acteurs (agriculteurs et agents du développement). La méthode TRIMS est par ailleurs très intéressante pour sa portabilité, on peut la mettre en oeuvre en dehors de la station de recherche et elle permet d'accéder à des variables pertinentes pour l'agronome.



Photos n° 7 et 8 : Infiltromètres (TRIMS) en cours d'utilisation. Photo n° 7 (haut) : embase de grand diamètre moyen et photo n° 8 : embase de diamètre moyen.

L'intérêt réel de la technique TRIMS doit néanmoins être tempéré par le caractère **local de la mesure** et par la nécessité de travailler avec au moins deux disques, ou avec un disque mais plusieurs succions successives (Ankeny *et al.*, 1991) ce qui alourdit la procédure. On bute donc ici, comme pour d'autres mesures ponctuelles sur le sol et la plante, sur les problèmes d'échantillonnage et de changement d'échelle pour cerner le domaine de validité des résultats.

La nécessité d'avoir suffisamment de répétitions pour avoir des valeurs représentatives (5 au moins), et le temps de mesure unitaire (environ une demi-heure dans le milieu d'étude) font que cette méthode, qui a pourtant permis une avancée technologique considérable, reste encore **lourde**. La recherche de nouveaux concepts et outils reste donc souhaitable. A cet égard, une nouvelle voie semble s'ouvrir avec la méthode dite de "BeerKan" (Haverkamp et Parlange, comm. personnelle).

23 CARACTERISTIQUES ET FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES RACINAIRES

231 Recherche de points représentatifs de prélèvement d'échantillons de racines.

Pour avoir une estimation des caractéristiques racinaires à partir de prélèvements d'échantillons de sol, la procédure la plus rigoureuse consiste à commencer par évaluer la structure du système racinaire en conditions moyennes permettant de procéder à un échantillonnage représentatif. Pour cela, on subdivise le sol en plusieurs niveaux de profondeur et de distance à la plante et on prélève séparément chacun des volumes dont l'ensemble contient la totalité du système racinaire. Ceci a été mis en oeuvre sur la **canne à sucre** en Côte d'Ivoire et a permis de proposer une procédure permettant d'évaluer le **poids total du système racinaire à partir de quelques carottages bien "ciblés"** (Chopart et Marion, 1994).

232 Estimation des diamètres racinaires

L'évaluation des **diamètres des racines** participe à la **caractérisation** des systèmes racinaires et permet des études comparatives. Le diamètre fait aussi partie des paramètres d'entrée de certains modèles pour décrire l'absorption de l'eau et des éléments minéraux, la racine étant considérée comme un puits. Mais les **racines ont des diamètres très variables**. Il faut donc, non seulement connaître le diamètre moyen d'un échantillon de racines ou d'un système racinaire, mais aussi avoir des informations sur sa variabilité. Or, cela est **très difficile à mesurer directement**.

On a proposé une méthode originale (Maertens et Chopart, 1977, voir tome II, C.1 pour les détails) d'évaluation **indirecte de la moyenne et de l'écart-type de la population des diamètres d'un échantillon de racines** à partir des mesures simples de :

- leur longueur L
- leur volume V (estimé par le poids à turgescence maximale)
- la surface (Sd) d'une coupe en plan des racines, mesurée par un appareil de mesure surfacique., d'où l'on tire facilement le diamètre moyen $d_m = Sd/L$.

On considère l'échantillon comme une population de N cylindres de longueur faible, égale à une unité. On a alors : $N = L$ (ou $N-1 = L$). A partir des ces trois variables, on retrouve, par simple calcul, la moyenne et l'écart-type (s) de la population des N diamètres. L'expression de la variance est :

$$S_{dr}^2 = \frac{4V_T/\Pi - Ld_m^2}{L} \quad (7)$$

L'établissement de cette relation est donnée dans Maertens et Chopart (1977), tome II, C.1. L'évaluation de la dispersion de la population des diamètres d'un échantillon de racines permet d'estimer le degré de ramification de cet échantillon. Il a été montré que cet indice de dispersion des diamètres varie avec la profondeur (Maertens et Chopart, 1977) et peut être modifié par les pratiques culturales (Chopart, 1983, tome II, B.2).

233 Estimation des fronts racinaires verticaux et horizontaux

a) Evaluation du front racinaire vertical

La connaissance de la position des racines les plus profondes à un moment donné présente un intérêt majeur pour dimensionner le réservoir de sol utile pour l'alimentation de la plante. Ce front racinaire peut être évalué en faisant des **prélèvements de tranches de sol jusqu'à disparition des racines**. Cette méthode peut être considérée comme la méthode de **référence**. Cependant sa mise en oeuvre est lourde, destructive et nécessite un important travail de terrassement (photo n° 6).

On a testé des méthodes plus légères et en particulier des méthodes de **placement d'un marqueur (élément radio-actif, rubidium ou molécule d'herbicide)** dans le sol à une profondeur connue. Le principe général est d'injecter dans le sol un produit absorbé par les racines, s'il y en a à proximité du point de localisation. En plaçant ce marqueur à différentes profondeurs dans le sol, à différents endroits de la parcelle, on peut, en repérant la présence ou l'absence du produit, savoir

jusqu'à quelle profondeur vont les racines. Le traceur le plus anciennement et le plus couramment utilisé est le ^{32}P (Racz *et al.* 1964). Mais l'utilisation dans une parcelle cultivée d'un produit radioactif est maintenant très réglementée. On a testé un marqueur non radioactif, le **rubidium** (Chopart, 1977). Le repérage de ce produit dans la plante s'est avéré délicat, à cause de sa grande "proximité" chimique avec le potassium, en quantité nettement plus importante dans les tissus végétaux. On a aussi utilisé un **herbicide (Métribuzine)** qui, absorbé par les racines, entraîne des symptômes foliaires (Chopart, 1995a; Chopart, 1996 tome II C.3). Les résultats des tests de comparaison avec la méthode de référence (tranches de sol) montrent des différences significatives entre les deux méthodes. Le front racinaire du maïs obtenu par la méthode du placement d'herbicide est plus profond que celui mesuré par la méthode de référence (Chopart, 1996, tome II C.3). Plusieurs explications peuvent être proposées (pollution, temps de réponse de la méthode indirecte...). Ces études ont conduit à **abandonner les méthodes utilisant le ^{32}P , le rubidium ou l'herbicide** au profit de l'observation *in situ* des évolutions de fronts racinaires verticaux.

b) Evaluation du front racinaire dans le sens horizontal

L'**extension horizontale** maximale du système racinaire d'une culture est très **mal connue** car, lorsque les plantes sont en population, les zones d'exploration des systèmes racinaires s'interpénètrent et leur étude par les méthodes classiques n'est pas possible. Il est certes moins important de connaître l'extension horizontale du système racinaire que son extension verticale. Cependant, elle peut donner des **indications sur la plasticité de l'espèce étudiée et sa capacité à supporter des stress environnementaux** (en particulier hydrique) dans un milieu sol non uniforme. Une estimation de cette caractéristique racinaire a été réalisée pour le **mil**, culture très répandue au Sénégal et très bien adaptée à un milieu pauvre et sec, dans le but de mieux comprendre cette adaptation. La méthode du marqueur radio-actif (^{32}P) a été retenue. Le produit a été placé à un endroit de la parcelle, près de la surface, et la radio-activité des plantes avoisinantes, a été mesurée après quelques jours (Chopart, 1983, tome II B.2). La méthode du placement d'un marqueur s'est avérée ici plus opérationnelle que pour des études sur le front vertical : le fait de localiser le produit radio-actif près de la surface évite les risques d'erreurs liés aux incertitudes de profondeur.

234 Adaptation de la méthode de cartographie des racines pour estimer leur longueur.

Les principales méthodes utilisées reposent sur des prélèvements d'échantillons de sol ne prenant généralement en compte que les gradients verticaux suivant un intervalle le plus souvent régulier (10 cm). Ceci permet de comparer des traitements et de faire des suivis de dynamique, mais sans chercher véritablement à relier l'enracinement au fonctionnement des parties aériennes.

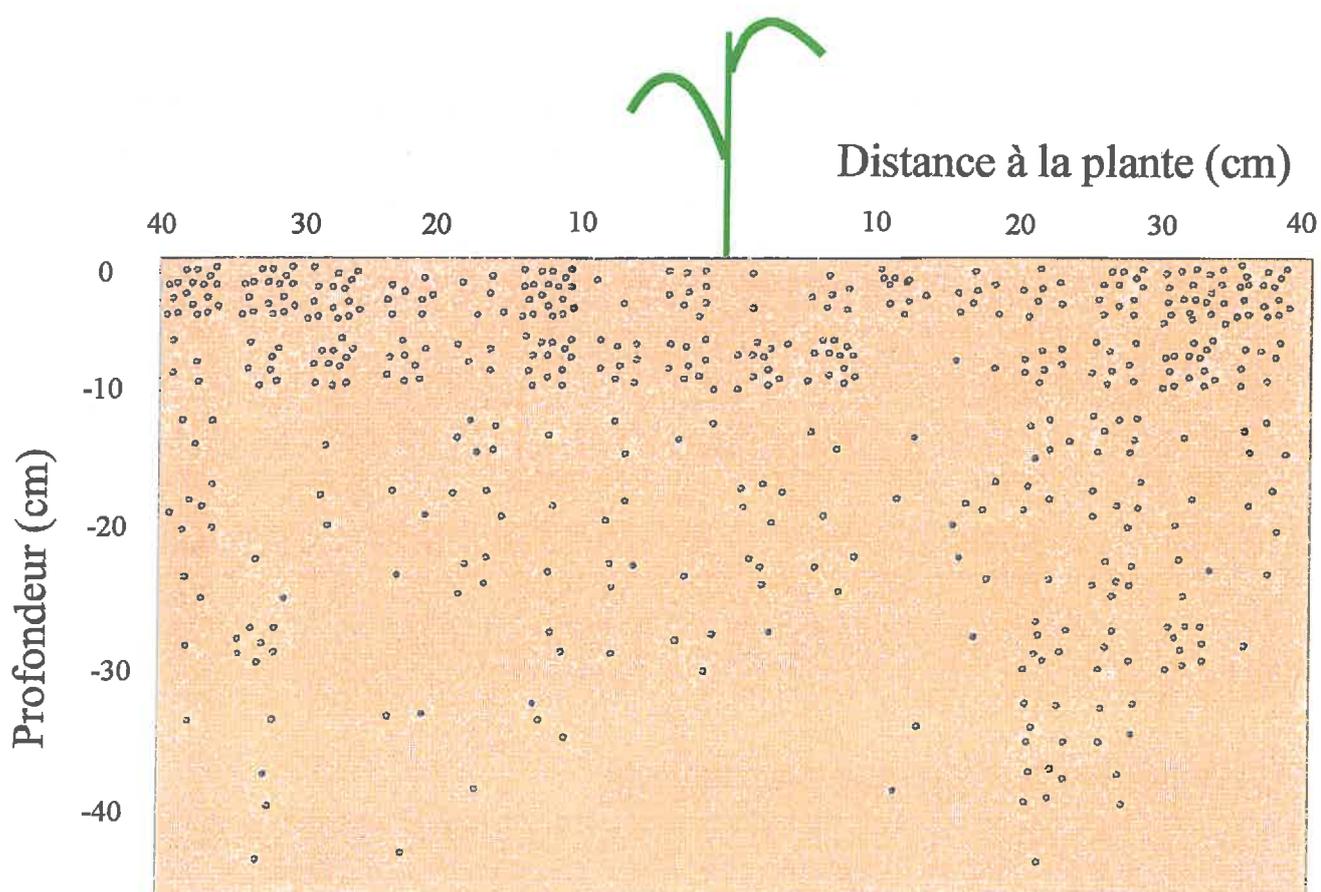


Figure n° 9 Cartographie des racines de maïs sur un profil de sol à l'aide d'une grille. Mise en évidence de la variabilité de distribution des impacts racinaires. Extrait de Chopart et Siband (1993)



Photos 9 et 10 : Etude du système racinaire du maïs par le méthode de la "grille", photo n° 9 : en Côte d'Ivoire et photo 10 au Burkina Faso (Aminata Keita)

De plus, Tardieu et Manichon (Tardieu et Manichon,1986; Tardieu,1988a,b,c) ont montré **l'importance de la prise en compte de la variabilité de distribution des racines dans le profil** pour expliquer l'alimentation hydrique de la culture. Il nous a aussi semblé utile d'utiliser l'enracinement comme indicateur d'état physique du sol chez les agriculteurs. Ceci a conduit à rechercher une méthode permettant de mieux évaluer la variabilité spatiale de la distribution racinaire et de rapprocher plus directement **profil racinaire et profil cultural**. Pour être opérationnelle en milieu réel, il fallait une méthode moins lourde que celles utilisant les prélèvements de sol.

a) Technique de cartographie des impacts racinaires sur un profil à l'aide d'une grille

Tardieu et Manichon (1986) ont adapté une méthode proposée initialement par Bohm (1976). Il s'agit d'une cartographie des impacts racinaires visualisés sur un profil de sol à l'aide d'une grille. Nous avons adapté leur méthode pour tenir compte des contraintes locales de terrain et des exigences liées à la méthode de calcul de la longueur racinaire à partir des comptages (Chopart, 1989a,b). On a ainsi (photos n° 9 et 10) :

- retenu une grille à mailles de 5x5 cm,
- considéré le profil comme un plan et les racines comme des droites traversant ce plan. Il faut donc, pour respecter ce schéma, "gratter" le moins possible le profil (plus on dégagera de sol, plus on verra de racines),
- compté toutes les racines se trouvant à l'intérieur de la maille.

Cette méthode permet une évaluation de la **variabilité de l'enracinement dans le profil** (figure n°9) sans nécessiter de transport d'échantillons de sol ni d'extraction des racines par des procédés toujours assez lourds de tamisage sous l'eau. Son principal défaut est qu'elle **ne donne pas accès** directement à la densité volumique de **longueur racinaire**. Or, cette **variable est la plus pertinente** (Barley, 1970; Maertens 1970; Maertens et *al.*,1974) et, actuellement, la plus couramment utilisée pour évaluer l'accès à l'eau et aux éléments nutritifs de la culture.

b) Modèle de passage du nombre d'impacts sur un profil à la densité de longueur racinaire

A condition de respecter certaines procédures, on peut considérer qu'avec la méthode de la grille, on compte des points (racines) sur un plan (profil). **Le problème consiste alors à passer de ce nombre de points à une longueur dans un volume, c'est à dire de passer d'une géométrie bi-directionnelle à une géométrie tri-directionnelle.**

Certains auteurs ont effectué des comparaisons entre le nombre d'impacts observés et la longueur des racines situées immédiatement derrière. Ils ont établi des relations linéaires empiriques entre

les deux variables qu'ils ont ensuite utilisées pour évaluer la longueur à partir du nombre d'impacts. Des auteurs ont eu recours à ces relations dans le cas de comptages d'impacts sur un plan tel que pratiqué par nous ou dans des minirhizotrons sur une surface courbe. Mais la problématique du passage d'un nombre d'impacts à une longueur de racines est la même. Les résultats sont très variables d'une culture à l'autre et d'un auteur à l'autre. Les coefficients de passage vont de 1 à 2.5 pour le coton (Upchurch et Ritchie, 1983; Upchurch, 1985; Bland et Ducas, 1988) et peuvent aller jusqu'à 8 sur blé (Drew et Saker, 1980).

Van Noordwijk (1987), s'appuyant sur des travaux de biométriciens (Lang et Melhuish, 1970), montre que la longueur des racines à l'intérieur d'un cube est en relation avec le nombre d'impacts racinaires sur trois faces perpendiculaires de ce cube. Il propose aussi des relations mathématiques permettant d'estimer le degré d'anisotropie des racines et leur(s) direction(s) préférentielle(s) à partir du nombre d'impacts sur ces trois faces. **Si l'on connaît le degré d'anisotropie et la direction préférentielle des racines grâce à une étude préalable, il est alors possible d'estimer la longueur des racines dans le cube à partir de mesures sur une seule face grâce à un modèle fondé sur les probabilités géométriques.** Dans ce modèle, si la distribution des racines est isotrope (pas de direction préférentielle), pour un impact de racine par unité de surface, il y aurait deux unités de longueur par unité de volume. On obtient ainsi un modèle du type:

$$P_x = (NI_y + NI_z) / 2 NI_x \quad (8)$$

$$CO_x = f(P_x) \quad (9)$$

$$DLRt = NI_x \cdot CO_x \quad (10)$$

avec :

$NI_{(x,y,z)}$: nombre d'impacts racinaires par m^2 sur trois faces perpendiculaires d'un cube (x, y, z)

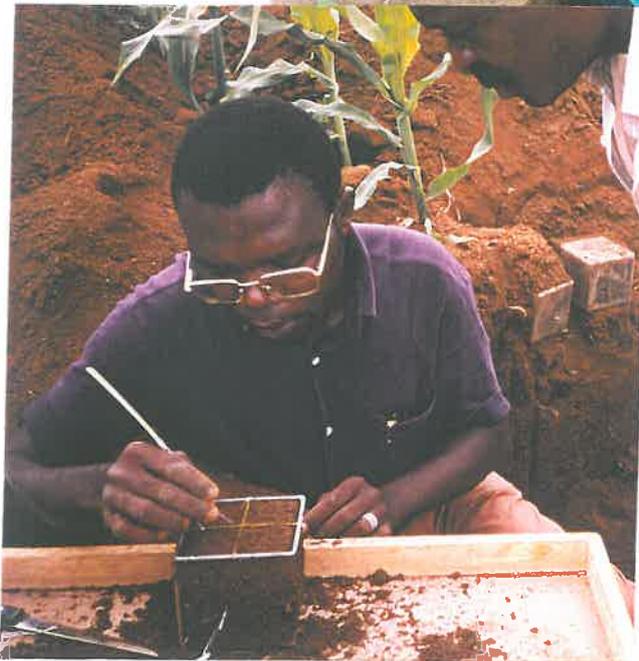
P_x : indice de direction préférentielle des racines sur la face x

CO_x : coefficient de passage du nombre d'impacts à la longueur théorique

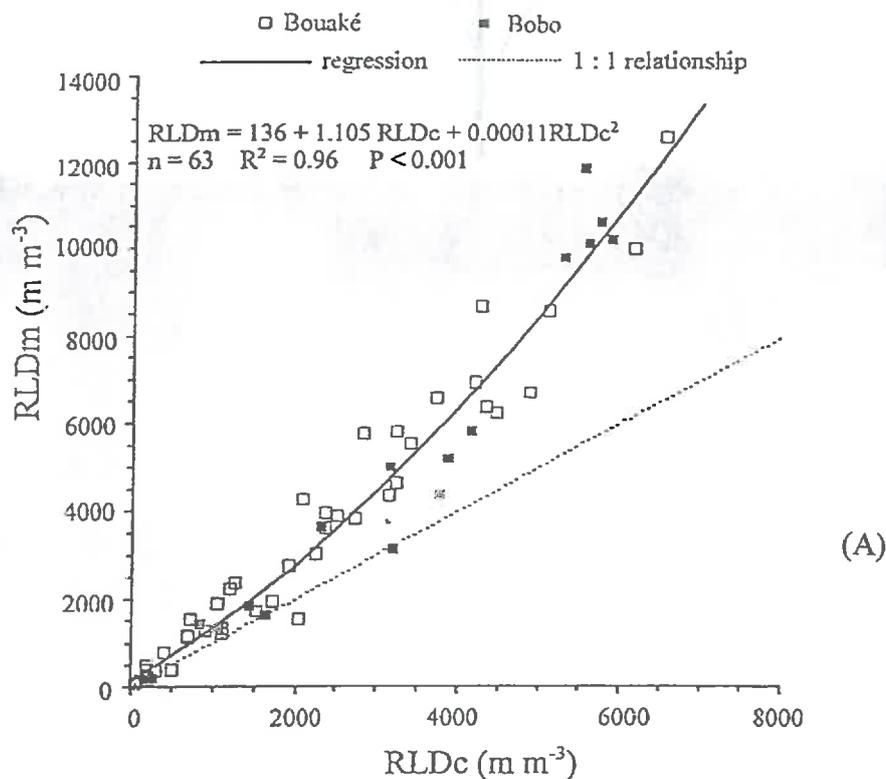
$DLRt$: densité volumique de longueur racinaire calculée par le modèle Van Noordwijk en $m \cdot m^{-3}$

On a testé ce modèle en prélevant des cubes de sol (photo n° 11 et 12), en comptant les racines sur trois faces perpendiculaires (photo n° 13) et en mesurant les racines à l'intérieur du cube. Ce travail a été réalisé sur le maïs à Bouaké en Côte d'Ivoire (Chopart, 1991 ; Chopart et Siband, 1993) et à Bobo au Burkina Faso (Chopart, 1997b ; Chopart et Siband, 1999, voir tome II, C4).

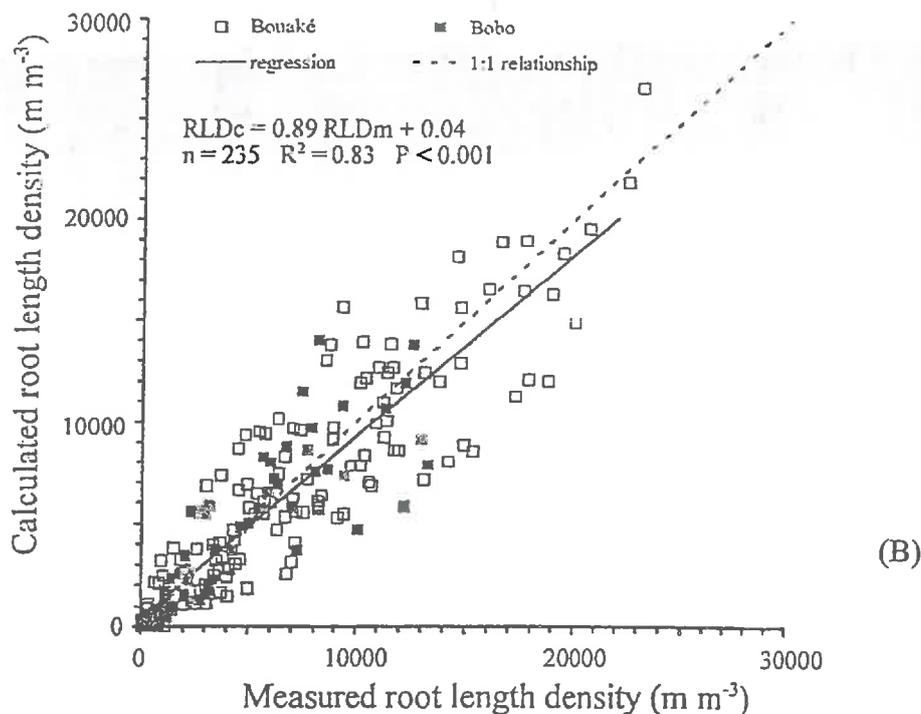
Le coefficient CO_x n'est pas constant (Chopart et Siband, 1999). Proche de 2 près de la surface, où le nombre de racines est élevé, il décroît avec le nombre d'impacts et la profondeur. On peut donc utiliser NI_x ou la profondeur pour modéliser CO_x et donc calculer $DLRt$. La longueur ainsi



Photos n° 11, 12, 13. Etude du modèle de passage du nombre d'impacts à la densité de longueur racinaire du maïs par la méthode des cubes; n°11 : cubes dans le sol, n° 12 : extraction des cubes (par Aminata Keita, Bobo, Burkina Faso), n°13 comptage d'impacts sur les 3 faces du cube (par Niangoran Koffi, Bouaké, Côte d'Ivoire).



Relationship between root length density calculated (RLDc) using mean root impacts on three sides of a cube (NI_m) using model: $RLD_c = NI \cdot CO$, and measured inside the cube (RLDm). Pooled data from Bouaké and Bobo Dioulasso.



Model validation. Relationship between root length densities measured inside a soil cube (RLDm) and RLD calculated with model 3 ($RLD_c = NI \cdot CO \cdot CE_2$), with root counts on a vertical transversal plane (NI_t) and CO calculated from NI_t using pooled data from Bouaké and Bobo Dioulasso, independent from methodology development experiments.

Figure n° 10. Test et validation d'un modèle d'évaluation de la densité volumique de longueur racinaire de maïs à partir de comptages d'impacts sur un profil. (A) : test du modèle théorique (Van Noordwijk, 1987), (B) validation du modèle proposé à partir de données indépendantes obtenues à Bouaké et à Bobo Dioulasso. Extrait de Chopart et Siband (1999), tome II, C.4).

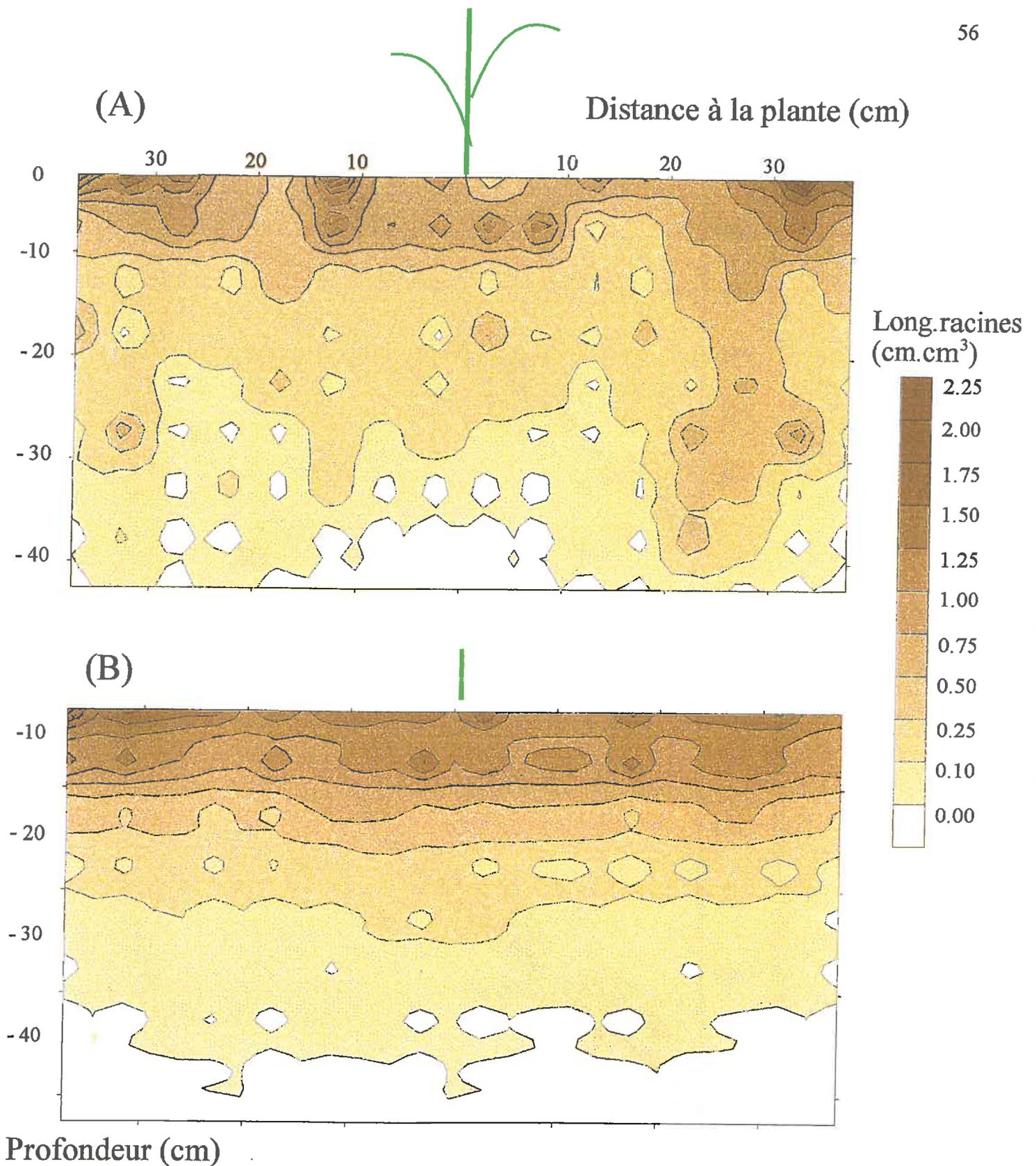


Figure n° 11 Cartographie de la densité de longueur racinaire (DLR) sur un profil de sol évaluée à partir des comptages d'impacts de la figure n° 9 : (A), et de la moyenne de 6 profils sur la même parcelle : (B). Isodensités obtenues par krigeage. Extrait de Jourdan et chopart (1998)

calculée par le modèle de Van Noordwijk (Eq. (10)) est généralement inférieure à la longueur réelle (figure n° 10 A) avec un rapport entre la longueur réelle (DLRm) et la longueur calculée (DLRt) variable de 0.8 à 2 chez le maïs (Chopart et Siband, 1999). Chez cette culture, ce rapport croît avec l'âge de la culture et décroît avec la distance entre la base du pied et la position du cube étudié. On définit ainsi un coefficient expérimental :

$$CE = DLRm \cdot DLRt^{-1} \quad (11)$$

qui a été modélisé avec les deux variables facilement disponibles: le nombre de jours après semis (JAS) et la distance du point de mesure à la base de la plante (DP), soit :

$$CE = f(JAS, DP) \quad (12)$$

La densité volumique de longueur racinaire calculée (DLRc) peut alors être estimée par :

$$DLRc = NI_x \cdot CO_x \cdot CE \quad (13)$$

Sur maïs, le produit CO.CE varie de 2 à 5. Les résultats sont comparables dans les deux sites étudiés, en Côte d'Ivoire et au Burkina Faso (Chopart et Siband, 1999). Le modèle proposé a été validé avec un jeu de données indépendantes dans les deux sites et donne, comme le montre la figure n° 10 b, des estimations satisfaisantes de longueurs racinaires à partir de comptages d'impacts sur un seul plan d'une série de cubes, suivant une procédure pouvant être assimilée à la méthode de la grille.

Il semble donc possible d'estimer la longueur des racines dans un profil (figure n° 11) à partir de comptages d'impacts (figure n° 9). On doit, pour cela, évaluer deux coefficients de passage CO et CE en les modélisant grâce à une étude préalable faisant appel à une technique de prélèvements de cubes de sol sur lesquels on compte les impacts racinaires sur trois faces et on mesure la longueur totale des racines contenues à l'intérieur (Chopart et Siband, 1993, 1999, tome C.4).

La méthode proposée reprend donc celle de Van Noordwijk (1987), fondée sur un modèle géométrique en la complétant par un modèle empirique. **Même si elle ne prétend pas donner des résultats d'une grande précision, elle paraît supérieure à celle généralement retenue, par exemple par Bland et Ducas (1988), qui se limite à une relation purement empirique, avec un coefficient de passage fixe, quels que soient les profondeurs et stades de développement.**

La prise en compte de la direction préférentielle des racines s'avère importante. En effet, si l'enracinement du maïs peut être considéré comme isotrope en surface, il prend une direction préférentielle verticale en profondeur en liaison avec le géotropisme. La conséquence est que, pour un même nombre d'impacts, il n'y aura pas la même longueur en surface (isotropie) et en profondeur. En effet, pour des observations sur un plan vertical, les racines seront préférentiellement parallèles au plan d'observation, et la probabilité d'intersections entre le plan et les racines est moindre.

La méthode proposée est utilisée par d'autres, pour des études racinaires au champ en relation avec le fonctionnement de la culture sur le maïs (N'cho, 1991; Lebret, 1997 ; Siband, 1999 et plus récemment sur sorgho (Barro, 1999) et riz pluvial (Bousquet, 1999). Les résultats préliminaires vont dans le même sens que ceux ici présentés, avec quand même des originalités relatives aux facteurs de variation du coefficient expérimental CE.

235 Estimation du taux d'exploration racinaire dans le sol par modélisation

Les études et modèles d'accès de l'eau et des éléments minéraux se limitent souvent au fonctionnement d'une racine isolée, sans interaction avec les autres racines (Gardner, 1960, 1964). Pour modéliser le fonctionnement du système racinaire, il faut disposer de variables plus difficiles à appréhender à l'échelle d'un peuplement végétal. Ainsi Molz et Remson (1979), parmi d'autres, font dépendre l'extraction racinaire de l'eau de la conductivité hydraulique dans chaque horizon, en plus de la densité de longueurs racinaires et de la demande évapotranspirative. Par ailleurs, ces modèles macroscopiques ne tiennent pas ou mal compte de la variabilité spatiale de la distribution racinaire .

Ces modèles mécanistes sont certes indispensables à une bonne compréhension des processus élémentaires, mais se situent, pour l'instant, à un niveau de perception différent de celui des études actuelles sur le fonctionnement hydrique de la parcelle cultivée. C'est pourquoi, sans les rejeter, on a tenté de **voir comment, à partir des variables disponibles** (distances moyennes entre racines à l'échelle de la maille de mesure), **on peut estimer plus simplement le volume de sol apte à participer à l'extraction racinaire de l'eau et des éléments nutritifs.**

a) Base du modèle proposé.

On estime que l'approvisionnement de la racine se fait essentiellement par **diffusion**, le flux gravitaire étant considéré comme négligeable. Pour l'eau, on doit pour cela commencer la simulation à partir du moment où l'eau du sol est retenue par celui-ci avec une énergie telle que

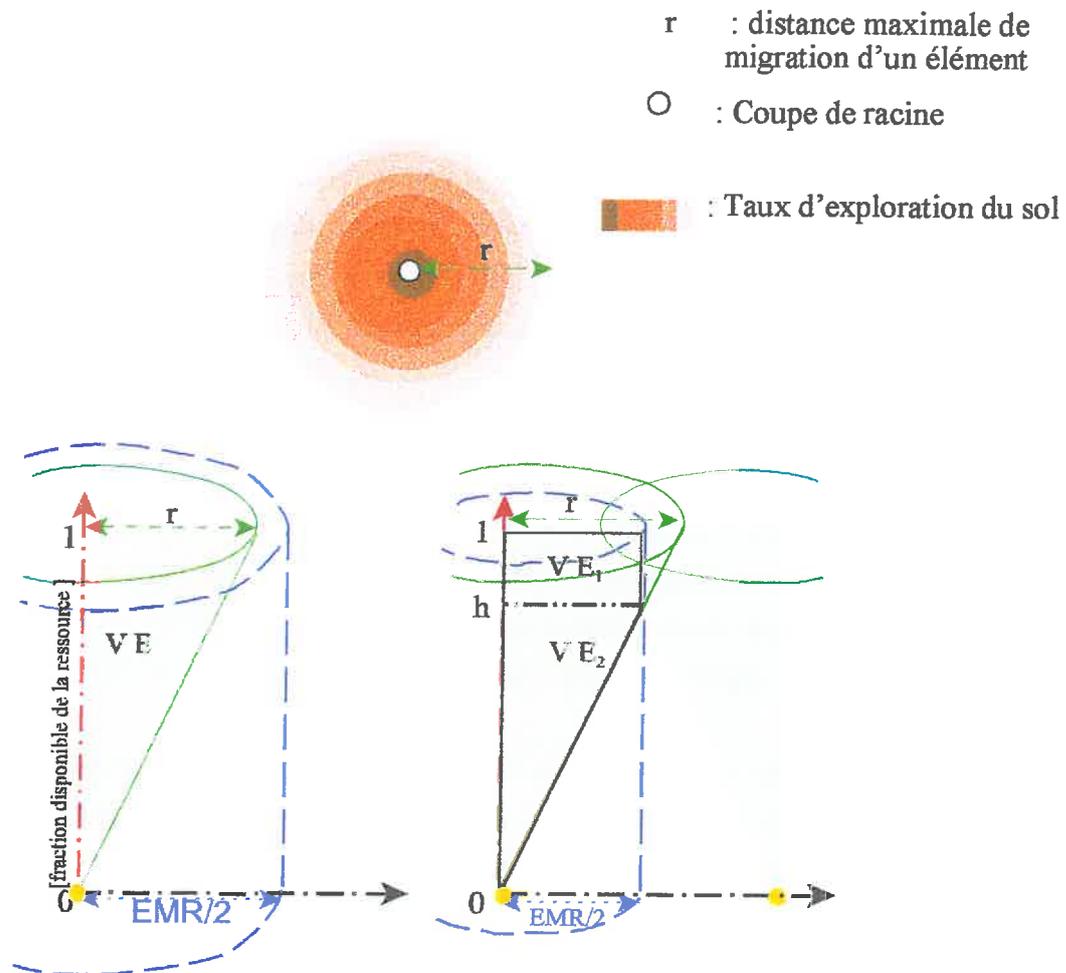
ces flux gravitaires sont faibles (état hydrique du sol à la “capacité de rétention” ou “capacité au champ”). La diffusion résulte d’un gradient de concentration, créé par l’assèchement local pour l’eau ou, pour le nutriment, par l’absorption préférentielle de l’élément par rapport à l’eau. Un **profil d’appauvrissement de la fraction disponible tend à s’établir autour de la racine**, depuis le rhizoplan jusqu’à une distance où les échanges entre le sol et la racine deviennent négligeables et la concentration reste celle du sol, non influencée par la présence des racines. **Au bout d’un certain temps, ce profil devient stable**. La racine a épuisé toute l’eau utile ou la totalité de l’élément assimilable de son environnement. **On ne cherche donc pas, ici, à simuler la dynamique d’appauvrissement, mais seulement l’état stable final dans le cas où toutes les ressources disponibles sont mobilisées par le système racinaire.**

On appelle r le rayon d’exploration, c’est à dire **la distance maximale autour de la racine sur laquelle un nutriment peut se déplacer par diffusion vers la racine**. On suppose qu’au niveau du rhizoplan où l’absorption est la plus facile, la fraction disponible de l’élément est entièrement utilisée. On définit alors, pour une longueur du puits racinaire tendant vers 0 (racine réduite à un disque absorbant au niveau de sa circonférence), un volume de sol exploré (VE) sur la distance r . Il est engendré par le profil d’appauvrissement, autour du rhizoplan. (Figure n° 12).

Ce volume peut prendre plusieurs formes en fonction du modèle retenu pour le gradient d’appauvrissement entre le rhizoplan (où tout est absorbé) et la distance maximale de migration (rien n’est absorbé). Si on considère que tout est absorbé jusqu’à la distance r , le volume exploré prend alors la forme d’un cylindre. Si le gradient est linéaire, il est assimilé à un cône autour du rhizoplan (figure n° 12). Il est aussi possible de faire appel à un type de modèle utilisé pour simuler le rabattement d’une nappe autour d’un puits de captage. Les calculs sont plus complexes et surtout nécessitent la connaissance du diamètre du puits (donc de la racine) qu’il est difficile d’évaluer avec précision. Ce modèle pourrait toutefois être utilisé dans le cas de cultures à racines plus grosses. On retiendra ici l’hypothèse d’un gradient linéaire qui est une forme simplifiée du dernier modèle, permettant des solutions approchées mais plus faciles d’accès.

b) Modèle du gradient linéaire de concentration finale entre le rhizoplan et la distance maximale de migration (r).

On cherche à calculer un **taux d’exploration EX** qui est le **rapport entre le volume de sol exploré (VE) autour de la racine** dépendant de la distance de migration de l’élément, et un **volume élémentaire total de sol (V)** :



r : distance maximale de migration d'un élément
 $EMR/2$ demie distance entre racines

0 concentration au niveau du rhizoplan
 1 concentration hors de l'accès racinaire

h ordonnée de l'intersection des cônes

Figure n° 12. Modèle de calcul du taux d'exploration racinaire du sol. Schémas des bases du modèle linéaire. D'après Siband et Chopart (1998)

$$EX = VE/V \quad (14)$$

Pour une racine de longueur unitaire, le volume total d'influence potentielle (ou territoire) d'une racine (V), dépendant de la distance entre les racines (EMR) est défini par :

$$V = \pi (EMR/2)^2 \quad (15)$$

En ce qui concerne VE, deux cas de figure peuvent se présenter :

i) $EMR/2 \geq r$: le demi-écart moyen entre les racines est supérieur à la distance maximale de migration de l'élément considéré. Les territoires sont disjoints et s'additionnent. Le volume VE, assimilé à un cône (figure 12) à l'intérieur duquel un point du puits racinaire peut avoir accès à l'élément d'intérêt est :

$$VE = \pi r^2/3 \quad (16)$$

ii) $EMR/2 < r$: les territoires racinaires voisins se recoupent (voir figure 12). Il y a concurrence entre les racines pour l'absorption d'un même élément qui doit être affecté à l'une des deux racines. Dans cette situation, le volume VE est constitué de deux parties VE_1 et VE_2 telles que :

$$VE = VE_1 + VE_2 \quad (17)$$

- Le volume VE_1 prend une forme cylindrique :

$$VE_1 = \pi (EMR/2)^2 (1-h) \quad (18)$$

Où h est l'ordonnée de l'intersection des deux cônes voisins, donnée par

$$h = EMR/2r \quad (19)$$

- Dans le volume VE_2 , il n'y a pas de concurrence vis à vis de l'élément considéré, sa forme est celle d'un cône et sa valeur est donnée par :

$$VE_2 = \pi (EMR/2)^2 h/3 \quad (20)$$

Ainsi, d'après les équations (17) à (20), le volume exploré est :

$$VE = \pi (EMR/2)^2 (1 - EMR/3r) \quad (21)$$

Compte tenu des équations (14), (15), (16) et (21), le taux d'exploration EX est donné par les deux expressions suivantes :

- Si $EMR/2 \geq r$:

$$EX = 4/3 (r/EMR)^2 \quad (22)$$

- Si $EMR/2 < r$:

$$EX = 1 - EMR/3r \quad (23)$$

Ce modèle, pour pouvoir prendre en compte la variabilité de distribution racinaire, doit d'abord fonctionner au niveau de chaque unité de profil étudié (carré de comptage des racines de 5x5 cm). Le taux d'exploration EX doit lui aussi être calculé pour chaque unité d'observation in situ. Ceci nécessite de très nombreux calculs. Un logiciel appelé RACINES a été mis au point pour cela (Siband et Boquet, 1990) et a été récemment mis à jour (Durand, 1999). Il permet la **gestion des données de base** (comptages d'impacts) et **calcule automatiquement pour chacune des unités de base** (mailles de 5 cm) et suivant les modèles présentés précédemment, les densités de longueurs (équation n°13), les écarts (distances) moyens entre racines (équation n° 2) et les taux d'exploration racinaire (équations n° 22 ou 23).

c) Finalité du modèle proposé

Le modèle donnant le taux d'exploration racinaire du sol (EX) à partir des équations (22) ou (23), est d'abord utilisé pour de simples **comparaisons entre différents milieux**, modes de gestion du sol ou de dynamiques d'exploration. La distance maximale de migration peut être tirée de la littérature, avec des valeurs moyennes de l'ordre de 1 à 2 mm pour le phosphore (Blanchet et *al.* ab, 1974), de l'ordre du cm pour le potassium (Blanchet *et al.* a,b, 1974) et de l'ordre de quelques cm pour l'eau (Blanchet *et al.* a,b, 1974). Ceci permet de calculer, à l'échelle de la maille de mesure, puis par agrégation à l'échelle du profil, le taux d'exploration racinaire pour un élément donné. On peut alors **comparer des systèmes racinaires** non plus seulement à partir de variables descriptives comme la longueur des racines, mais **en utilisant le volume de sol réellement utilisable pour l'extraction racinaire de l'eau** ou de tel ou tel nutriment.

Le concept de volume de sol utilisable pour l'alimentation de la plante a aussi été utilisé pour **mettre en relation**, d'une part, la **quantité d'élément potentiellement disponible** pour l'extraction racinaire, et d'autre part, la **quantité réellement absorbée** par le végétal. Cette dernière est obtenue par l'analyse du végétal (nutriments) ou par mesure directe au champ pour la consommation en eau.

i) Etudes sur l'accès de la plante aux éléments nutritifs

Pour les éléments nutritifs, cette approche suppose que l'on tende vers un profil d'appauvrissement maximum du sol pendant la période sur laquelle s'applique l'étude, sans renouvellement de la ressource. Ceci permet de travailler au niveau d'un cycle cultural pour les éléments nutritifs. Concernant les éléments nutritifs majeurs et l'eau, certains auteurs (Maertens, 1971; Taylor et Klepper, 1975; Habib *et al.* 1991) estiment que l'ensemble de l'enracinement peut les absorber durant toute la culture. C'est en particulier le cas du maïs (Maertens, 1971; Taylor et Klepper, 1978) et du cotonnier (Taylor et Klepper, 1975). Maertens (1971) trouve même une absorption préférentielle de l'eau et des principaux nutriments (N, P K) dans les parties basales (proches de la tige). Cependant, l'épuisement local des quantités accessibles d'un élément limite la durée pendant laquelle chaque section de racine peut contribuer à l'absorption.

En absence de réapprovisionnement en cours de culture et de modification majeure de l'accessibilité des éléments, tout se passe comme si, à chaque instant, seuls les quelques centimètres les plus jeunes dans la partie apicale de chaque racine contribuent à l'alimentation de la culture. Les autres parties de l'enracinement demeurent fonctionnelles, mais les réserves situées à la périphérie de la racine sont épuisées.

Pour un élément minéral, on peut disposer de sa teneur pondérale E_k pour chaque niveau de sol (k), de la densité apparente (Da_k) de celui-ci et de l'éventuelle proportion d'éléments grossiers EG. Ceci permet d'estimer la masse QE_k contenue dans la maille de dimension $ma_{i,j,k}$ en cm, qui correspond à la maille de la grille de comptage des impacts racinaires. Elle définit la surface unitaire de comptage (ma^2) et le volume unitaire de sol représentatif de cette surface, situé dans le profil à la position i,j,k (i : position dans une direction transversale à la ligne de culture, j , dans une direction longitudinale et k dans le sens vertical, voir schéma figure n° 13)

$$QE_k = E_k * ma_{i,j,k}^3 * Da * (1-EG) \quad (24)$$

La **quantité d'élément accessible aux racines dans chaque maille** est donc:

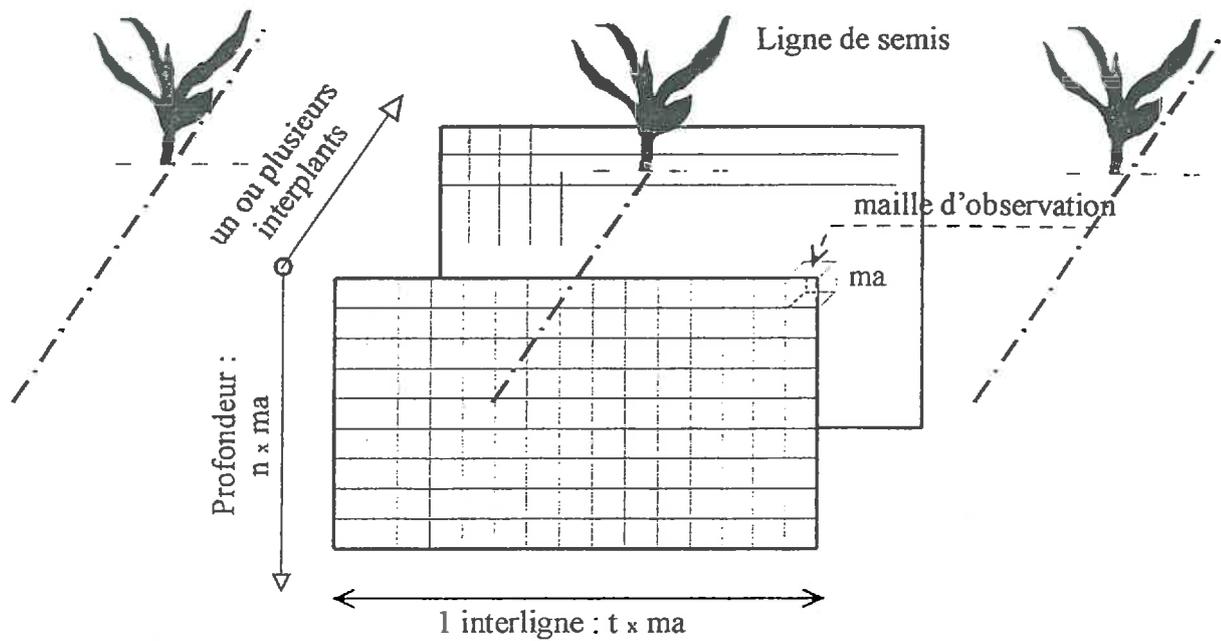


Figure n° 13. Définition du profil racinaire et repérage des mailles d'observation.

Exemple d'un maïs semé avec un interligne de 75 cm et 20 cm sur la ligne.
 Comptages des impacts racinaires avec une grille à mailles de 5 x 5 cm : 15 positions transversales (indice i), 2 plans d'observation (indice j), n positions verticales (indice k). Extrait de Siband et Chopart (1998)

$$QE_{acc_{ijk}} = EX_{ijk} * QE_k \quad (25)$$

où EX_{ijk} est donné par les éqs. (22) ou (23)

Disposant de la quantité accessible pour chacune des mailles contenant des racines, il est possible d'obtenir la **quantité totale accessible exprimée par unité de surface de sol**, entre le semis et la date de mesure en se fondant sur le stock de ressource évalué au moment du semis. Cette quantité accessible à la plante peut être comparée au contenu, à cette date, de la biomasse, valeur qui représente la consommation cumulée.

ii) Etudes sur l'absorption de l'eau

Le même type d'approche peut en partie s'appliquer à l'eau, QE_k étant alors la quantité d'eau utile. Toutefois, contrairement aux éléments nutritifs il n'est pas possible d'empêcher le renouvellement de la ressource en eau au cours du cycle cultural. **On doit se limiter à l'étude du fonctionnement hydrique du sol et de la culture entre deux épisodes pluvieux.** On suit alors la consommation en eau par des mesures dans le sol ou directement sur la plante que l'on peut comparer au taux d'exploration des racines (EX) en considérant alors que tout l'enracinement participe à l'alimentation. Mais la réalimentation en eau du profil peut assez facilement se modéliser, ce qui ouvre la voie à une modélisation de l'extraction racinaire de l'eau par une culture, en couplant une **modélisation de la dynamique de l'eau dans le profil après une pluie, et une modélisation (ou des mesures) de la distribution des racines dans le sol.**

Le modèle est fondé sur une évaluation de distances entre racines en supposant que dans le volume de base elles sont équidistantes et parallèles. Or, un système racinaire est en réalité composé de racines raccordées les unes aux autres dont la topologie est complexe et dont les distances ne peuvent être facilement exactement évaluées. **S'ils sont appliqués à des petits volumes** (cubes de 5 cm d'arête dans un profil de l'ordre du m^2 dans les cas présentés), **ces modèles permettent toutefois d'accéder au taux d'exploration racinaire**, variable particulièrement pertinente pour étudier **l'accès à l'eau et aux nutriments** d'un peuplement végétal car elle tient compte de la variabilité de distribution racinaire à l'échelle décimétrique, et au moins partiellement, des concurrences possibles entre les racines à l'intérieur du volume unitaire d'étude.

3 ETATS DU SOL, SYSTEMES RACINAIRES ET BILAN HYDRIQUE

Il est nécessaire, comme cela a été montré (ch. III par. 12), de disposer d'outils permettant de mieux caractériser la variabilité du milieu et le fonctionnement du peuplement végétal en liaison

avec le comportement du sol pour mieux comprendre les larges variations spatiales et temporelles du rendement et de l'action des modes de gestion du sol. Ceci a conduit à mettre en oeuvre ou à mettre au point des outils de terrain adaptés à cette problématique et aux conditions locales de milieu et de travail.

31 RELATIONS ENTRE ETAT DU SOL ET COMPORTEMENT HYDRIQUE

311 Mesure du ruissellement avec le mini-simulateur de pluies.

Le mini-simulateur de pluie a été testé dans une expérimentation comparant différents modes de travail du sol à Bouaké (Casta *et al*, 1989). L'étude a porté sur la sensibilité du labour au ruissellement, dans un milieu qui avait été traité depuis 6 ans avec trois modes de gestion du sol très différents et dans un système comprenant deux cultures par an (maïs puis cotonnier):

- semis direct (SDP1)
- un labour par an au tracteur (LMS)
- deux labours par an au tracteur (LMS)

Le travail a été effectué en saison sèche sur une parcelle sans culture. Sur des parcelles de ces trois systèmes de culture, il a été procédé à des apports d'eau sur le sol laissé dans son état naturel, ou bien travaillé juste avant les apports d'eau. Dans le premier cas, on a étudié les effets résiduels et cumulés des modes de gestion du sol sur l'infiltration. L'application d'un travail du sol juste avant la mesure a permis, dans la seconde situation, d'en voir les effets immédiats. Sur les parcelles non retravaillées, l'intensité limite de ruissellement (II, intensité de pluie au-dessus de laquelle apparaît le ruissellement sur un sol proche de la saturation) est faible (tableau n° 6) et très variable à l'échelle mesurée (1 m²).

Il ressort du tableau n° 6 que :

- les intensités limites de ruissellement (II), évaluées par cette méthode, sont voisines des valeurs obtenues en parcelles d'érosion sur des sols assez comparables (Pieri, 1965).
- les II ont tendance à être moins variables spatialement sur les parcelles en semis direct,
- les deux parcelles ayant les II les plus élevées, donc la meilleure capacité d'infiltration, sont localisées sur le traitement le plus intensément travaillé (2 labours par an pendant 6 ans).
- sur le sol venant d'être retravaillé le ruissellement est nettement plus faible que sur le sol laissé à son état initial, quels que soient les modes de gestion précédents (Casta et al, 1989).

Tableau n° 6. Intensités limites de ruissellement obtenues sur un sol proche de la saturation en surface à l'aide d'un mini-simulateur de pluie et d'un limnigraphe, valeurs moyennes et écart-type de la série de 3 répétitions (d'après Casta *et al*, 1989, tome II, B6).

Travaux du sol appliqués pendant 6 ans	Intensité limite de ruissellement (II m h^{-1})	
	moyenne	écart-type
Semis direct (SDP1)	7	4
Un labour par an (LMS profondeur 25 cm)	4	3
Deux labours par an (LMS profondeur 25 cm)	10	9

Du fait de la variabilité des résultats et du nombre limité de répétitions (prêt de l'appareil pour un temps court), on ne peut pas dégager de conclusions définitives. On remarque quand même que **l'état du sol créé par le travail testé est immédiatement moins sensible au ruissellement que l'état initial et la répétition dans le temps de cette pratique n'entraîne pas d'effets cumulatifs marqués** sur le comportement physique et hydrique du sol, **par comparaison avec l'état du sol sous semis direct**. Finalement, en fin de saison sèche, sept mois après le dernier travail du sol, à un moment où le sol va bientôt recevoir les premières pluies, la susceptibilité au ruissellement des différents modes de gestion testés est tout à fait similaire.

Sur le plan méthodologique, il apparaît que le dispositif expérimental utilisé simule des averses proches de la réalité et donne des résultats conformes au comportement du sol sous pluie. Il peut être, de ce fait, considéré comme une **technique de référence**. Mais il reste trop **complexe** pour être mis en oeuvre dans des essais comprenant de nombreux traitements. Par ailleurs, il nécessite l'utilisation d'une **forte quantité d'eau**, ce qui complique son utilisation chez les agriculteurs.

312 Etat du sol et caractéristiques hydrodynamiques de surface par infiltrométrie multidisques.

a) En station expérimentale

Une étude, menée en Côte d'Ivoire (Vauclin et Chopart, 1992 voir tome II, B.7 pour plus de détails) avec la méthodologie TRIMS (ch. III, par. 223) visait à évaluer les caractéristiques hydrodynamiques d'un sol gravillonnaire soumis à deux modes de gestion du sol sur des parcelles cultivées avec deux cultures par an : semis direct (SDT), labour avant chaque culture (LMS) et sur un terrain précédemment en jachère et labouré récemment. Les mesures ont eu lieu en fin de saison sèche, environ 6 mois après le dernier labour, et peu de temps avant le semis.

Les résultats, synthétisés dans le tableau n° 7 montrent un effet favorable, mais relativement fugace, de l'état du sol consécutif au labour (LMS) sur l'infiltrabilité par une augmentation de la

conductivité hydraulique mais surtout de la sorptivité. En conséquence, sur sol labouré, le temps de submersion augmente temporairement. Les dimensions de pores fonctionnels (λ_m) obtenues sur les trois parcelles sont contrastées (tableau n°7). Les valeurs rapportées ici, ainsi que d'autres figurant dans Vauclin et Chopart (1992), ont permis d'élaborer, pour les conditions de cette étude, un schéma d'évolution du comportement hydrophysique de la couche de surface en liaison avec le travail du sol appliqué. Le labour (LMS) créerait une collection importante de pores de petites dimensions, bien connectés et contribuant à assurer une conductivité et surtout une sorptivité capillaire plus élevée que celles du sol non labouré (SDT). Au cours du temps, une partie de ces pores fins disparaissent ou ne sont plus fonctionnels. Il se développerait alors un réseau de macropores (comportement du type LMS après six mois) tendant à rapprocher le fonctionnement hydrodynamique du sol labouré de celui du sol en semis direct (SDT). La présence de macropores, sans doute liée à l'activité biologique, induit vraisemblablement des écoulements préférentiels gouvernés principalement par la gravité dès lors que la surface est inondée.

Tableau n° 7. Caractéristiques hydrodynamiques du sol sur trois traitements agronomiques ayant créé des états du sol contrastés à Bouaké. Mesures avec le perméamètre à disques à une pression d'eau (h_0) de -20mm. (d'après Vauclin et Chopart, 1992, tome II, B.7).

Type de travail du sol (cf tab. 1)	SDT	LMS	LMS
Intervalle entre dernier labour et date des mesures	4 ans	6 mois	0.5 mois
K_0 Conductivité hydraulique (mm/h)	7.0	6.8	12.6
S_0 Sorptivité (mm/h ^{1/2})	12.5	12.6	37.5
λ_m Dimension moyenne de pores fonctionnels (μm)	114.0	112.0	28.0
t_p Temps de submersion (min)	0.7	0.7	6.9

b) En milieu réel

Le même type d'étude a été conduit sur le dispositif en milieu réel sur le terroir du village de Tchololévogo (Chopart, 1995a, 1997a). **Par rapport à un travail superficiel (LB2 ou TSD), un labour profond (LMS) entraîne un état du sol permettant de réduire sa sensibilité au ruissellement** (tableau n° 8, par. 422 et Chopart, 1995a), ce qui confirme donc en milieu paysan les résultats obtenus en station.

32 DYNAMIQUE DES SYSTEMES RACINAIRES DE CULTURES ANNUELLES EN RELATION AVEC L'ETAT DU SOL

La connaissance des principales caractéristiques morphologiques des systèmes racinaires des cultures paraît un préalable indispensable aux études des relations entre l'état du sol et l'enracinement, à celles du fonctionnement de la plante, à l'établissement de bilans hydriques sous culture et à leur modélisation. C'est pourquoi, on présentera brièvement les systèmes racinaires des cultures dont on a étudié le fonctionnement. On commencera par décrire ceux-ci en bonnes conditions édaphiques de croissance, avant d'étudier leurs relations avec l'état du sol.

321 Dynamique des systèmes racinaires en bonnes conditions de culture.

La dynamique des systèmes racinaires d'une ou plusieurs variétés bien différenciées des principales cultures pluviales au Sénégal a fait l'objet d'études **au champ**. Ces études ont concerné les **systèmes racinaires du sorgho** (Chopart, 1970; Chopart, 1985, tome II, C.5), du **riz pluvial** (Chopart, 1985 tome II, C.5), du **mil** (Chopart, 1983, tome II, C.2), de l'**arachide** (Chopart, 1980, 1985, tome II, C.5). De même, on a étudié les systèmes racinaires de quelques cultures parmi les plus importantes sur le plan économique en zone de savanes de Côte d'Ivoire : le **maïs** (Chopart, 1985, tome II, C.5) et la **canne à sucre** (Chopart et Marion, 1995). Les principales variables racinaires retenues sont le profil de densité: de masse ou (et) de longueur racinaire et l'évolution du front racinaire dans le temps.

Ces dynamiques racinaires ont été étudiées dans des **sols représentatifs** de leur aire principale de culture, suivant des itinéraires techniques eux aussi représentatifs (en présence d'un labour). On a toujours vérifié que l'état et les caractéristiques du sol ne faisaient pas obstacle à la croissance du front racinaire. L'état hydrique du sol a en particulier été évalué, une humidité trop faible entraînant dans ces sols une cohésion limitant la croissance racinaire (Nicou, 1975). Les principaux résultats sont synthétisés dans la figure n° 14 . Ils appellent les commentaires suivants.

a) Dynamique racinaire du sorgho (Chopart, 1970, 1985)

La progression du **front racinaire** du sorgho (variété 6318 à cycle de 110 jours) est presque linéaire jusqu'à la récolte (figure n°14 C); il atteint alors environ **1 mètre**. Les biomasses aériennes et racinaires restent faibles jusqu'au tallage (figure n° 14 A et B). La croissance de la plante, et spécialement celle des racines, est ensuite très rapide. La biomasse racinaire passe de moins de 5 g m⁻² à 30 JAS (tallage) à près de 75 g m⁻² à 50 JAS (fin montaison). L'augmentation du poids sec

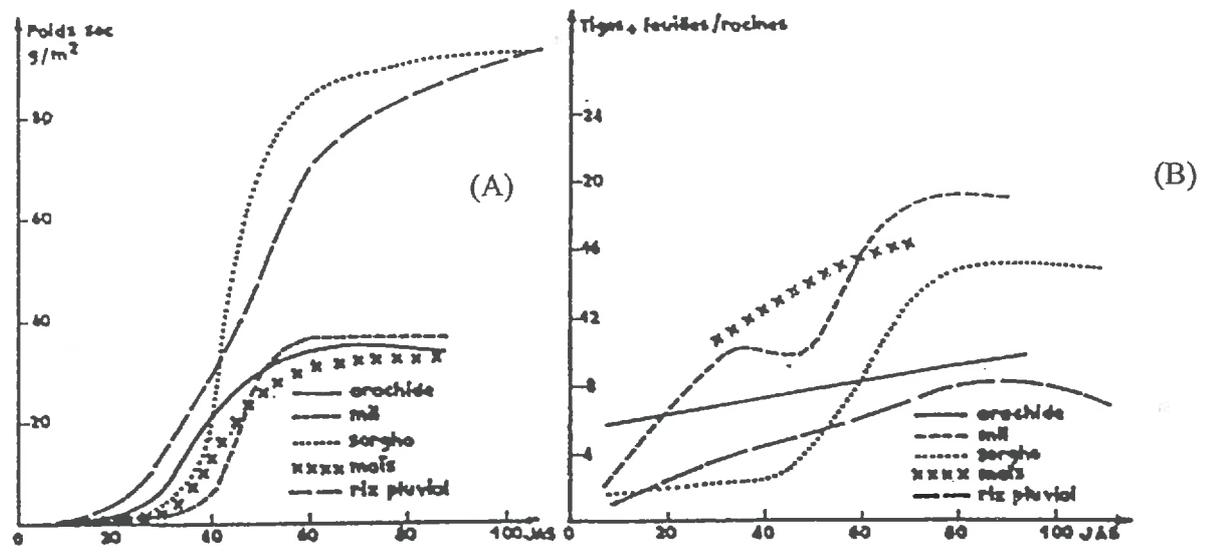


Fig. N° 1 POIDS SEC TOTAL DES RACINES g/m²

Fig. N° 2 RAPPORT TIGES + FEUILLES / RACINES

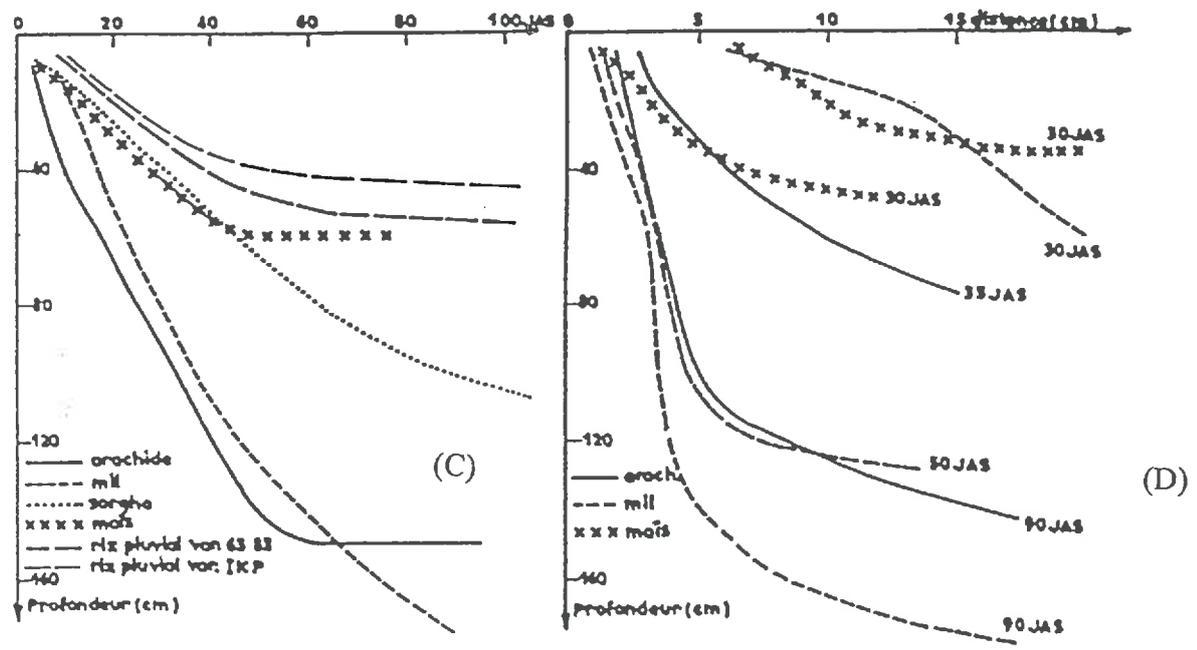


Fig. N° 3 FRONT RACINAIRE (cm)

Fig. N° 4 PROFILS DE DISTANCES MOYENNES entre RACINES

Figure n° 14 Dynamique des systèmes racinaires des principales cultures étudiées : arachide, mil, sorgho et riz pluvial au Sénégal; maïs en Côte d'Ivoire. (A) : poids sec total (g m²), (B) : rapports massiques entre parties aériennes et racines, (C) : front racinaire (cm), (D) profils de distances moyennes entre les racines (cm). Extrait de Chopart (1985), tome II, C.5.

des racines se poursuit ensuite jusqu'à la fin de floraison (75 JAS), mais à un rythme moins soutenu, pour atteindre 90 g m^{-2} en bonnes conditions de culture.

b) Dynamique racinaire du riz pluvial (Chopart, 1980,1985)

Les trois variétés de riz pluvial étudiées ont des cycles de longueur comparable : 110 jours (IKP) ou 120 jours (63 83, Iguape Cateto). Elles ont des **systemes racinaires nettement moins profonds que celui du sorgho, ne dépassant pas 60 cm en fin de cycle** pour la variété la plus performante et 50 cm pour les autres (figure n° 14 C). La biomasse racinaire est nettement plus grande que celle du sorgho en début de cycle jusqu'à 35 JAS (figure n° 14 A), en relation avec une densité de pieds par m^2 plus grande. Ensuite, les biomasses racinaires des deux espèces deviennent proches. On a donc, en fin de cycle, une production de racines de riz d'environ 90 gm^{-2} en bonnes conditions de culture, comme pour le sorgho. En fin de cycle, dans les essais concernés, la biomasse des parties aériennes, sans les grains, est trois fois supérieure chez le sorgho (130 g m^{-2}) par rapport au riz (42 g m^{-2}). En fin de cycle, à partir de la floraison, le rapport massique parties aériennes/racines est donc nettement plus grand dans le cas du sorgho.

c) Dynamique racinaire du mil (Chopart, 1983)

La croissance racinaire du mil est très rapide entre la fin du tallage (30 JAS) et l'épiaison (50 JAS), ce qui correspond également à une très forte augmentation de la biomasse des parties aériennes (figure n° 14 C). Entre ces deux stades, la longueur totale du système racinaire passe de 50 à 1500 m m^{-2} entraînant une nette diminution des distances moyennes entre les racines (figure n° 14 D). La croissance racinaire se poursuit presque jusqu'à la récolte car, à ce stade (90 JAS), la longueur totale a doublé (3000 m m^{-2} pour un poids d'environ 35 g m^{-2}). La progression du front racinaire est d'environ 2 cm par jour jusqu'au début du tallage (figure n° 14 C), puis elle devient très rapide (3.5 cm j^{-1}) jusqu'au début de l'épiaison (50 jours); ensuite la vitesse est ralentie sans s'arrêter. **Le front racinaire atteint deux mètres en fin de cycle** (figure n° 14 C).

Pour une culture de mil semée en poquets (1 poquet par mètre carré), conformément à la pratique paysanne, les racines peuvent aller dans le sens horizontal, jusqu'à **plus de trois mètres du pied au stade floraison**. Près de la surface, un même volume de sol peut donc, théoriquement, contenir des racines provenant de plants de mil situés sur une surface de sol de l'ordre de 15 m^2 (Chopart, 1983). Il faut donc avoir des parcelles suffisamment grandes, dans les expérimentations agronomiques, pour qu'il n'y ait pas d'interactions entre celles-ci. Par ailleurs, en combinant les résultats d'extensions maximales verticale et horizontale et en faisant l'hypothèse d'un système racinaire formant une calotte sphérique, on peut évaluer le volume total de sol exploré par le système racinaire. Ce type d'évaluation fait apparaître, qu'à partir de la floraison, **un pied de mil**

peut émettre, en moins de deux mois, des racines dans une calotte sphérique de sol d'environ **25 m³**.

Le **mil** a, d'après ces résultats, une aptitude remarquable à **occuper rapidement un très grand volume de sol**. Il peut ainsi profiter de sites plus riches que d'autres de ce grand volume pour s'approvisionner en cas de besoin. L'extension du système racinaire peut ainsi contribuer à expliquer l'**adaptabilité** reconnue du mil à des environnements pauvres en eau et en nutriments.

d) Dynamique racinaire de l'arachide (Chopart, 1980, 1985)

La progression du pivot de l'arachide est de 2.7 cm jour⁻¹ (figure n° 14 C), avec un géotropisme très prononcé, jusqu'à la fin de la floraison, vers 50 JAS pour des variétés à cycle de 95 à 100 jours. Le **front racinaire** se stabilise alors à environ **1.5 mètre**, ce qui est élevé pour une culture dont la hauteur des parties aériennes est de l'ordre de 20 à 30cm. La longueur totale du système racinaire croît suivant une sigmoïde pour atteindre un pallier vers 65 JAS, soit les deux tiers du cycle. La longueur totale est alors d'environ 1700 m m⁻² pour un poids total de racines d'environ 35 g m⁻² (figure n° 14 A).

e) Dynamique racinaire du maïs (Chopart, 1985)

Dans les conditions pédo-climatiques de la zone centre de Côte d'Ivoire, et avec une variété à cycle très court (85 jours) cultivée dans la région, **l'enracinement du maïs a un développement limité**, même sans contrainte particulière à sa croissance dans le sol. Si la croissance de la biomasse des racines (figure n° 14 A) est assez comparable à celles du mil et de l'arachide, la longueur totale des racines est plus faible, de l'ordre de 800 m m⁻² à son plus fort développement à la fin de la floraison. **La profondeur atteinte par les racines est alors seulement d'environ 60 cm** (figure n° 14 C).

f) Dynamique racinaire de la canne à sucre (Chopart et Marion, 1995)

Une étude menée sur une population de canne vierge à Bouaké (Côte d'Ivoire) dans un sol humide et sans contrainte majeure à la croissance des racines a permis de montrer que **la progression du front racinaire de la canne est d'environ 0.9 cm/jour** pour la période comprise entre la levée et 150 jours après la levée. 35 jours après la levée, le poids moyen enregistré est de 20 g m⁻² pour une longueur totale de 500 m m⁻². 100 jours après levée, le poids total est 200 g m⁻² pour une longueur totale de 4000 m m⁻².

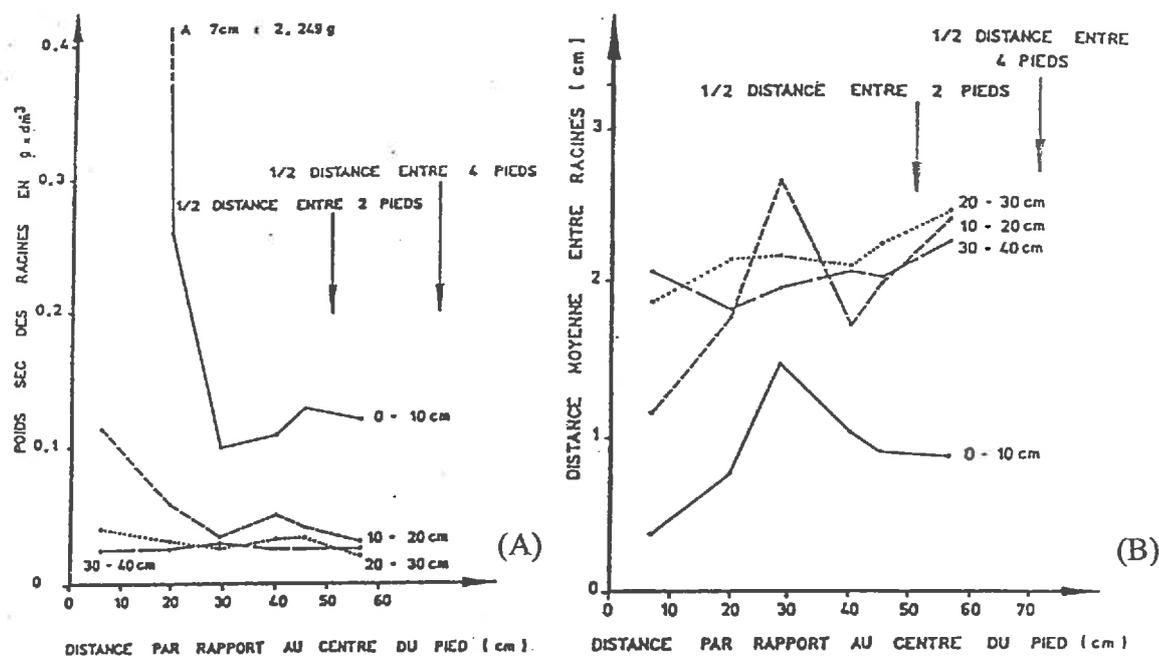


Figure n°15 Gradients horizontaux de densités racinaires de mil à Bambe (Sénégal). (A): poids sec des racines (g/dm^3), (B): distances entre racines (cm). Extrait de Chopart (1983), tome II, C2.

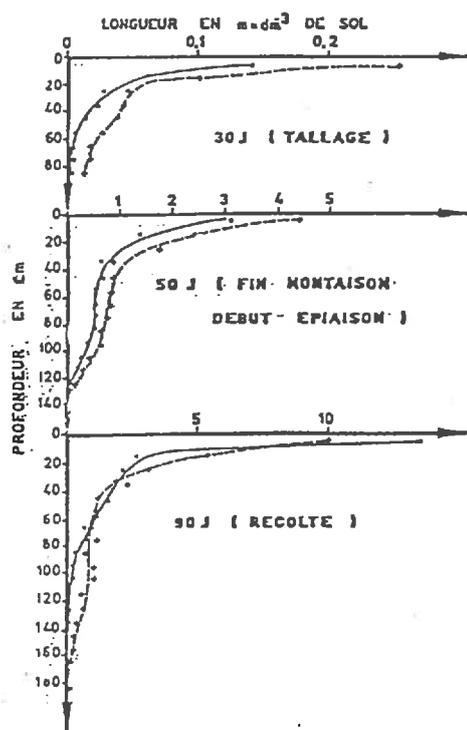


Figure n°16 Profils de densité de longueur racinaire du mil à Bambe (Sénégal), suivant deux modes de travail du sol : SDT (semis direct traditionnel -----), et labour (LB1 - - - - -). Longueurs en m/dm^3 . Extrait de Chopart (1983), tome II, C.2.

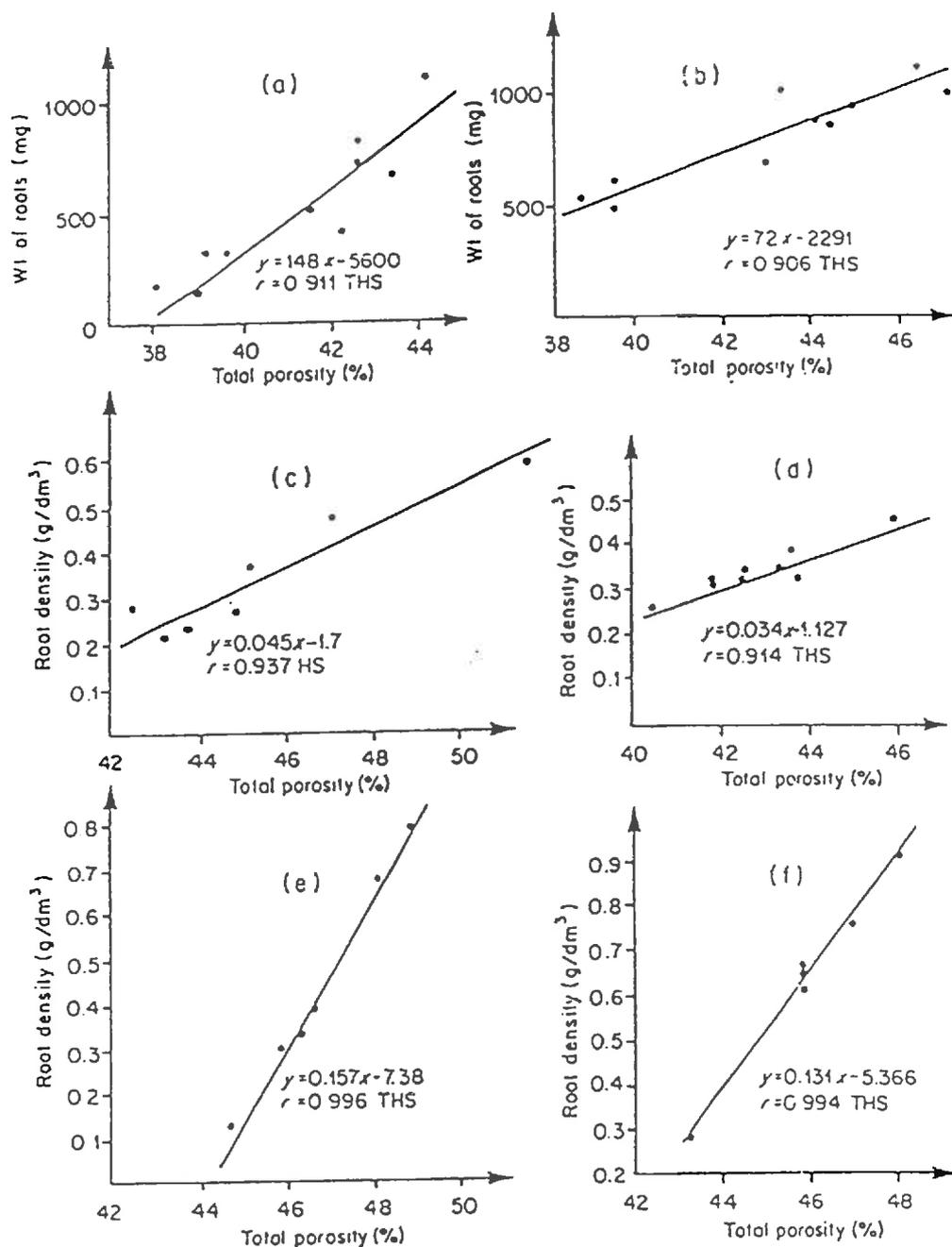


Figure n° 17 Relations entre l'état physique du sol (porosité) et la densité racinaire (masse) de différentes cultures au Sénégal, dans les couches superficielles du sol. (A) arachide à Bambey, (B) sorgho à Bambey, (C) sorgho à Nioro du Rip (10-30 cm), (D) maïs à Sinthiou Malème (10-30 cm), (E) riz pluvial à Séfa (10-30 cm), (F) maïs à Séfa (10-20 cm). Extrait de Nicou et Chopart (1979), tome II, C.6

Si les gradients entre ligne et interligne sont faibles pour des cultures comme le riz et l'arachide, ils sont forts pour les cultures comme le mil ou la canne à sucre dont l'écartement entre lignes est grand. Ainsi, pour le mil au stade maturité du grain, la densité racinaire passe de 2.2 g dm^{-3} à 7 cm du pied à 0.12 g dm^{-3} à 30 cm du pied dans la couche superficielle de sol située entre 0 et 10 cm. (Figure n°15). Les densités de longueurs sont moins fluctuantes mais les écarts restent spectaculaires. Pour la canne à sucre, les gradients sont du même ordre, les valeurs passant, 100 jours après levée de 2.3 g dm^{-3} à 13 cm du pied, à 0.26 g dm^{-3} à 60 cm du pied (Chopart et Marion, 1995). Des informations plus détaillées concernant ces gradients horizontaux sont données par ailleurs (Chopart, 1983; Chopart et Marion, 1995). Ces résultats montrent qu'il n'est pas possible d'évaluer les productions de racines dans le sol à partir des sondages (carottages) si ceux-ci ne sont pas effectués suivant un protocole prenant en compte ces gradients.

323 Etat physique du sol et systèmes racinaires

Des comparaisons ont été menées au Sénégal, entre des systèmes racinaires développés sur des sols à états contrastés, suite à des pratiques culturales différentes : labour de type LB2 ou LB3 (tableau n° 1) et semis direct de type SDT et SDP1 (Chopart, 1980, 1983; Chopart et Nicou, 1976).

Dans les conditions pédo-climatiques des sols exondés et des cultures pluviales du Sénégal, l'état du sol produit par un labour (LB1 LB2 ou LMS) a, par rapport à la pratique du semis direct (SDT ou SDP1), un effet sur le front racinaire qui fluctue en fonction de l'espèce. Il est nul sur le mil (Chopart, 1983), assez faible sur l'arachide et le sorgho (Chopart, 1980), nettement plus marqué sur le riz pluvial (Chopart et Nicou, 1976). Il y a, en revanche, un effet plus constant du labour sur la densité racinaire des cultures aussi bien dans l'horizon travaillé qu'en dessous (figure n°16, d'après Chopart, 1983, tome II, C.2; Chopart et Nicou 1976, tome II, C.7, Nicou et Chopart, 1979, tome II, C.6). Les relations entre l'état physique du sol (évalué ici par sa porosité) et l'enracinement sont particulièrement nettes entre 10 et 30 cm de profondeur (figure n° 17).

33 FONCTIONNEMENT DES RACINES DANS LE SOL

331 Systèmes racinaires et alimentation hydrique des cultures

Les études au champ sur la dynamique racinaire, couplées à des mesures de profils hydriques, ont débouché sur la mise en évidence de premières liaisons entre la densité racinaire et l'alimentation hydrique. Ainsi, dans des essais comparant des itinéraires techniques avec labour (LB1, LB2) en semis direct (SDT) ou en travail superficiel (TT), on a observé, au Sénégal, qu'un enracinement

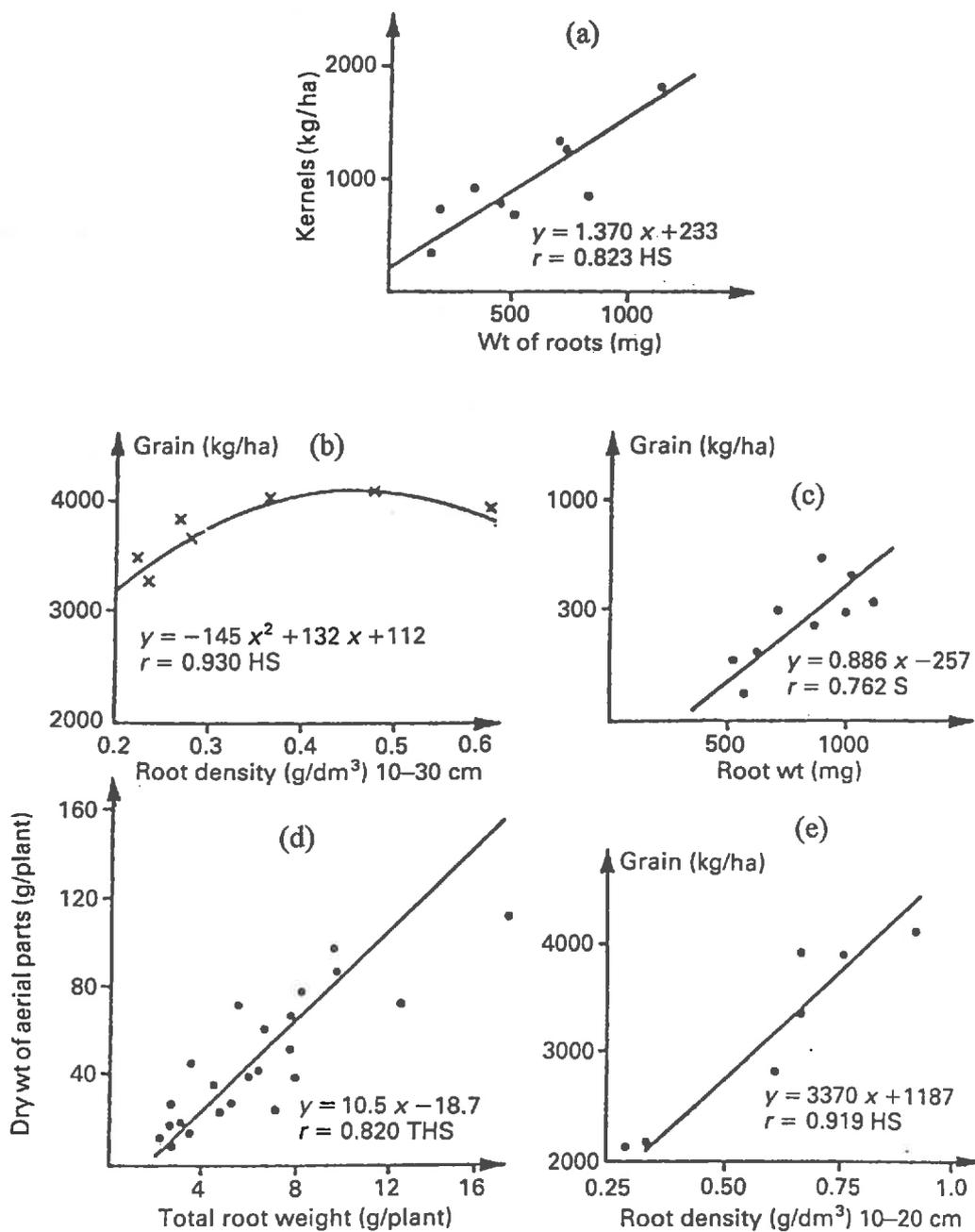


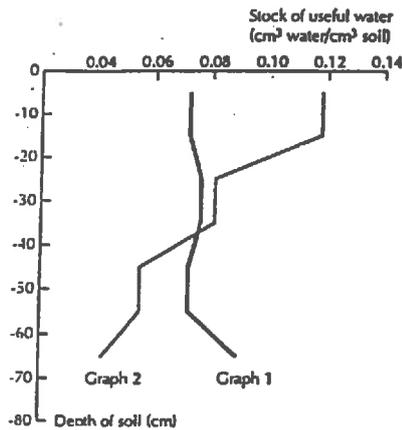
Figure n° 18 Relations entre le développement du système racinaire (masse) et celui des parties aériennes de différentes cultures au Sénégal., (a) : arachide, (b) : sorgho à Nioro du rip, (c) : sorgho à Bambey, (d) : riz pluvial, (e) : maïs. Extrait de Nicou *et al.* (1993), tome II, D.3.

plus important sur sol labouré permet une utilisation plus complète des réserves hydriques du sol par la culture, spécialement dans les couches profondes, près du front racinaire (Chopart et Nicou, 1976, tome II C.7). On a, en conséquence, un **meilleur comportement en période sèche**, en culture de riz pluvial, de sorgho et de mil (Chopart et Nicou, 1976, tome II C.7). Il a même été possible, dans certains cas, de relier la biomasse racinaire et le rendement utile de plusieurs cultures (figure n° 18, tome II, D.3). Il n'y a pas de relations causales directes et encore moins uniques entre la densité d'occupation du sol par les racines et le rendement. La multiplication des exemples montre quand même le rôle des racines dans l'élaboration du rendement, notamment dans des milieux à alimentation hydrique insuffisante ou précaire comme c'était le cas ici. Toutes les relations de la figure n°18 (voir tome II, D3) ont été obtenues dans des sols fertilisés sans contrainte minérale majeure.

Même si des bilans hydriques n'ont pas pu être réalisés dans ces expérimentations anciennes, **la liaison entre l'enracinement et la production peut être imputée, avec une bonne probabilité, à une variation de l'alimentation hydrique allant dans le même sens que celle de l'enracinement.**

Une étude menée dans des lysimètres adaptés à des études racinaires (évitant une croissance préférentielle le long des parois) a montré que **seule une partie du système racinaire du riz est nécessaire à l'alimentation hydrique** de la culture, si celle-ci est suffisamment bien réapprovisionnée (Chopart et Nicou, 1976, tome II, C.7). Mais, en dessous d'une certaine quantité de racines, la plante entre en stress hydrique. On en conclut en particulier, qu'en cas d'assèchement des couches superficielles, la partie profonde du système racinaire peut contribuer seule à l'alimentation hydrique, **mais qu'il faut pour cela une quantité suffisante de racines dans la couche maintenue humide**, de l'ordre de 50 % de la biomasse totale dans les conditions de cette étude en lysimètres (Chopart et Nicou, 1976, tome II C.7). Ceci confirme, en milieu contrôlé, le rôle des racines profondes dans l'alimentation hydrique des cultures. **Il faut donc tendre** (par voie agronomique ou génétique) vers un **idéotype de système racinaire profond, avec une répartition homogène des racines.**

Ces résultats incitent à réfléchir à la signification de la notion de réservoir en eau utile dans le sol. Il apparaît difficile, voire erroné, de le dimensionner simplement par la profondeur de la dernière racine. Il faudrait introduire un paramètre lié à la densité d'exploration racinaire (Chopart et Nicou, 1976, tome II, C7)



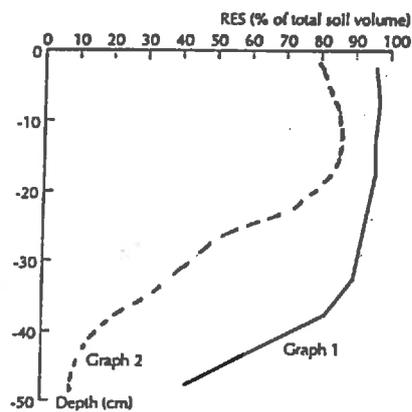
Estimation of the maximum volume of water extracted from the soil by the roots between the surface and the root front ($\text{cm}^3 \text{ water/cm}^3 \text{ soil}$), during a long period of drought (SD).

□ Graph 1. Laboratory analyses. Difference between soil water content at a tension of -50 kPa and that at -1 600 kPa.

□ Graph 2. On site soil drying (SD), difference between soil water content at a tension of -50 kPa and water content in the field at the end of a period of drought (end of flowering).

Comment: Graph 1 indicates uniform moisture characteristics of the soil studied. The vertical variability of water use in the field appears, therefore, to depend principally on root distribution.

A

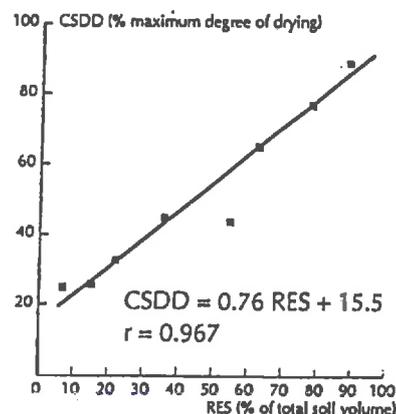


Quantity of soil available for root uptake (RES) as a percentage of total soil volume, in 5 cm layers between the surface and a depth of 50 cm. Comparison between 2 methods of calculation:

□ Graph 1. Mean RES calculated from total root length in 5 cm layers (400 cm^2).

□ Graph 2. Mean RES of each 25 cm^2 surface root-counting unit (16 surface units per 5 cm soil layer, that is 400 cm^2).

B



Relation between the amount of soil available for root uptake of water (RES) at depth z and the degree of soil drying (SDD), at the end of the drought period. RES_z is correlated with CSDD_z (calculated degree of soil drying: mean of SDD_z and $\text{SDD}_{z+10 \text{ cm}}$).

C

Figure n°19 Relations entre l'exploration racinaire du sol et la capacité du maïs à extraire l'eau en phase d'assèchement du profil. (A): Volume d'eau extrait du sol en fin d'assèchement entre la surface et le front racinaire, (B): profils de taux d'exploration racinaire (RES): RES moyen calculé à partir de la densité de longueur moyenne par couches de 5 cm (—) et moyenne des RES calculés à partir des longueurs de chaque carré de mesure de 5 x 5 cm (- - -), (C): relation entre le taux d'exploration racinaire (RES) et le degré d'assèchement maximum du sol. Extrait de Chopart, 1996, tome II, C.3.

332 Tests et utilisation du modèle de taux d'exploration racinaire

Les méthodes d'études racinaires présentées ci-dessus ont été testées en prenant en particulier comme critère d'évaluation leur aptitude à expliquer l'alimentation hydrique et minérale des cultures.

a) Test du modèle (eqs. (22) ou (23)) pour expliquer l'accès à l'eau du maïs entre deux pluies

En Côte d'Ivoire, lors d'une étude du système racinaire du maïs sur un site instrumenté pour mesurer le bilan hydrique (mesures tensio-neutroniques), une période sans pluie de 15 jours a entraîné un stress marqué de la culture. A la fin de cette période, la culture a utilisé toute l'eau accessible à son enracinement. Durant cette phase, des mesures racinaires et d'évapotranspiration ont été réalisées. On a ainsi obtenu (Chopart, 1995b; Chopart, 1996, tome C.3) :

- un profil d'eau réellement utilisée à partir des mesures tensio-neutroniques (figure n° 19 A)
- un profil de volume de sol utilisable pour l'extraction racinaire de l'eau, à partir des profils racinaires, avec une distance maximale de migration de l'eau vers la racine de 10 cm (figure n° 19 B). On a utilisé pour cela les équations (22) ou (23) dans chacun des cubes de 5 x 5 x 5 cm représentatifs des carrés de comptage.

Il en ressort (figure n° 19 C) une très bonne relation linéaire entre les valeurs de volume de sol utile pour l'extraction de l'eau et les volumes d'eau réellement utilisée. Ce résultat peut être considéré comme une forme de validation de la valeur retenue pour la distance maximale de migration de l'eau entre le sol et la racine ($r = 10$ cm), de la méthode d'évaluation des longueurs racinaires et *in fine* du modèle, pourtant très simple, utilisé pour évaluer le volume de sol utile pour l'alimentation de la plante (eqs. n° 22 et 23).

b) Etude des rôles respectifs du sol et des racines dans l'alimentation azotée du maïs

En suivant à la fois les dynamiques d'exploration racinaire et d'extraction de l'azote total du sol dans une expérimentation au Burkina Faso, on a évalué, avec P. Siband, la distance maximale de migration de l'azote du sol vers la racine (Siband, 1999). Cette distance d'environ 8 mm est comparable à celle obtenue sur le même type de sol par une méthode de laboratoire très différente, permettant une découpe du sol en très fines tranches (Reydellet, 1997), ou dans un autre milieu tropical, suivant une méthode proche (N'cho, 1991). Ce résultat peut donc être considéré comme un test positif de l'intérêt de l'approche.

Dans les milieux étudiés, le faible rayon d'accès à l'azote du sol est discuté par Siband (1999). Celui-ci l'attribue, en simplifiant, à l'importance de l'effet rhizosphérique dans l'approvisionnement de la plante en azote. Contrairement à l'observation courante, la minéralisation de l'azote total et sa transformation en azote assimilable se fait ici essentiellement autour des racines. Il y règne un milieu plus favorable à la présence des micro-organismes responsables de la minéralisation et de la nitrification (Siband, 1999). Dans ces conditions et en absence de fertilisation azotée dans l'année, la consommation en azote du maïs est en premier lieu sous la dépendance de la longueur du système racinaire, puis de la disponibilité de l'azote du sol, et en dernier lieu de la richesse du sol en azote (Siband 1999). L'auteur en conclut que dans les milieux concernés, la façon la plus prometteuse d'améliorer l'alimentation azotée passe par des systèmes de culture assurant à la plante une bonne capacité d'exploration racinaire.

4 APPLICATION A L'ETUDE DES RELATIONS ENTRE MODES DE GESTION DU SOL, ETAT DE LA PARCELLE, ALIMENTATION HYDRIQUE ET RENDEMENT

41 ANALYSE DE LA VARIABILITE DU RENDEMENT ET DES EFFETS DES MODES DE GESTION DU SOL

Au début du chapitre II, deux exemples (figure n° 2 et tableau n° 5) ont illustré la grande variabilité de la production et de l'effet des modes de gestion étudiés que l'on peut rencontrer en Afrique de l'Ouest, la pluie n'étant pas une bonne variable explicative de la production et des variations de celle-ci. On essaiera ici de mieux comprendre les résultats en se servant de variables intermédiaires entre pratique culturale et rendement, issues des outils de mesure et d'analyse venant d'être présentés.

411 Variabilité inter-annuelle à Bambey, Sénégal

Les conditions d'alimentation hydrique de l'arachide ont été évaluées pour chacune des 20 années (Chopart et Nicou, 1989) en simulant, avec le modèle de bilan hydrique, PROBE, décrit plus haut (par.143) les termes du bilan hydrique (par périodes de 5 jours), l'accent étant particulièrement mis sur :

- le taux de satisfaction des besoins en eau (ETR/ETM),
- le terme d'excès d'eau (D), nommé par commodité drainage, mais qui peut, ici, intégrer le ruissellement, celui-ci restant faible dans le sol très sableux support de l'étude.

Des liaisons ont été établies entre ces facteurs hydriques et la production d'arachide (Chopart et Nicou, 1989). La prise en compte de l'ETR/ETM moyen au cours du cycle et du drainage total (D) permet ainsi d'obtenir une régression multiple entre ces deux facteurs et le rendement (R) de graines d'arachide nettement meilleure que la simple relation avec la pluie (eqs. (3) et (4)).

Pour les deux traitements STD (semis direct) et LB1 (labour)

$$R(\text{SDT}) = 2850 (\text{ETR/ETM}) - 2.7 D - 280 \quad (27)$$

$$R^2 = 0.46 \quad P < 0.001$$

$$R(\text{LB1}) = 3700 (\text{ETR/ETM}) - 3.2 D - 417 \quad (28)$$

$$R^2 = 0.48 \quad P < 0.001$$

où D est le drainage total (mm) pendant le cycle cultural.

Il apparaît un effet défavorable du terme D sur la production. Ceci peut être dû à des phénomènes de lixiviation, de réduction temporaire de l'aération du sol. Les années à forte pluviosité et donc à fort drainage sont aussi souvent celles où le rayonnement solaire est le plus faible. Il faut donc considérer ici D comme un indicateur synthétique de différentes conditions d'environnement pédo-climatique de la plante qui font varier le rendement en relation inverse de D. **Les années les plus pluvieuses ne sont pas forcément les meilleures pour le rendement de l'arachide.**

On notera que le pH du sol a évolué au cours des 20 ans de l'essai. Il a baissé entre le début de l'essai en 1960 après une longue jachère (pH 6.7) et 1967 où il atteint 5.0. En 1969 et 1970, des chaulages (1600 k/ha en deux ans, voir figure n° 2) ont permis de remonter le pH à 6.3 en 1972. Il est ensuite progressivement redescendu pour atteindre 5.6 en 1978. Ces observations ont conduit à introduire, dans le modèle, un autre indicateur synthétique, le nombre d'années de culture continue (T), soit après la mise en place de l'essai, soit après des apports de chaux. En éliminant les deux années où ils ont été effectués, on a obtenu les nouvelles relations suivantes (voir tome II, C8) :

$$R(\text{SDT}) = 1600 (\text{ETR/ETM}) - 1.8 D - 94 T + 280 \quad (29)$$

$$R^2 = 0.73 \quad P < 0.001$$

$$R(\text{LB1}) = 2450 (\text{ETR/ETM}) - 1.8 D - 140 T + 970 \quad (30)$$

$$R^2 = 0.85 \quad P < 0.001$$

Ainsi, la prise en compte de la variable T a permis d'améliorer notablement la capacité du modèle

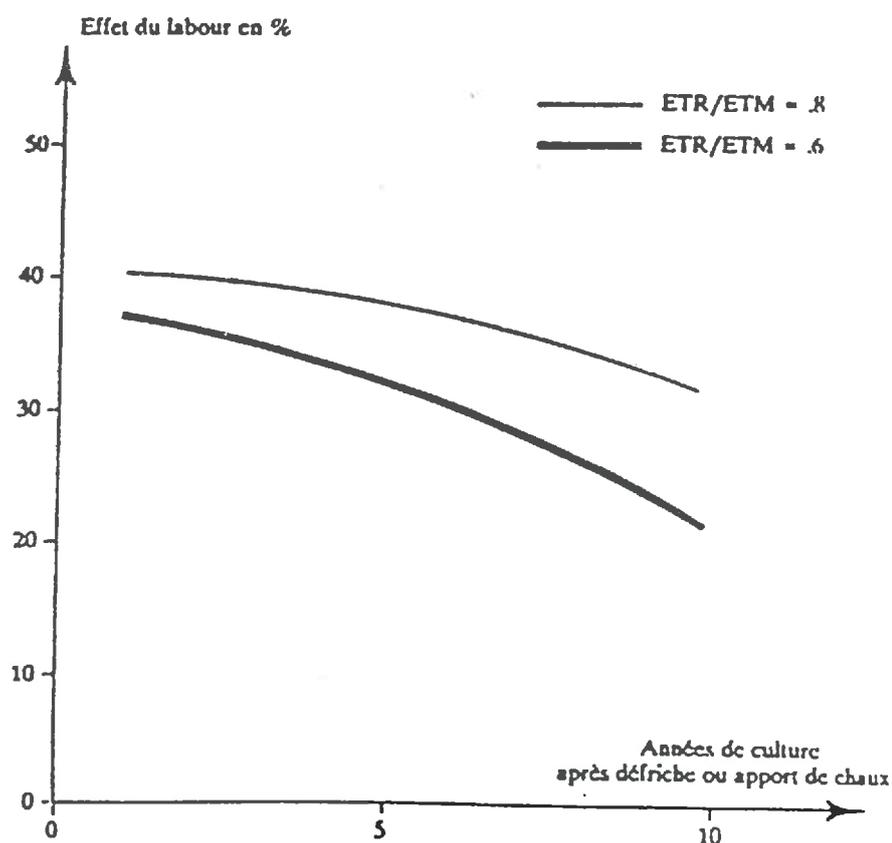


Figure n° 20 Analyse des résultats de l'expérimentation de longue durée de Bambey. (Sénégal) Simulation de l'effet du labour en fonction du nombre d'années de culture d'arachide après défriche ou apport de chaux et du taux de satisfaction des besoins en eau, d'après les relations (29) et (30). Extrait de Chopart et Nicou (1989) et Chopart *et al.* (1991, tome II, B.8).

à expliquer les variations de rendement. Avec les variables ETR/ETM, D et T, on explique, sur le terrain labouré, 85 % de la variabilité inter-annuelle du rendement.

Le pH, lié au nombre d'années de culture après le début de l'essai ou l'apport de chaux, atteint assez vite des valeurs qui peuvent induire l'apparition d'aluminium échangeable. On en a en effet trouvé, en 1978, des quantités non négligeables de l'ordre de 0.2 meq/100 g en surface et de 0.6 meq/100 g en dessous de 20 cm. En 1978, 7 ans après l'apport de chaux, dans un sol à pH 5, l'aluminium échangeable est légèrement plus élevé sur sol labouré (LB1) que sur le témoin (SDT). Ceci peut être un frein à la croissance racinaire (Care, 1998). Des mesures d'enracinement, effectuées en 1978, entre 0 et 30 cm, ont montré une absence de différence entre les densités racinaires obtenues dans les parcelles labourées (LB1) ou en travail traditionnel (SDT), alors que l'on observe généralement une plus grande densité sur les sols labourés (cf CH. III, par 323). On peut y voir là un effet de l'aluminium échangeable.

La modélisation du bilan hydrique permet de quantifier le rôle du climat à travers l'ETR/ETM et le drainage (D). Après avoir éliminé le bruit de fond, lié à la variabilité aléatoire du climat, on a mis en évidence une évolution plus structurée du rendement et de l'effet du mode de travail du sol étudié en fonction du nombre d'années de culture. Pour cela, on a utilisé le modèle régressif d'explication du rendement pour les deux traitements agronomiques (éqs. 29 et 30) auquel on a appliqué des valeurs fixes d'ETM et de D (D=0, ETR/ETM de 0.6 ou de 0.8). Dans ces conditions, le rendement simulé tend à diminuer d'environ 100 kg ha⁻¹ an⁻¹ sur les parcelles en semis direct (SDT) et de 140 kg ha⁻¹ an⁻¹ sur le sol labouré (LB1). L'effet du labour tend donc à diminuer au cours du temps (figure n° 20). La comparaison entre les sorties du modèle obtenues avec ETR/ETM de 0.6 et de 0.8 permet également d'observer que la technique de travail du sol étudiée n'a aucun effet contre-aléatoire du risque hydrique (figure n°20). Ces analyses des variations de rendement et des effets des états du sol n'auraient pas été possibles au vu des seuls résultats de production (figure n°2), même couplés à des analyses de sol et de pluie (Chopart *et al.*, 1991, tome II, B8).

412 Variabilité spatiale du rendement sur un même site, la même année. Bouaké, 1989

Comme dans l'exemple précédent, les grandes variabilités des rendements de maïs et de l'effet du travail du sol (paragraphe n° 1) ne peuvent s'expliquer (tableau n° 5) par la simple variable pluie (Chopart, 1990b tome II D.2; Chopart, 1990c; Chopart et Koné, 1994, tome III, D4). Sur deux des quatre sites, les composantes du bilan hydrique ont été évaluées séparément par des mesures tensio-neutroniques et par le modèle PROBE. Les deux méthodes ont donné des résultats

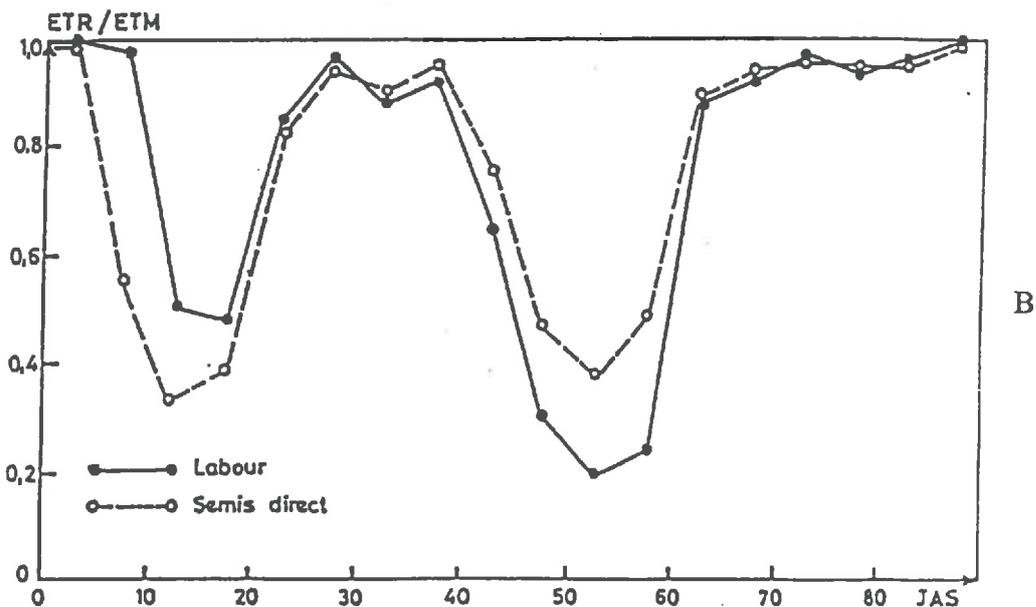
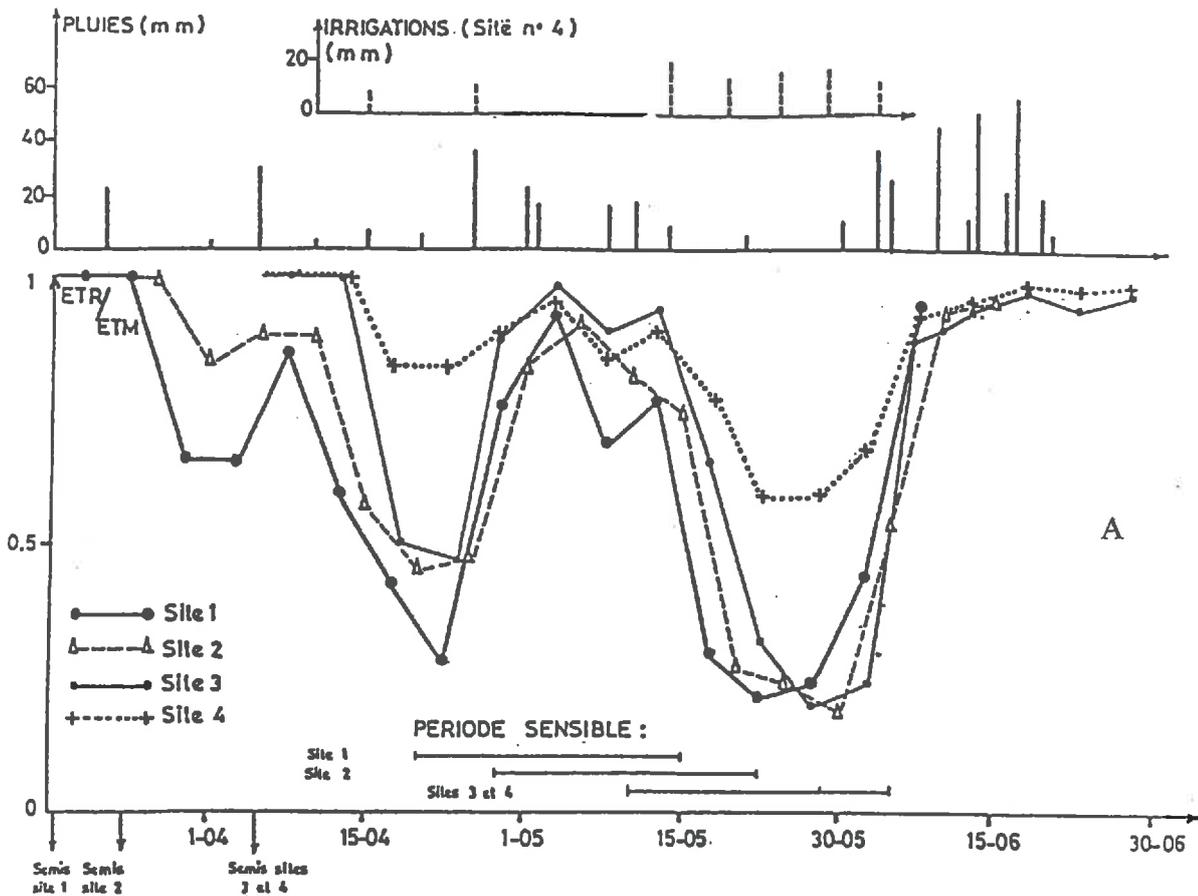


Figure n° 21 Analyse des résultats des expérimentations en maïs à Bouaké (Côte d'Ivoire) en 1989. (A) Simulation du bilan hydrique (PROBE) : (A) évolution des taux de satisfaction des besoins en eau (ETR/ETM) sur les 4 sites à des dates de semis différentes, (B) évolution de l'ETR/ETM sur les traitements en labour (LMS) et en semis direct (SDP1). Extrait de Chopart (1990 b), tome II, D2.

suffisamment comparables pour valider le modèle dans les conditions expérimentales et l'utiliser sur les quatre sites (figure 4B). Il existe une certaine liaison entre le **rapport ETR/ETM moyen au cours du cycle et la production de tiges + feuilles**. En revanche, ce facteur, pas plus que la pluie, n'est explicatif des variations de rendement et encore moins du travail du sol (tableau n° 5).

Il a donc fallu procéder à une **analyse plus détaillée des conditions d'alimentation hydrique au cours du cycle**, et de la position des périodes de sécheresse par rapport au stade de plus grande sensibilité du maïs au stress hydrique (épiaison, floraison). Pendant la période de culture entre le 15 mars et le 15 juin, il y a eu deux périodes de nette réduction des pluies, entre le 7 et le 22 avril puis entre le 15 mai et le 3 juin. Ces périodes de **déficit pluviométrique** ont correspondu à **des stades de végétation différents** du maïs des quatre essais semés à des dates échelonnées sur trois semaines (tableau n° 5). L'analyse des **termes du bilan par périodes de 5 jours** (figure n° 21 et Chopart 1990b,c) permet d'**expliquer le très faible rendement sur le site n° 3**, spécialement sur le traitement labouré (LMS), (200 kg/ha), comparativement à celui des sites 1 et 2 (1090 et 1650 kg/ha respectivement). En effet, **la période de sécheresse de la fin du mois de mai a coïncidé avec la période d'épiaison-floraison, alors que, sur les autres essais, cette phase critique s'est située à une période plus pluvieuse.**

Sur le site n° 3, **en début de cycle** (photo n° 14), les plantules cultivées dans un sol labouré (LMS) ont une croissance plus rapide et un **état hydrique meilleur** que celles traitées en semis direct (SDP1). Les développements végétatifs des parcelles traitées avec ces deux modes de gestion du sol sont nettement différenciés jusqu'à l'épiaison. Les **différences sont donc très marquées**, en faveur du sol labouré, **lorsqu'apparaît la seconde période de sécheresse**. Les plantes ont alors fortement souffert, celles venant sur le sol traité en LMS comme celles venant sur SDP1. Les résultats de la modélisation sont conformes aux observations de terrain (photo n° 15). Mais le peuplement végétal sur LMS **a souffert plus vite et plus fort que celui traité en semis direct.**

Ces **conditions différentes d'alimentation hydrique** sur les deux traitements **ont pu être simulées** correctement grâce au modèle PROBE (figure n° 21). Pour cela, sur le traitement labouré, **la vitesse de progression du front racinaire** est plus grande en début de cycle, mais s'arrête plus tôt, conformément aux mesures racinaires précédentes faites sur le site et sur des sites voisins (Chopart, 1985,1995b). Parallèlement, **les besoins en eau des plantes** (Dancette, 1983) croissent légèrement plus vite sur les parcelles labourées que sur les parcelles en semis direct, en liaison avec leur développement (Chopart, 1990b).

L'analyse des variations des termes du bilan hydrique des autres essais permet également de comprendre les variations de rendements et de l'effet d'un état du sol consécutif au labour. Le site n° 4 est seulement différencié du site n° 3 par un apport d'eau complémentaire de 100 mm (irrigation). Sur le site n° 4, les rendements sont nettement plus élevés (3850 kg/ha) avec un effet positif d'un état du sol consécutif à un labour (LMS). L'irrigation a permis de subvenir aux besoins en eau des plantes supérieurs sur les parcelles labourées et d'y maintenir un rapport ETR/ETM suffisant pour que l'effet favorable du labour sur le sol et les racines se traduise par un effet positif sur le rendement. **Les écarts de rendements et d'effets des techniques culturales observées sur les 4 essais situés sur des sites voisins, placés dans les mêmes conditions expérimentales (sauf les dates de semis et une irrigation d'appoint sur l'un), ne peuvent donc s'expliquer que grâce à une analyse du bilan hydrique (Chopart *et al.* 1991).**

42 CONTRIBUTION AU RAISONNEMENT DES EFFETS ET DE L'INTÉRÊT DES MODES DE GESTION DU SOL

421 Les modes de travail du sol conventionnel (labours)

Les deux exemples précédents ont permis de montrer comment, **avec quelques outils simples, il est possible de mieux définir les relations entre l'état du sol modifié par les pratiques culturales, le climat et la production.** On peut même esquisser des schémas d'organisation de ces relations.

a) Essai de longue durée de Bambey (Sénégal)

A l'échelle d'une année, on assiste aux effets classiques du travail du sol (LB1) dans ce milieu. Il y a, en particulier, un effet favorable sur l'état physique du sol entraînant un meilleur enracinement améliorant l'accès à l'eau mais aussi augmentant les besoins en eau. Il y a donc un potentiel de rendement plus élevé sur sol labouré, mais pas véritablement d'effet contre aléatoire. Le rendement est néanmoins amélioré.

La répétition de cultures d'arachide entraîne, spécialement sur labour, une plus grande contribution des réserves minérales du sol et une baisse de pH, avec une concentration en Al échangeable plus grande. Ceci crée progressivement une contrainte chimique à la croissance racinaire. L'état physique du sol se maintient, mais l'état chimique se dégrade. La résultante de ces deux effets contraires aboutit à une **différenciation faible ou nulle des systèmes racinaires des deux modes de gestion du sol.** On a donc un accès comparable à l'eau et aux éléments minéraux et, *in fine*, **une baisse de rendement et des écarts entre semis direct et travail du sol.** Cet effet



Photos n° 14 et 15. Essai de Bouaké en 1989, site n° 3, culture de maïs, à droite en semis direct (SDP1) et à gauche après labour (LMS). Photo n° 11 : pendant la sécheresse de début de cycle, photo n° 12 : pendant la sécheresse au début de la floraison.

est réversible puisque l'apport de chaux permet de revenir à un état du sol proche de celui existant à la mise en place de l'essai.

b) Série d'essais à Bouaké (Côte d'Ivoire) en 1989.

Le fonctionnement à l'échelle de l'année suit le même schéma que celui de Bambey, mais on s'adresse ici à une culture (le maïs) plus sensible à la sécheresse et aussi plus réactive à une amélioration des conditions physiques du sol. On a ainsi rencontré ici, **une situation où l'état du sol consécutif au labour (LMS) a un effet**, par rapport à celui consécutif au semis direct (SDC1):

- **particulièrement positif** en début de cycle, lié à un meilleur comportement du maïs au cours d'une première période de sécheresse (meilleur accès racinaire à l'eau et aux nutriments), entraînant un développement végétatif nettement plus important,
- **spectaculièrement négatif** à partir de la floraison, du fait de besoins en eau plus importants des plantes avec un épuisement plus rapide des réserves lors d'une période de sécheresse sévère survenue à un stade où les enracinements sont devenus proches d'un mode de gestion à l'autre.

L'établissement du **bilan hydrique** (même par un modèle très simple) permet d'**accéder à des variables plus explicatives** des liaisons complexes entre le sol modifié par les pratiques culturales et le rendement que celles strictement climatiques. Mais, pour cela, il faut avoir des informations fiables sur des caractéristiques du sol (capacité de stockage de l'eau, aptitude au ruissellement) et sur celles de la plante, en particulier **la dynamique racinaire**.

La variabilité des **effets des états du sol consécutifs au labour sur le rendement** peut aller jusqu'à un effet **négatif**. Cet effet négatif du labour observé en 1989 ne s'est d'ailleurs pas appliqué uniquement à cette technique mais aussi à d'autres facteurs d'intensification comme la fertilisation et le fumier (Chopart, 1995a). Dans le site n°3 (essai techniques de gestion du sol et résistance à la sécheresse, par. 11 du chapitre II), **l'effet négatif de l'engrais est même encore plus marqué que celui du labour**. Ceci s'explique d'ailleurs par un accroissement plus grand des parties aériennes dû à l'engrais, augmentant la demande en eau, sans effet marqué sur les racines, donc sans augmentation de l'offre en eau (Chopart, 1995c). Il faut donc voir cet effet négatif du labour comme celui d'un facteur d'intensification parmi d'autres.

Ces résultats peuvent **remettre en cause l'intérêt des facteurs d'intensification**, et de certains modes de travail du sol en particulier, **si la probabilité de trouver cette situation atteint un certain seuil**. C'est pourquoi, partant des résultats de Bouaké ayant amené à un effet négatif du labour en liaison avec un risque climatique, on a tenté de :

- caractériser la représentativité des conditions climatiques ayant conduit à ces résultats,
- de replacer les résultats obtenus pendant deux ans dans leur contexte agroclimatique.

L'étude fréquentielle du bilan hydrique a été réalisée avec un modèle proche de PROBE sur une période de trente ans. Les variables d'entrée liées au sol et à la plante sont identiques à celles retenues pour la simulation de 1989. La date de semis a été déterminée à partir de critères climatiques et de durée de réalisation du travail du sol (Chopart et Koné, 1994). **A Bouaké, le risque de rencontrer une situation comparable à celle ayant entraîné un effet négatif du labour en 1989 et 1990 est de une année sur six.** Ce risque est plus faible que peut le laisser croire l'observation du phénomène deux années successives. Ceci montre l'intérêt de situer des résultats ponctuels à l'intérieur d'une gamme de variabilité climatique plus large.

Certains travaux du sol ont un effet particulièrement intéressant sur l'économie de l'eau. Un labour réalisé en fin de saison des pluies (LB3), permet à des réserves hydriques non négligeables de rester stockées dans le sol pendant la saison sèche. Ainsi, au Sénégal, en fin de saison sèche, on peut trouver des différences de 30 mm d'eau utile sur un sol labouré après la récolte, par rapport à un sol ayant été traité suivant un mode de gestion traditionnel (Nicou et Chopart, 1979). Ceci est attribué à un assèchement plus rapide du sol dans la couche labourée qui en réduit la conductivité hydraulique et, par conséquent, l'évaporation des couches sous-jacentes.

c) Etudes des modes de gestion conventionnels chez les agriculteurs.

Nous avons pu **mettre en oeuvre nos outils** pour étudier les effets du travail du sol réalisé par les paysans eux mêmes. On a, ainsi, effectué un diagnostic de l'état physique du sol dans un dispositif **en grandes parcelles cultivées par des paysans** en Côte d'Ivoire, suivant différents modes de gestion des sols. Les résultats d'infiltrabilité du sol avec le TRIMS et de profils racinaires de riz, vont dans le même sens que ceux obtenus en station. Les états du sol consécutifs à un travail profond (LMS) sont plus favorables que ceux issus des modes de gestion en travail superficiel (LB2, TSD), en particulier sur l'infiltrabilité du sol et sur les systèmes racinaires (Chopart, 1995).

422 Les nouveaux modes de gestion du sol

Les techniques conventionnelles de labour ont d'abord servi à illustrer la capacité des outils de recherche présentés à permettre une meilleure compréhension des effets d'une pratique culturale. Ce sont elles, en effet, qui ont fait l'objet de travaux les plus complets publiés ces dernières années. Néanmoins, il semble que **la même démarche, les mêmes outils** et schémas et les mêmes analyses fréquentielles du bilan hydrique **peuvent être mis en oeuvre dans le cas** de l'analyse des systèmes

fondés sur le **semis direct et les plantes de couverture**. Des travaux relatifs à la technique du semis direct avec paillage du sol ont été initiés avant 1980, au Sénégal, (Chopart *et al*, 1979, tome II B.5); Nicou et Chopart, 1979 tome II D.5 et photo n° 3) et en Côte d'Ivoire (Chopart et Koné 1985, tome II, D6; Chopart, 1989a et photo n° 4). Les principaux résultats sont présentés ci-dessous.

a) Techniques de semis direct avec paillage

Les techniques de type SDP1 et SDP2 ont été testées dans un sol sableux du Sénégal. Les pailles de mil laissées sur le terrain après la récolte forment une biomasse de l'ordre de 4 à 5 t/ha dans un système de type SDP1 (photo n° 3), soit, au moment de leur application sur le terrain, une couverture du sol de 50% environ (Chopart, 1989a). Les résultats obtenus (Chopart *et al*, 1979, Nicou et Chopart, 1979, voir figure n° 22) sont synthétisés après:

Les pailles appliquées sur un sol maintenu sans herbe, permettent une certaine réduction des pertes d'eau pendant la saison sèche, de l'ordre de 15 % par rapport à un sol non paillé et non désherbé. Il y a également une amélioration des **systèmes racinaires** (+20 %), une réduction de l'**évapotranspiration** pendant la saison des pluies (environ - 10 %). Mais ces effets semblent limités au **début du cycle cultural**. Ensuite, les pailles se décomposent et les effets sont moins nets. Lorsque le sol reçoit un paillage d'environ 4 t/ha (SDP1), les conséquences sur la végétation ne s'observent qu'en début de cycle. A la récolte, il n'y a plus de différence entre les deux situations paillées et non paillées aussi bien sur les parties végétatives de l'arachide que sur le rendement.

C'est seulement sur un sol bénéficiant d'un **paillage presque complet** (avec 8 à 10 t/ha de pailles) que l'on commence à voir des **effets durables sur le sol et l'hydrodynamique** avec des conséquences sur la **production**. Si l'on applique un paillage complet du sol (SDP2 avec 12 t/ha de pailles) après avoir réalisé un labour, on conjugue les effets positifs des deux techniques et on obtient, par rapport à la pratique du paillage simple (4 t/ha), des effets marqués sur les pertes d'eau en saison sèche (-40 %), les systèmes racinaires (+ 22 %), l'efficacité de l'eau consommée (+ 70 %), la production de gousses (+ 60 %).

Ce dernier mode de gestion (SDP2, tableau n°1) a donc des effets spectaculaires sur les paramètres du sol et du peuplement végétal, mais la masse des pailles apportée rend sa faisabilité réduite. En revanche, ce modèle est une préfiguration des systèmes plus récents (SDC2, tableau n° 1) fondés sur un labour à la mise en place du système, suivi par la suite d'un semis direct dans un paillage permanent produit par une plante de couverture.

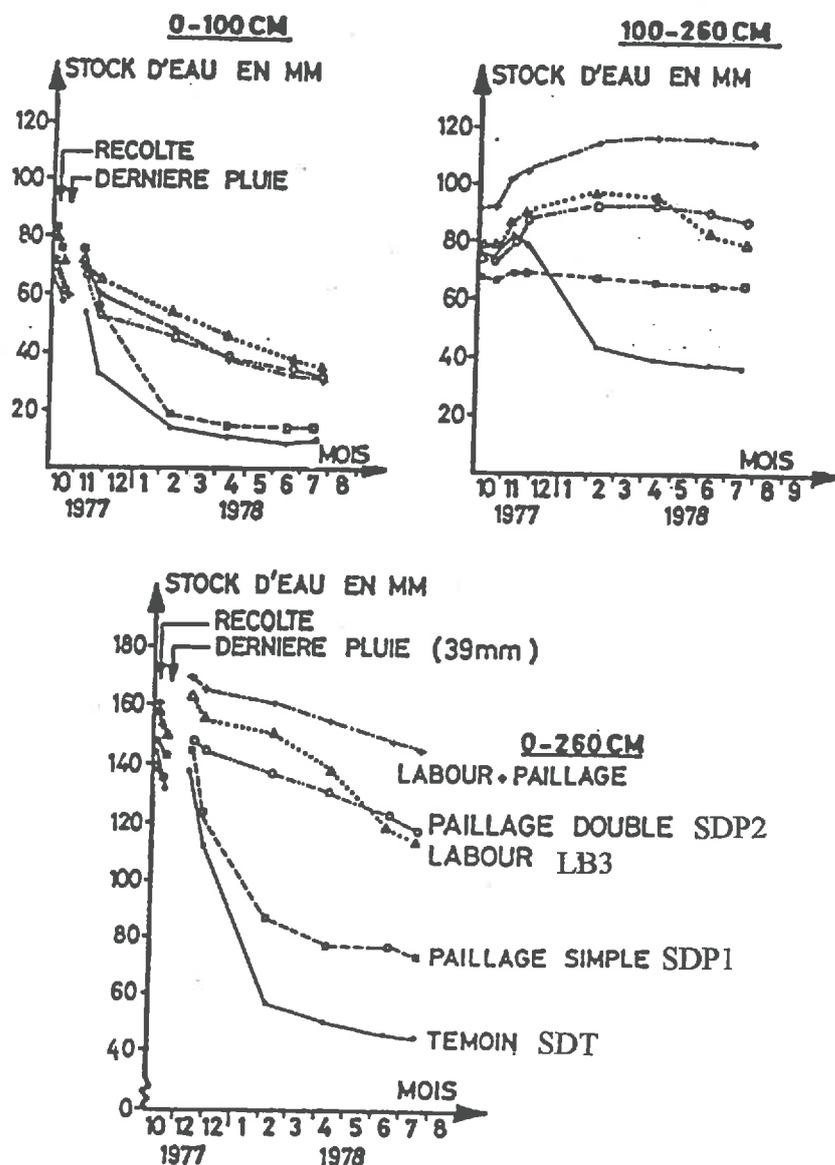


Figure n° 22 Evolution des stocks d'eau pendant la saison sèche dans des parcelles de Bambeby (Sénégal) soumises à des modes de gestions du sol différents, incluant le semis direct avec paillage. Le traitement Labour + paillage : labour après la récolte de type LB puis paillage complet du sol (tiges de mil) sur la surface labourée. Extrait de Chopart *et al.* (1979), tome II D.5.

b) Techniques de semis direct avec paillage du sol avec des tiges de maïs en Côte d'Ivoire.

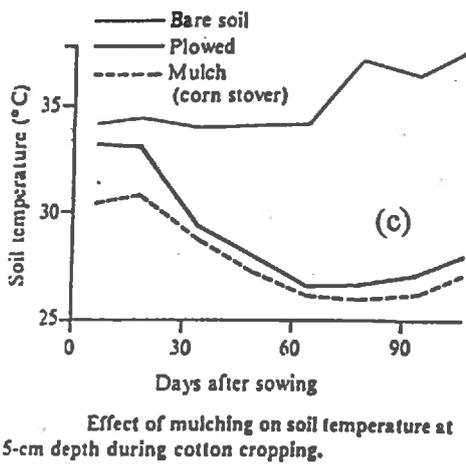
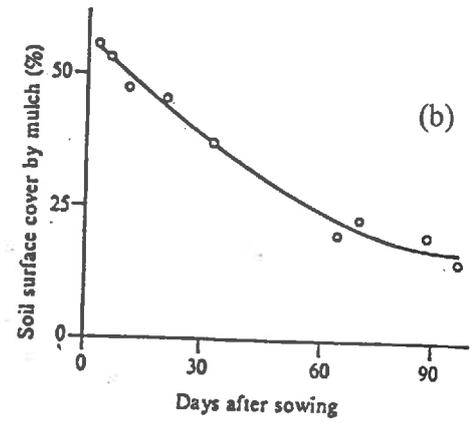
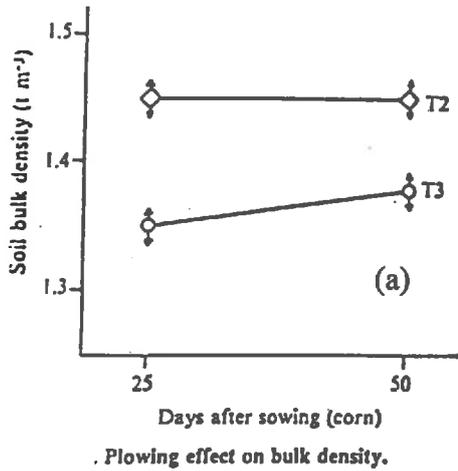
En Côte d'Ivoire, des systèmes de semis direct ont été étudiés en sol sablo-argileux, soit en culture manuelle avec des itinéraires techniques du type SDP1 (photo n° 4), soit en culture motorisée (TLP, voir tableau n°1), en les comparant à des systèmes incluant le labour classique (LMS) qui servent ici de "témoin". Les tiges de maïs laissées sur le sol (environ 5 t/ha) ne couvrent celui-ci qu'à 50 % et ce taux de couverture décroît très vite pour atteindre 20 % deux mois après l'apport (figure n°23b). Dans ces conditions et **en comparant les états du sol créés respectivement par le labour et le semis direct avec paillage, on observe (Chopart, 1989a) des effets du semis direct favorables** sur la température du sol en début de cycle (- 3° pendant 20 jours, figure n° 23c) et l'évaporation directe de l'eau du sol pendant les premières semaines de la culture de cotonnier (Chopart et Koné, 1985). Mais il existe aussi **des effets défavorables**, sur la densité apparente du sol entre 0 et 20 cm (figure n°23a), l'infiltration de l'eau (déjà cité au par. 311), la densité racinaire du maïs (-35%, Chopart, 1989a, tome II, B3), et du cotonnier (-20 % environ), l'efficacité de l'eau consommée par le cotonnier et le maïs (figure n° 23 d), le rendement du maïs et du cotonnier (figure n°23 e).

Le comportement du cotonnier cultivé en semis direct sur sol protégé par des pailles de maïs est donc comparable à celui de l'arachide au Sénégal : **un paillage "réaliste" permet de stocker un peu plus d'eau mais celle-ci est mal utilisée à cause de systèmes racinaires moins bien développés.**

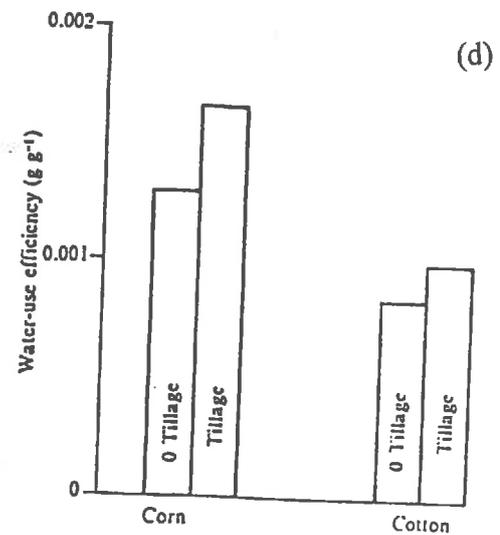
c) Techniques de semis direct reposant sur l'utilisation de plantes de couverture

Ces nouveaux systèmes (avec des modes de gestion du sol de type SDC1 et SDC2, d'après le tableau n°1) ont été introduits en Côte d'Ivoire à partir de 1987 et des dispositifs mis en place en milieu réel dans le nord du pays (Charpentier, 1991, 1995). **Nous y avons mis en oeuvre les mêmes outils** que ceux utilisés précédemment (bilan hydrique simulé, infiltrométrie TRIMS, études racinaires) **dans le but de contribuer à la compréhension du fonctionnement de ces nouveaux systèmes de culture.**

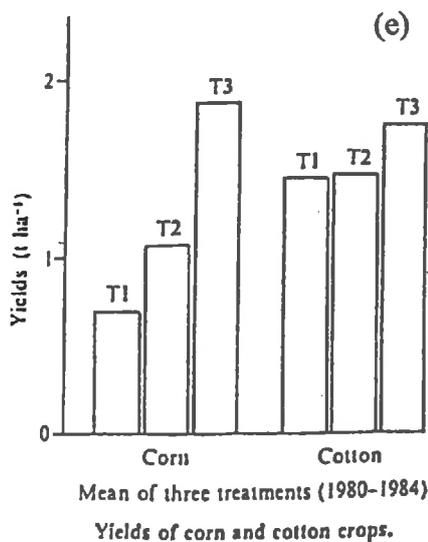
Par exemple, en 1996, un **diagnostic de l'intérêt d'un travail du sol avant la mise en place d'une plante de couverture (*Pueraria phaseoloides*)** a été porté. Malgré une certaine variabilité, liée aux conditions expérimentales, ces résultats (tableau n° 8) confirment ceux obtenus précédemment (sur ce même dispositif), relatifs aux effets favorables d'un travail profond sur l'état du sol et l'enracinement des cultures. Ils permettent surtout de dégager deux éléments nouveaux



Percentage of soil cover by a corn stover mulch during cotton cropping.



Water-use efficiency of corn and cotton, with (T3 and T4) and without (T1 and T2) soil tillage.



T1 : SDP1
 T2 : TLP
 T3 : LMS

Figure n° 23 Comparaison des effets du labour (T3) et du semis direct avec paillage (T1, T2 à Bouaké (essai semis direct avec paillage G13) sur: (a) : la densité apparente du sol dans la couche superficielle (0-20 cm), (b) : le pourcentage de sol couvert par le paillage (tiges de maïs), (c) : la température du sol à 5 cm, (d) l'efficacité de l'eau consommée par le maïs et le cotonnier, (e) les rendements de maïs et de cotonnier. Extrait de Chopart, 1989, tome II,B.3

- sur un sol dégradé par des passages de pulvérisateur (TSD, voir tableau n° 1) les années précédentes, un simple passage de tiller ne permet pas une remise en état de celui-ci. Ceci se manifeste particulièrement sur les racines de la plante de couverture. Or, une des fonctions principales attribuées à cette dernière est, par son enracinement, de construire ou de maintenir un état physique favorable.

- 8 mois après l'implantation de la plante de couverture, les caractéristiques physiques et hydrodynamiques sont légèrement améliorées, mais cela est surtout net sur le traitement LMS où un labour à la mise en place du *Pueraria phaseoloides* a permis à celui-ci de bien s'implanter et à son enracinement de coloniser le sol. Celui-ci a alors pu conserver l'état favorable créé par le labour.

Tableau n° 8. Résultats de mesures sur le dispositif en milieu réel de Tchologvogo dans le nord de la Côte d'Ivoire, d'après Chopart (1995, 1997).

Profondeurs de travail : charrue à soc de LB2, pulvérisateur à disques et tiller : 10 cm; charrue à soc 25 cm.

Abréviation des modes de gestion du sol	LB2	TSD	LMS
<u>Travail du sol mai 1994 (sol humide)</u>	charrue à soc	pulvé. à disques	charrue à soc
<u>Etat du sol début 1995 (avant le travail du sol)</u>			
Densité apparente 0-0.2 m	1.47	1.49	1.41
Résist. du sol à la pénétration 0-0.2 m (MPa)	12.3	13.9	5.8
Temps de submersion pluie 45 mm h ⁻¹ (min)	2.4	4.5	19.0
<u>Travail du sol mai 1995 (sol humide)</u>	tiller	tiller	charrue à soc
<u>Longueurs de racines de Pueraria en 1995 (m/m³)</u>			
0 -0.1 m	4000	4500	3100
0.1 - 0.3 m	2800	3300	800
0.3 - 0.5 m	800	1300	200
<u>Etat du sol début 1996</u>			
Densité apparente 0-0.2 m	1.41	1.36	1.23
Résistance à la pénétration. 0-0.2 m (MPa)	26.4	23.7	12.6
Conductivité hydraulique (mm h ⁻¹)	13.7	9.9	5.6
Sorptivité capillaire (mm h ^{-0.5})	13.1	14.0	17.1
Temps de submersion pluie 45 mm h ⁻¹ (min)	3.3	3.5	4.8

43 CONTRIBUTION A LA GESTION DE L'IRRIGATION DE LA CANNE A SUCRE

Des études portant sur la gestion de l'irrigation de la canne à sucre en Côte d'Ivoire (Péné *et al.*, 1997) ont pour objectif de réduire les coûts et les contraintes de l'irrigation par un rationnement raisonné de l'alimentation en eau. Cela conduit à effectuer des bilans hydriques in situ sur 22

traitements correspondant à des dispositifs ou modalités d'irrigation différents. Le logiciel de traitement des données PROBE, (par. 221) a permis la gestion et l'analyse rapide des très nombreuses données. Il a ainsi pu être mis en évidence les phases où le rationnement de l'irrigation a une influence limitée et celles, où une couverture complète des besoins reste nécessaire. La pratique raisonnée du rationnement aboutit même à une amélioration de l'efficacité de l'irrigation (Péné *et al.*, 1997, tome II, D1).

Par ailleurs, ces mêmes études montrent l'intérêt d'avoir un modèle simple de bilan hydrique du type de celui proposé (PROBE) comme outil d'aide à la décision pour le pilotage de l'irrigation dans les grands complexes sucriers (Péné *et al.*, 1997, tome II, D1).

44 SYNTHÈSE ET FORMALISATION DES RELATIONS ÉTUDIÉES

Les résultats présentés montrent la complexité des relations entre les modes de gestion du sol, le comportement hydrique de celui-ci, le fonctionnement du peuplement végétal et le rendement. Il est clair que **le mode de gestion du sol n'est qu'un élément parmi d'autres facteurs d'élaboration du rendement**. Par ailleurs, le travail du sol, par exemple, peut avoir d'autres effets ayant des conséquences sur le fonctionnement du peuplement végétal (mauvaises herbes, activité biologique, minéralisation de la matière organique etc...) qui n'ont pas été abordés ici. Malgré toutes ces difficultés, on a tenté de **synthétiser ces relations entre modes de gestion et comportement du sol d'une part, et fonctionnement hydrique du peuplement végétal d'autre part, dans un milieu tropical à risque de sécheresse**. Une première formalisation avait déjà été proposée (Chopart, 1990, Tome II D.2). On présente ici une version actualisée (figure n° 24) qui met en relief l'équilibre nécessaire entre la demande en eau du peuplement végétal et l'offre en eau du sol. Elle résulte des travaux présentés dans cette étude mais aussi d'autres expériences obtenues par des collègues. Ce schéma appelle les principaux commentaires suivants :

- Les relations entre l'état physique du sol et la production font intervenir de **nombreux facteurs**.
- **L'état physique du sol a une influence** directe sur l'eau dans le sol (infiltration, stockage), sur l'**enracinement**, mais aussi, quoique de façon moins nette, sur les **parties aériennes** à travers la levée et les densités de peuplement.
- **L'eau mise à la disposition de la plante** (offre en eau) ne dépend pas uniquement de facteurs physiques (sol, climat) mais aussi des **racines**.
- La demande en eau est conditionnée par les caractéristiques des parties aériennes et du climat qui vont déterminer son ETM.

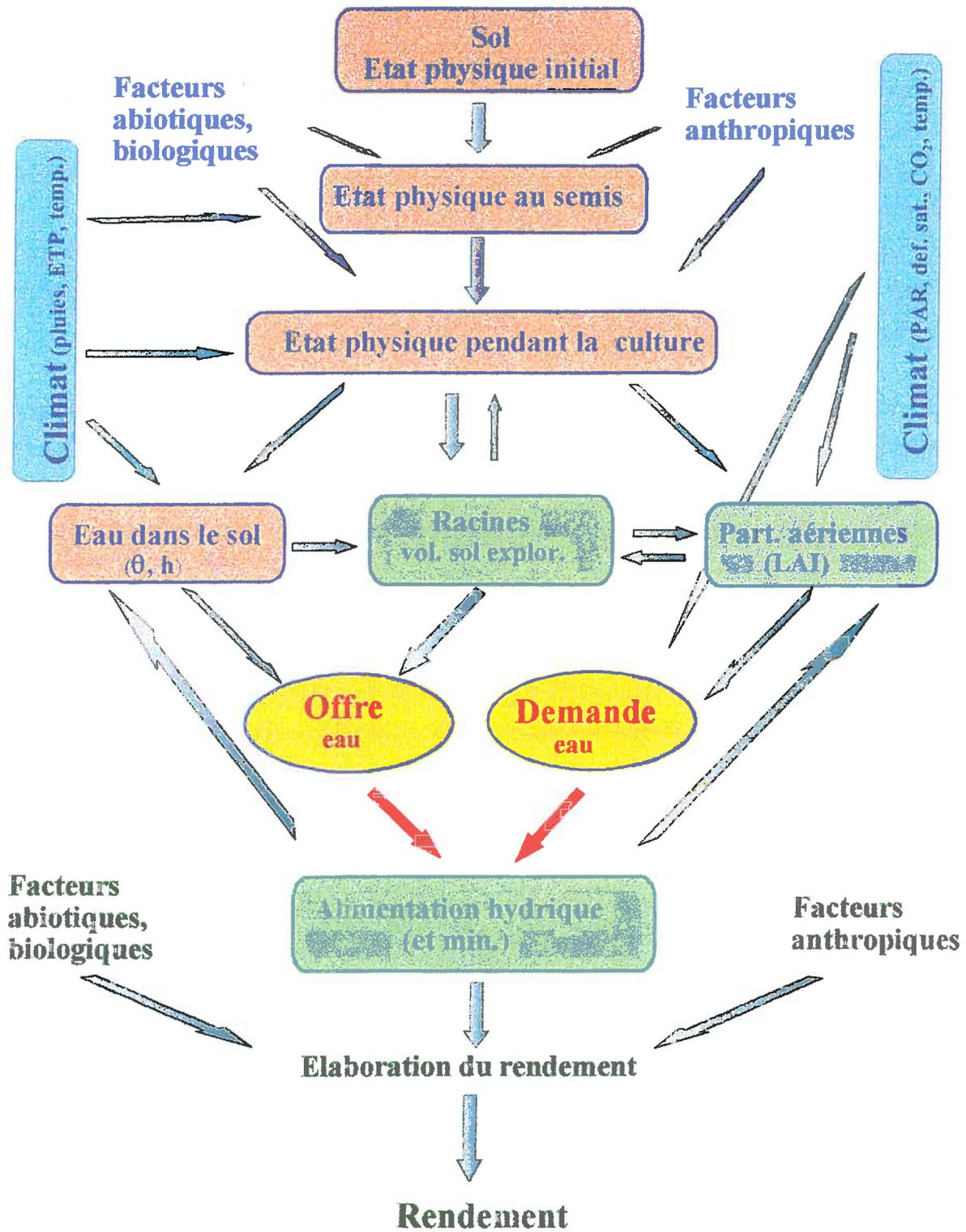


Figure n° 24 : schéma des relations entre état physique du sol, climat et fonctionnement du peuplement végétal.

- **L'alimentation hydrique (ETR) résulte de la plus ou moins bonne adéquation entre une offre et une demande en eau.** Toutes deux sont sous la dépendance indirecte de facteurs physiques et techniques variés et fluctuants qui peuvent augmenter à la fois l'offre et la demande.
- **Le rôle central des racines** dans l'augmentation de l'offre du sol en eau **apparaît ici clairement.**
- L'enracinement dépend de l'état physique du sol mais aussi de son état hydrique et des parties aériennes.
- **Des effets "feed back" existent** : des racines vers l'état physique du sol, entre racines et parties aériennes, de l'eau consommée vers l'offre et la demande.
- **Ce schéma peut s'appliquer à tous les facteurs de variations de l'état physique du profil cultural,** qu'ils soient d'origine **anthropique** (travaux du sol, amendements) **ou naturels,** abiotique (climat) comme biologique (vers de terre, termites, racines etc...)

Les relations entre les techniques de gestion du sol et l'état du sol sont complexes (Manichon, 1997). Le schéma (figure n° 24) illustre, en complément, la complexité des relations entre état physique du sol et élaboration du rendement. **La variabilité des rendements et des effets des modes de gestion du sol que l'on a rencontrée (ch.III par.1) n'est donc pas surprenante.**

On s'est principalement intéressé ici à l'échelle de temps d'un cycle cultural. Mais l'état physique du sol après la culture devient, en agriculture fixée, l'état initial du cycle cultural suivant. Pour réaliser l'objectif d'une agriculture durable, il faut que les facteurs abiotiques et anthropiques, même s'ils ont une action positive à l'échelle d'une année, ne conduisent pas à une dégradation à long terme de l'état du sol.

CONCLUSION

1 Synthèse des résultats

Confirmation de la complexité des relations entre modes de gestion du sol et rendement

Il a été mis en évidence une **grande variabilité** spatiale et inter-annuelle du **rendement** et de l'effet des **pratiques culturales** dans des milieux apparemment homogènes. Ces fluctuations ne s'expliquent pas uniquement par des variables simples comme la hauteur de pluie. **Il se confirme que la relation entre techniques culturales et rendement n'est pas simple ni univoque**, donc pas directement opérationnelle. Des résultats locaux ne peuvent être facilement extrapolés à d'autres sites ou d'autres années. **Pour comprendre**, prévoir et spatialiser l'intérêt de tel ou tel mode de gestion du sol, **il faut caractériser des variables intermédiaires explicatives** et faire appel à des schémas faisant intervenir l'état initial du sol, le climat, le fonctionnement de la culture. Ceci a déjà été montré dans des systèmes de culture tempérés où les itinéraires techniques sont complexes (Sébillotte 1978,1995). Cela se confirme dans des **milieux tropicaux** où les itinéraires techniques sont beaucoup plus simples et où l'on aurait pu s'attendre à une relation plus directe.

Mise en évidence de relations entre le sol et le fonctionnement hydrique du peuplement végétal.

Il apparaît que, autant voire plus que dans d'autres milieux, **l'état physique du sol** plus ou moins modifié par l'homme, la flore, la faune ou le climat, **affecte la quantité d'eau qui va pouvoir être mise à la disposition de la plante**. En effet, il détermine largement :

- la part de la pluie qui va s'infiltrer dans le sol et devenir potentiellement utile à la culture,
- le volume de sol à l'intérieur duquel la plante va s'alimenter.

L'alimentation hydrique de la plante ne dépend pas uniquement des apports d'eau (hauteur, périodicité), **de ses besoins en eau et des réserves maximales en eau utile du sol** mesurées au laboratoire, comme c'est classiquement admis, **mais aussi** très largement, d'autres caractéristiques du sol comme son **aptitude à l'infiltration *in situ***, et de la plante comme son **système racinaire**

(longueur, variabilité spatiale de distribution). Ceci confirme, dans un milieu très différent, les résultats antérieurs (Tardieu et Manichon, 1986, Tardieu, 1988c).

Mise au point ou en oeuvre d'outils innovants de diagnostics culturaux de terrain

Considérant que l'infiltration de l'eau dans le sol, les capteurs racinaires et d'une manière plus générale les conditions d'alimentation hydrique de la plante sont des variables explicatives pertinentes dans les relations entre les modes de gestion et l'état physique du sol à la production, on a testé ou mis au point des outils de caractérisation de ces variables.

On a ainsi vérifié l'intérêt, dans le milieu concerné, de la nouvelle méthode d'évaluation *in situ* des **caractéristiques hydrodynamiques de la couche superficielle du sol** par la méthode TRIMS. On peut mesurer l'infiltrabilité du sol et modéliser sa capacité à infiltrer une averse en fonction de ses caractéristiques hydrodynamiques (conductivité, sorptivité), de son humidité initiale et de l'intensité de l'averse.

Concernant les **systèmes racinaires**, on est parti d'une méthode de **cartographie des impacts racinaires** sur un profil, qui offre l'avantage de bien évaluer la distribution spatiale de ceux-ci (Bohm, Tardieu et Manichon). **Un modèle de passage de ce nombre d'impacts sur un plan à la densité de longueur racinaire a été élaboré, testé et validé sur maïs. Il est ainsi possible, à partir de mesures simples réalisées avec une grille sur un profil, d'accéder à la densité volumique de longueur racinaire, grandeur reconnue comme la plus pertinente pour caractériser l'enracinement en tant que capteur d'eau et d'éléments nutritifs, tout en prenant en compte la variabilité de distribution des racines, elle aussi, importante.**

Avec ces deux caractéristiques racinaires, **on propose un modèle permettant une évaluation du taux d'exploration racinaire, c'est à dire du volume de sol accessible à la culture pour son alimentation.** Ce modèle très simple a montré sa capacité à expliquer l'accès réel de la culture à l'eau et à l'azote du sol en conditions limitantes. En dehors de cette utilisation dans la modélisation de la culture, qui reste encore à comparer à d'autres modèles, il offre deux autres intérêts : i) **il permet d'abord de réduire l'enracinement à une seule valeur synthétique : le volume de sol utilisable pour l'alimentation hydrique et minérale de la plante, un peu comme le LAI qui est une variable synthétique pour caractériser les parties aériennes en tant que capteur de carbone,** ii) **il devrait aussi faciliter le dialogue entre les spécialistes des racines et ceux de la fertilisation et du développement.**

En effet, les racines peuvent paraître à ces derniers comme un domaine de recherche “fondamentale” et les variables classiques utilisées (poids, densité de longueur) comme ésotériques, sans grand rapport avec les conseils en matière de fertilisation. Or, à partir de la teneur moyenne en un élément et du volume de sol utile pour cet élément, dépendant de l’enracinement, on peut facilement estimer la masse de l’élément à la disposition de la culture. On pourrait alors **mieux raisonner la fertilisation en dépassant la seule prise en considération de la teneur en éléments minéraux, sortie de l’analyse de laboratoire**. Il est aussi possible de comparer l’intérêt de différents modes de gestion du sol à partir de la masse d’éléments nutritifs accessibles à la culture. Un chimiste du sol ou un décideur sera sûrement plus intéressé si on lui dit: “le mode de travail du sol n°1 permet au peuplement végétal d’accéder, sans engrais, à 20 kg ha⁻¹ de phosphore assimilable au cours du cycle et à un autre (n°2) d’accéder à 30 kg ha⁻¹, plutôt que “le travail du sol n°1 induit une longueur totale de racines de 30000 km ha⁻¹ et le n° 2 de 45000 km ha⁻¹, même si ces longueurs (tout à fait réalistes) peuvent impressionner.

Il n’est pas possible d’effectuer partout des mesures *in situ* des termes du bilan hydrique, qui est pourtant, comme on l’a vu dans les exemples présentés, un élément indispensable à la compréhension du fonctionnement hydrique du peuplement végétal. C’est **en particulier le cas pour des études en milieu réel**, où il est nécessaire de pouvoir effectuer un **travail scientifique**. En l’absence de suivi hydrique, il est possible de faire appel à des **modèles**. Pour être opérationnels à l’échelle de la parcelle et spécialement en parcelles paysannes, ceux-ci doivent simuler le comportement du système sol-climat-plante par l’intermédiaire d’un **nombre aussi réduit que possible de paramètres observables** mais prenant en compte les **plus pertinents**. Un **modèle de simulation du bilan hydrique** a été adapté d’un autre (Franquin et Forest, 1997). Le modèle initial avait une vocation agroclimatologique, celui proposé ici ajoute les variables de croissance du **front racinaire** et d’**évaporation sol nu** qui peuvent elles-mêmes être simulées. Il a été testé et validé sur maïs et riz pluvial.

Meilleure formalisation des relations entre l’état du sol et le fonctionnement du végétal

Ce **modèle de bilan hydrique** s’est montré, malgré sa grande simplicité, un outil robuste et précieux d’analyse du fonctionnement hydrique du peuplement végétal et de l’effet des pratiques culturales sur ce fonctionnement. Il en est de même pour les deux autres outils d’évaluation *in situ*, **l’infiltrabilité du sol** et des **systèmes racinaires**. Ces outils, ajoutés à d’autres plus classiques ont **permis une meilleure formalisation des relations complexes entre l’état physique du sol, son comportement hydrique, le système racinaire, l’alimentation hydrique et minérale de la culture et la réponse de celle-ci en termes de fonctionnement et d’élaboration du rendement**.

2 Enseignements

21 Rôle des racines

L'analyse des relations entre l'état du sol et l'élaboration du rendement met en évidence le **rôle central de l'enracinement (capteur d'eau et d'éléments minéraux) dans le processus d'élaboration du rendement** des plantes cultivées dans les environnements où le risque hydrique est élevé. L'enracinement est donc un **élément clé de diagnostic cultural** à la fois pour évaluer la "qualité agronomique" d'un état du sol et pour expliquer ou pronostiquer le comportement du peuplement végétal. Mais il faut pour cela pouvoir évaluer non seulement les valeurs moyennes mais aussi la **variabilité de distribution** des racines dans le profil.

Les racines constituent un apport régulier de biomasse dans le sol. La masse peut être supérieure à 1000 kg/ha/an. Elle contribue au bilan organique du sol et à la séquestration du carbone dans celui-ci.

22 Elargissement du concept de fertilité du sol

On a montré qu'un bon état physique du sol est essentiel pour optimiser l'utilisation de l'eau et des intrants. **L'état physique du sol devrait donc être un élément contributif de la fertilité du sol** mais ce concept de fertilité physique du sol paraît encore trop souvent **négligé au profit de la seule fertilité chimique**. La fertilité d'un sol agricole peut être définie par sa plus ou moins grande aptitude à produire durablement une biomasse végétale utile directement ou indirectement à l'homme. Appliqué à la **fertilité physique**, on pourrait la définir par l'état actuel du sol ou la capacité de celui-ci à accéder, plus ou moins facilement, à un **état lui permettant de laisser pénétrer et de stocker les ressources nécessaires au végétal** (air, eau, nutriments), d'être le **lieu d'une activité biologique utile**, et de **laisser facilement pénétrer les racines**. **L'évaluation de la fertilité du sol ne devrait donc pas se limiter à la prise en compte de sa concentration en nutriments** potentiellement utiles. **Les nutriments doivent être accessibles à la plante** et être renouvelés par transport ou transformations en limitant les pertes (lixiviation, ruissellement). Cet usage restrictif du concept de fertilité du sol est dû, peut-être, à une plus grande difficulté de quantification de sa composante physique, liée à un manque d'outils de mesure *in situ*. Les progrès récents, en particulier dans le domaine de l'enracinement (dynamique, accès à l'eau et aux éléments minéraux), devraient faciliter **l'élargissement du concept de fertilité du sol en intégrant mieux sa composante physique**.

3 Perspectives

31 Etudes racinaires

Nos travaux ont contribué à une meilleure connaissance des grandes caractéristiques de l'enracinement au champ et à permettre des études chez les agriculteurs grâce à l'élaboration d'une méthode portable d'estimation de la longueur. Ceci peut servir à la réalisation de diagnostics et à alimenter une base de données susceptible de faciliter la modélisation de la croissance racinaire et du volume de sol accessible à la culture. **Mais l'état physique du sol n'est pas le seul facteur de la croissance racinaire.** Outre le potentiel génétique et les relations d'allométrie entre parties aériennes et racines, il y a d'autres facteurs de variabilité de l'enracinement : des facteurs trophiques comme la **teneur du sol en aluminium** (Vasquez *et al.*, 1999), des **signaux hormonaux** dans la plante mais liés à l'environnement (Simonneau *et al.* 1998), et l'effet mis à jour récemment, de certaines pratiques culturales comme des **herbicides** (Pallant et Miller, 1998). **La sphère racinaire et ses réactions à l'environnement restent encore mal connues**, ce qui limite la capacité de construction de modèles mécanistes de croissance et de production de plantes. Il faut donc poursuivre des études en les étendant aux domaines venant d'être cités. Certaines peuvent se faire en milieu contrôlé, mais **les études *in situ*, y compris chez les agriculteurs, restent indispensables**, même si la dispersion des résultats peut souvent décevoir et décourager. Cette variabilité des résultats en milieu réel est très certainement porteuse d'innovations et de découvertes.

Il faut également, malgré ces difficultés, **tendre vers une modélisation de la croissance racinaire.** Il y a un risque, en effet, dans les modèles "plantes", de voir se creuser un fossé de plus en plus grand, **entre la précision des compartiments parties aériennes et parties souterraines.** Il en est de même pour les modèles de bilans hydriques et minéraux dans le sol supportant une végétation. Il paraît pour le moment difficile de modéliser l'architecture réelle de l'enracinement prenant en compte tous les facteurs de variation évoqués. Il serait peut être plus utile, sur le plan agronomique, de commencer par une modélisation des seuls paramètres les plus pertinents pour le fonctionnement du peuplement végétal comme la **biomasse totale**, la profondeur du **front racinaire** et le **volume de sol utile** délimité par la densité de longueur racinaire et **sa variabilité.**

La modélisation du poids et de la longueur totale des racines pourrait utiliser des informations sur les parties aériennes et sur les racines près du pied (Abe et Morita, 1998). L'approche fractale est aussi, peut-être, une voie d'avenir (Berntson *et al.*, 1998).

32 Modélisations du bilan hydrique et de la croissance des peuplements végétaux.

On utilise actuellement comme outil de diagnostic hydrique un **modèle de bilan hydrique** sous culture (PROBE) qui prend en compte le front racinaire. Celui-ci **a fait ses preuves** en donnant des valeurs réalistes d'ETR, d'ETR/ETM et de drainage qui contribuent à expliquer l'élaboration du rendement. Mais ce modèle, par essence, n'a pas vocation à simuler lui-même la croissance et la production de la culture et il paraît maintenant **possible de faire mieux tout en conservant des exigences** indispensables d'**observabilité** et de **parcimonie** des paramètres d'entrée. Il faut aussi maintenir l'aptitude à prendre en compte la variabilité du milieu dans le cadre d'une description **stochastique**. Certains modèles de bilans hydriques paraissent respecter ce cahier des charges, en particulier l'aptitude à une approche stochastique (Maraux *et al.*, 1998) **Les outils proposés** (racines, infiltrabilité du sol, variabilité spatiale) doivent, à cet égard, permettre de contribuer à **renseigner et valider** ceux-ci. Ils doivent aussi et surtout renseigner des modèles de culture avec les mêmes exigences, en tant que variables internes ou de forçage.

33 Pour une approche interdisciplinaire et systémique de modes de gestion durables du sol.

On a vu qu'on ne peut aborder les relations entre pratiques culturales et rendement sans passer par la caractérisation de **variables intermédiaires** (le climat, l'état physique et le fonctionnement hydrique du sol modifié par l'homme et la faune du sol, les systèmes racinaires, le bilan hydrique etc...). Tout en restant dans le grand domaine de l'Agronomie, ces études relèvent de **disciplines différentes** (agromachinisme, pédologie, géochimie, mécanique des fluides, agroclimatologie, écophysiologie, socio-économie, géographie, écologie etc...) Or, dans les pays où l'on a travaillé, il n'existait pas d'équipe réunissant ces différents spécialistes. Bien que certains aspects aient été pris en charge par d'autres, **nous avons mené un travail de terrain intégrant plusieurs disciplines**. Cela l'a rendu **plus complexe** mais a aussi facilité une **approche systémique** rassemblant le sol (et sa faune), l'eau, le peuplement végétal (racines et parties aériennes) et le système de culture en une préoccupation unique qui a bien été présente, même si pour certains aspects, les résultats, trop fragmentaires, n'ont pas fait l'objet de publications et n'ont donc pas été mentionnés ici.

Nous espérons que, grâce aux **outils innovants** mis au point ou testés, à la **formalisation des relations** et interactions dans le domaine d'étude et à cet **exemple d'une recherche sur le terrain faisant appel à plusieurs disciplines**, ce travail facilitera la tâche d'agronomes confrontés à ce type de problématique. Ceux-ci disposent maintenant d'outils portables, simples, robustes, et opérationnels en milieu réel tout en restant fondés scientifiquement. Ils disposent aussi

d'informations plus précises sur les relations entre le mode de gestion du sol et la production et sur les causes de la variabilité des effets des pratiques culturales.

33 Vers une aide à la décision plus individualisée de modes de gestion du sol

Dans le domaine de la gestion physique et hydrique du sol, les résultats obtenus en particulier avec **les outils portables et les schémas de relations pourraient faciliter le passage de directives normatives, applicables à de vastes régions** encore souvent pratiquées en Afrique de l'ouest, à **un conseil de choix techniques plus individualisé et ajusté**. Les **bénéficiaires** devraient être **l'agriculteur et le milieu physique** mis en valeur par celui-ci dans le cadre d'un **développement durable**. Dans la zone d'Afrique de l'ouest concernée par l'étude, l'agriculteur doit en particulier prendre ses **décisions** en fonction de **l'état initial** de la parcelle et du **risque climatique** et plus spécialement le risque de stress hydrique. L'occurrence de ce risque est à évaluer localement notamment par la simulation du bilan hydrique. **Ce travail devrait ainsi contribuer à une production plus stable et mieux maîtrisée des cultures annuelles dans les exploitations agricoles des régions tropicales** concernées à la fois par les problèmes **d'état physique du sol défavorable et de pluviosité insuffisante** ou irrégulière.

Notre souhait est que ces outils de diagnostic cultural et d'aide à la décision constituent une **contribution, même très modeste, au nécessaire accroissement de la production agricole de ces pays, dans le cadre d'une agriculture durable** où les acteurs sont maîtres de leurs choix de gestion du sol grâce à une capacité de diagnostic et de pronostic locaux des situations et des états du milieu.

BIBLIOGRAPHIE (145 références)

ABBADIE L., MARIOTTI A., MENAUT J.C., 1992. Independence of savanna grasses from soil organic matter for their nitrogen supply. *Ecology* : (73) 608-613.

ABE J., MORITA S. et HAGISAWA Y., 1998. Developmental models to describe the relationships between shoot and root growth in rice. *In* : *Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems*, Kluwer Academic Publishers. Pays Bas. 523-531.

ANKENY M.D., AHMED M., KASPAR, T.C., HORTON R., 1991. Simple field method determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 467-470.

ASSELIN J. et VALENTIN C., 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. Orstom , Sér. Hydrol.* : (15 4) 321-349.

AVENARD J.M., ELDIN M., GIRARD G., SIRCOULON J., TOUCHEBOEUF P., GUILLAUMET J.L. et PERRAUD A., 1971. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Paris ORSTOM. 391 p.

BADO V.B., SEDOGO M. P., CESCAS M., LOMPO F., BATIONO A., 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Agricultures* : (6) 571575.

BARLEY K.P., 1970. The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. *Adv. Agron.*: (22) 159-301.

BARRO A. 1999. Evaluation de l'effet et de la faisabilité du travail du sol sur le sorgho photosensible dans la région de Saria (Burkina Faso). Thèse ENSA Montpellier, à paraître.

BERNSTON G., LYNCH J. et SNAPP S. 1998. Fractal geometry and the description of plant root systems : current perspectives and future applications. *In* "Fractal in soil science". *Advances in soil Science*, Baveye P. *et al.* édit., CRC Press New York, p. 113- 152.

BIGOT Y., 1985. Quelques aspects historiques des échecs et des succès de l'introduction et du développement de la traction animale en Afrique sub-saharienne. *Machinisme Agric. Trop.* : (91). 4-10.

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. I) 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 BOSC M., 1974b. Principaux facteurs agronomiques déterminant l'absorption des éléments nutritifs par les racines. Bull. Assoc. Fr. Etude du Sol : (2) 69-79.
- BLAND W.L. et DUCAS W., 1988. Root length density from minirhizotron observations. Agron. J. : (80) 271- 275.
- BLONDEL D., 1971. Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral. L'Agron. Trop. (26.12) 1303-1333.
- BOHM W., 1976. *In situ* estimation of root length at natural soil profiles. J. Agric. Camb. : (87) 365-368.
- BONZON B. et PICARD D., 1969. Matériels et méthodes pour l'étude de la croissance et du développement en pleine terre des systèmes racinaires. Cahiers ORSTOM, sér. Biol. : (9) 3-18.
- BOTTON H., 1958. Les plantes de couverture en Côte d'Ivoire. Journal d'Agric. Trop. et de Bot. Appliquée : (4 et 5) 1-192.
- BOULIER J.F., PARLANGE J.Y., VAUCLIN M., LOCKINGTON D.A., HAVERKAMP R., 1987. Upper and lower bounds of the ponding time for near constant surface flux. Soil Sci. Soc. Am. J. : (51) 1424-1428.
- BOUSQUET V. 1999. Validation et mise en oeuvre d'une méthode de caractérisation du système racinaire. Cas de quatre variétés de riz pluvial. Mémoire de DEA INP Lorraine CIRAD 33p.
- BRESLER E., DASBERG S., RUSSO D., DAGAN G., 1981. Spatial variability of crop yield as a stochastic process. Soil Sci. Soc. Am. J. : (45) 600-605.
- CAPILLON A., 1993. Typologie des exploitations agricoles, contribution à l'étude régionale des problèmes techniques. Thèse de doctorat INPG, t1, 48 p.
- CARE D.A., 1998. Effect of aluminium and selection for aluminium tolerance, on root hair length in white clover. *In* : Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems, Kluwer Academic Publishers. Pays Bas. 663-671.
- CASENAVE A., 1982. Le mini-simulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes d'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, Sér. hydrol. : (19 4) 207-227.
- CASENAVE A. et VALENTIN Ch., 1989. Les états de surface de la zone Sahélienne. Influence sur l'infiltration. Orstom édit. Paris. 229 p.

- CASTA P., CHOPART J.L., JANEAU J.L. et VALENTIN C., 1989. Mesure du ruissellement sur un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire après six ans de culture continue avec ou sans labour. *L'Agron. Trop.* : (44.4) 255-262.
- CHARPENTIER H., 1995. Fixation de l'agriculture dans le Nord de la Côte d'Ivoire. Synthèse de six années d'expérimentation (1989- 1994) sur le terroir villageois de Tchololévogo. Doc. Mult. Idessa-Cirad, 210 p.
- CHARPENTIER H., SEGUY L. et MICHELLON R., 1991. Cultures associées, couvertures végétales mortes et vivantes. *In* : "Savanes d'Afrique, terres fertiles ?". La documentation française édit. Paris. 333-355.
- CHARREAU C. et NICOU R., 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-Africaine et ses conséquences agronomiques. *L'Agron. Trop.* : (2), 209-255, 565-563 et (11), 1184-1247.
- CHAUVEL A., 1966. Etudes physiques du sol de Sefa. ORSTOM Dakar, doc. mult. 36 p.
- CHOPART J.L., 1970. Morphologie et croissance de l'enracinement du sorgho (*Sorghum vulgare*) en deux conditions de fertilité. Doc. mult. IRAT. 97 p.
- CHOPART J.L. et NICOU R., 1976. Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. *L'Agron. Trop.* : (31) 7-28.
- CHOPART J.L., 1977a. Caractérisation de certains paramètres morphologiques des systèmes racinaires à partir d'échantillons représentatifs. Doc. mult. INRA Toulouse et CIRAD Montpellier. 82 p.
- CHOPART J.L., 1977b. Contribution à la mise au point d'une méthode d'étude de profils racinaires par localisation de rubidium. Doc. mult. ENSA Montpellier et CIRAD. 45 p.
- CHOPART J.L., NICOU R. et VACHAUD G., 1979. Le travail du sol et le mulch pailleux. 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 (AIEA) édit. : n° 235. 22. 199-221.
- CHOPART J.L., 1980. Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide, mil, sorgho, riz pluvial). Thèse de doctorat de l'INP Toulouse. 162 p.
- CHOPART J.L., KALMS J.M., MARQUETTE J., NICOUR., 1981. Comparaison de différentes techniques de travail du sol en trois écologies de l'Afrique de l'ouest. Doc. Mult. IRAT Montpellier, 65 p.

CHOPART J.L., 1983. Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. L'Agron. Trop. : (38 1) 37-46.

CHOPART J.L., 1984. Soil erosion and control methods of rice cropping systems. Some West African exemples. *In* : "An overview of upland rice cropping". Int. Rice Res. Inst. (IRRI) édit. 479-491.

CHOPART J.L., 1985. Développement racinaire de quelques espèces annuelles cultivées en Afrique de l'Ouest et résistance à la sécheresse. *In* : "La Sécheresse en zone intertropicale - Pour une lutte intégrée" CILF édit. Paris. 145-154.

CHOPART J.L. et KONE D., 1985. Influence de différentes techniques de travail du sol sur l'alimentation hydrique du maïs et du cotonnier en Côte d'Ivoire. L'Agron. Trop.: (40 3) 223-229.

CHOPART J.L., SIBAND P., 1988. PROBE : Programme de Bilan de l'Eau. Collection Mémoires et Travaux de l'IRAT CIRAD éditeur Montpellier France : n° 17. 76 p.

CHOPART J.L., 1989a. Effect of tillage on a corn-cotton sequence in Côte d'Ivoire. *In* : "Soil crop and water management in the Sudano-Sahelian Zone" ICRISAT édit. 325-331.

CHOPART J.L., 1989b. Scruter les racines à travers des grilles. Une méthode fort utile. Article dans "Info R3S" : n° 2, p 5. (lettre du réseau CORAF R3S).

CHOPART J.L., 1989c. Méthodes d'étude de l'enracinement à mettre en oeuvre dans le cadre du projet de recherche R3S PF2, recommandations. Note tech. n°4/89 Idessa Bouaké RCI, 16 p.

CHOPART J.L. et NICOU R., 1989. Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. L'Agron. Trop. : (44 4) 269-281.

CHOPART J.L., 1990a. Conditions d'alimentation hydrique du riz pluvial et du maïs à Guéménédou et Mahibuo dans les expérimentations du PES de Gagnoa. Evaluation par modélisation du bilan hydrique (modèle PROBE). Note tech. Idessa CIRAD : n° 40/90/FS. 56 p.

CHOPART J.L., 1990b. Rôle du travail du sol sur les termes du bilan hydrique - enracinement-rendement des cultures pluviales (cas du Sénégal et de la Côte d'Ivoire). *In* : "Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales" IRAT CIRAD édit. Montpellier. 223-237.

CHOPART J.L., 1990c. Variable effects of soil cultivation on maize production in the Ivory Coast as a function of conditions affecting water supply. *In* : "Climatic risk in crop production: Models and management in the semi-arid tropics and sub-tropics". Poster papers from Int. symposium Brisbane. Muchow and Bellamy CSIRO edit. Australie. 104-105.

CHOPART J.L. et VAUCLIN M., 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. *Soil Science Soc. America Journal.* : (54, 5) 1377-1384.

CHOPART J.L., 1991. Etude au champ de certains paramètres racinaires utiles pour l'évaluation de la distribution spatiale et de la longueur des racines à partir de comptages d'impacts sur un plan. Note techn. n°17/91, Idessa Bouaké, RCI, 26p.

CHOPART J.L., VAUCLIN M. et NICOUR., 1991. Le bilan hydrique : dilettantisme ou nécessité pour comprendre les relations milieu physique-culture en zone tropicale sèche ?. *In*: "Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone". ICRISAT. IAHS Public : n° 199 : 345-355.

CHOPART J.L. et SIBAND P., 1993. A method for annual plant root system studies in the field by root mapping : advantages and problems. Poster abstract. *In* : "Abstracts of presentations at the first Int. Symposium on the biology of adventitious root formation", Dallas (USA) avril 1993. USDA General Tech. : report n° NC 154. 80.

CHOPART J.L. et KONE D., 1994. Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en région centre Côte d'Ivoire. *In* : "Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale". Aupelf Uref John Libbey Eurotext édit. 39-47.

CHOPART J.L. et MARION D., 1994. Caractérisation au champ de l'enracinement de la canne à sucre. Application à l'élaboration d'une méthode d'évaluation de la biomasse racinaire. Rapp. ATP Cirad 14/92. Note tech. Idessa : n°7/94 RD. 28 p.

CHOPART J.L., 1995a. Etat physique du sol de parcelles paysannes du nord de la Côte d'Ivoire après cinq ans de culture continue sous différents modes de gestion du sol. Note tech. Idessa CIRAD: n° 125/95 RD, 27 p.

CHOPART J.L., 1995b. Profondeur d'enracinement d'une culture de maïs : Comparaison de différentes méthodes d'estimation *in situ*. Note tech. Idessa CIRAD : 13/95. 24 p.

CHOPART J.L., 1995c. Techniques de gestion du sol et alimentation hydrique des cultures tropicales. *In* : "Deuxième programme science et technique au service du développement. Sous programme : agriculture tropicale et subtropicale. Projets de recherches 1987-1991 vol. Résumés des rapports". Risopoulos édit. CTA Wageningen Pays-Bas. 3-7.

CHOPART J.L., 1996. Comparison of several methods of studying the maize deep root system under field conditions. Poster 5ème Symp. Int de la Société Int. de recherches sur les racines. Clemson Univ. Caroline du sud (USA). Conf. prog. and abstracts : 14-18 07 96. p.138.

CHOPART J.L., 1997a. Synthèse des résultats 1996 de l'opération de recherche : Fertilité physique du sol, fonctionnement du profil cultural. Note RD/DCV Idessa CIRAD. 30 p.

CHOPART J.L., 1997b. Distribution spatiale des racines de maïs dans un sol ferrugineux tropical. Application à l'estimation des densités de longueurs racinaires à partir de comptages sur un profil de sol. Note tech. Inera-Cirad 18 p.

CHOPART J.L. et SIBAND P., 1999. Development and validation of a model to describe root length density of maize from root counts on soil profiles. *Plant and Soil* (1 14) (sous presse).

COCHEME J. et FRANQUIN P., 1967. Une étude agroclimatologique de l' Afrique au sud du Sahara en Afrique occidentale. Projet conjoint d' agroclimatologie FAO/UNESCO/OMM, FAO, Rome. 86 p.

DANCETTE C., 1983 Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *L'Agron. Trop.* : (4) 281-292.

DREW M.C. et SAKER L.R., 1980. Assessment of a rapid method, using soil cores, for estimating the amount and distribution of crop roots in the field. *Plant and Soil* : (55). 297-295.

DURAND Y., 1999. Rapport de stage : RACINES. Doc. mult. IUP Univ. Montpellier Cirad 52 p.

FARHUTNDINOV R., USMANOV I., VESELOV S. et KUDOYAROVA G., 1998. Cytokinin content in roots and shoots of wheat seedlings as affected by transpiration rate. *In* : Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems, Kluwer Academic Publishers. Pays Bas. 541-544.

FRANQUIN P. et FOREST F., 1977. Des programmes pour l'évaluation fréquentielle des termes du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.* : (32) 7-11.

GARDNER W.R., 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science* : (89) 63-73.

GARDNER W.R., 1964. Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron. J.*: (56) 41-45.

HABIB R., PAGES L., JORDAN M.O., SIMONNEAU T., SEBILLOTTE M., 1991. Approche à l'échelle du système racinaire de l'absorption hydro-minérale. Conséquences en matière de modélisation. *Agronomie* : (11) 623-643.

HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. Le profil cultural. Masson et cie édit. Paris. 332 p.

HOLGARTH W.L., SARDANA V., WATSON K.K., SANDER G.C., PARLANGE J.Y. et HAVERKAMP R., 1991. Testing the approximate expressions for soil water status at the surface during infiltration. *Water Resour. Res.* : (27 8) 1957-1961.

- JOURDAN C. et CHOPART J.L., 1998. Méthodes d'étude des systèmes racinaires au champ menées au CIRAD. Poster 16ème congrès mondial de Science du Sol, Montpellier août 1998. 1 p.
- KATO R., SHIMOYAMA T., TAKAGI K., SUZUKI T., 1995. Effects of cytokinins on the growth of primary roots of *Zea mays*. *Plant and Cell Physiology*. (36 8) 1477-1482
- LAL R., 1974. No-tillage effects on soils properties and maize production in western Nigeria. *Plant and Soil* : (40 2). 321-331.
- LAL R., 1976a. No-tillage effect on soil properties under different crops in western Nigeria. *Soil Science Soc. of Am. Proc.* : (40). 762-768.
- LAL R., 1976b. Soil erosion on alfisols in western Nigeria. II- effects of mulch rates. *Géoderma* : (16) 377- 387.
- LANG A. R. G. et MELHUIS F. M., 1970. Length and diameters of plants root in non random populations by analysis of plane surface. *Biometrics* : (26) 421-431.
- LEBRET P., 1997. Essai d'analyse de l'accès du maïs à l'azote d'un sol tropical - Rôle de l'enracinement. Mémoire de DESS Université et ENITA Clermont- Ferrand, 39 p.
- LEE H.A., 1927. The method of measuring extent of roots in the soil. *Rep. Hawaii Sug. Tech.* : (6) 56-59.
- LUMLEY J.L. et PANOSKY A., 1964. The structure of atmospheric turbulence John Wiley et sons edit. New york. USA. 248 p.
- MAERTENS C., 1964. La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Ann. Agron.* : (15 5) 539-564.
- MAERTENS C., 1970. Influence des conditions de milieu sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les systèmes racinaires de quelques graminées cultivées. Thèse de doctorat Université de Toulouse. 162 p.
- MAERTENS C., 1971. Etude expérimentale de l'alimentation minérale et hydrique du maïs. Comparaison des besoins de la plante et des possibilités d'absorption d'azote, de phosphore et de potassium par les racines de *Zea mays*. *C.R. Acad. Sciences Paris, sér.* : D (273) 682-684.
- MAERTENS C., BLANCHET R. et BOSCH M., 1974. Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs par la culture. I) régimes hydriques, systèmes racinaires et modalités d'alimentation en eau. *Ann. Agron.* : (25) 575-586.

MAERTENS C. et CHOPART J.L., 1977. Caractérisation synthétique de l'enracinement de végétaux herbacés à partir d'échantillons aliquotees du système racinaire. C.R. Académie des Sciences Paris. Sér. D : (284) 1285-1287.

MANICHON H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural. Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse de doctorat INPG. 214 p.

MANICHON H., 1995. L'écorégionalité dans la recherche pour le développement : propositions de la recherche française. *In* : "Vers une révolution doublement verte" Séminaire int. Poitiers nov.1995. p. 1-7.

MANICHON H., 1997. Le travail du sol : un champ de recherches trop négligé. *In* : "Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux" 151-157.

MANTOGLIOU A. et WILSON J.L., 1982. The turning band method for simulation of random field using line generation by a spectral method. *Water Res. Res.* : (18) 1379-1394.

MARAUX F., LAFOLIE F., BRUCKLER L., 1998. Comparison between mechanistic and functional models for estimating soil water balance : deterministic and stochastic approaches. *Agric. Water Man.* 38 1-20.

MARCESSE J., 1967. Détermination in situ de la capacité de rétention d'un sol au moyen d'un humidimètre à neutrons. *In* : "Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies", IAEA édit. : SM 94/14. 137-145.

MARCHAND D., 1988. Modélisation fonctionnelle du bilan hydrique sous sol cultivé : approche déterministe ou stochastique ? Thèse de doctorat Université Joseph Fourier, Grenoble. 246 p.

MOLZ F.J. et REMSON I., 1971. Application of an extraction-term model to the study of moisture flow to plant roots. *Agron. J.* : (63). 72-77.

MOLTZ F.J. et REMSON I., 1979. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resources. Res.*: (6) 1346-1356.

MUNOZ-PARDO J., RUELLE P. et VAUCLIN M., 1990. Spatial variability of an agricultural field: Statistical analysis of soil texture, soil moisture and yield components of two rainfed crops. *Catena.* (17 2) 369-381.

N'CHO B.S., 1991. Modélisation de l'accès des racines de maïs à l'azote du sol. Mémoire de fin de cycle ESAT CNEARC Montpellier. 27 p.

NEWMAN J., 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. App. Ecol.* : 3 139-145.

- NICOUR., 1974. Contribution à l'étude et à l'amélioration de la porosité des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale ouest-africaine. *L'Agron. Trop.* : (29) 1110-1127.
- NICOUR., 1975. Le problème de la prise en masse à la dessiccation des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche. *L'Agron. Trop.* : (30) 325-343.
- NICOUR. et CHOPART J.L., 1979a.. Water management methods in sandy Soils of Sénégal. *In* : "Soil tillage and crop production". IITA édit. proc. sér. : n° 2. 248-257.
- NICOUR. et CHOPART J.L., 1979b. Root growth and development in sandy and sandy-clay soils of Sénégal. *In* : "Soil Physical properties and crop production in the tropics" J. Wiley and sons edit. New York, 375-384.
- NICOUR., CHARREAU C. et CHOPART J.L., 1993. Tillage and soil physical properties in semi arid west Africa. *Soil and Tillage Research* : (27) 125-147.
- PALLANT E. et MILLER C.S., 1998. Atrazine suppression of fine root growth in corn. *In* : *Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems*", Kluwer Academic Publishers. Pays Bas. 499-505.
- PELISSIER P., 1967. Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance. Imp. Fabrègues, Saint Yriex (Haute-Vienne) France. 940 p.
- PENE C.B., CHOPART J.L. et ASSA A., 1997. Gestion de l'irrigation en culture de canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) sous climat tropical humide, à travers le cas des régions Nord et Centre de la Côte d'Ivoire. *Sécheresse* : (8, 2) 87-98.
- PERROUX K.M. et WHITE I., 1988. Design for disk permeameters. *Soil Sci Soc. Am. J.* : (52) 1205-1215.
- PIERI C., 1967. Etude de l'érosion et du ruissellement à Séfa au cours de l'année 1965. Coll. sur la fert. des sols tropicaux Tananarive : (108) 1302-1315.
- PIERI C., 1976. L'acidification des terres de culture exondées au Sénégal. *L'Agron. Trop.* : (31) 339-368.
- PIERI C., 1977. Minéralogie et propriétés de surface de deux sols sableux du Sénégal. *L'Agron. Trop.* : (32) 339-352.
- RAULIN H., 1984. Techniques agraires et instruments aratoires au sud du Sahara. *In* : "Les instruments aratoires en Afrique tropicale, la fonction et le signe." Cahiers ORSTOM : vol. XX (3-4) 335-358.

RAZ C.L., RENNIE D.A. et HUTCHEON W.C., 1964. The ^{32}P injection method for studying the root system of wheat. *Can. J. Soil* : (44) 245-261.

REYDELLET I., 1997. Effet de la rhizosphère du maïs sur la minéralisation brute de l'azote dans un sol ferrugineux tropical (Burkina Faso). Thèse INPL Nancy. 191 p.

ROOSE E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Travaux et doc. Orstom Paris : n° 78. 108 p.

ROOSE E., 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Travaux et doc. De l'ORSTOM édit. Paris : n° 130. 569 p.

SEBILLOTTE M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C. R. Acad. Agric. Fr.* (11) 906-913.

SEBILLOTTE M., 1995. Analysis farming and cropping systems and their effects. Some operative concepts. In "Systems studies in agriculture and rural development" ed. J. Brossier, L de Bonneval et E. Landais INRA, Paris, 283-290.

SERENA M., 1997. Etude comparative de la mise en place des capteurs aériens et souterrains chez *O. Sativa* et *O. Glaberrima* et de la relation avec leur comportement agronomique. Mémoire de DAA, ENSA Montpellier, 35 p.

SIBAND P., 1999. Raisonnement de la fertilisation azotée du maïs en zone de savane ouest-Africaine en fonction des conditions pédo-climatiques. Rapport final du contrat CEE TS3 CT94-0262, doc mult. Cirad, 360 p.

SIBAND P. et BOQUET D., 1990. DEI : Dossiers d'Expérimentation Informatisés. Doc mult. Cirad Montpellier, 73 p.

SIBAND P. et CHOPART J.L., 1998. Utilisation par une culture des ressources du sol. Application à l'utilisation de l'azote par le maïs. Document de travail Cirad Montpellier, 26p..

SIGAUT F., 1984. Essai d'identification des instruments à bras de travail du sol. *In* : "Les instruments aratoires en Afrique tropicale, la fonction et le signe." Cahiers ORSTOM : vol. XX (3-4) 359-374.

SIMONNEAU T., BARRIEU P. et TARDIEU F., 1998. Accumulation rate of ABA in detached maize roots correlates with root water potential regardless of age and branching order *Plant, Cell and Environnement* : (21 11) 1113-1122.

SMETTEN K.R.J. et CLOTHIER B.E., 1989. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disk permeameters. *J. Soil Sci.* : (40) 463-568.

- SNEDECOR G.W. et COCHERAN W.G., 1967. *Statistical methods*. Iowa State University press, Ames Iowa. 593 p.
- TARDIEU F. et MANICHON H., 1986. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie* : (6) 415-425.
- TARDIEU F., 1988 a. Analysis of the spatial variability of maize root density. I Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant and Soil* : (107) 259-266.
- TARDIEU F., 1988 b. Analysis of the spatial variability of maize root density. II Distances between roots. *Plant and Soil* : (107) 267-272.
- TARDIEU F., 1988 c. Analysis of the spatial variability of maize root density. III Effect of wheel compaction on water extraction. *Plant and Soil*: (109) 257-262.
- 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) 57-67.
- TAYLOR H.M. et KLEPPER B., 1978. Role of rooting characteristics in the supply of water to plant. *Adv. Agron.* : (30) 99-128.
- TENNANT D., 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.* : (63) 955-1001.
- UPCHURCH D.R., 1985. Relationship between observations in mini-rhizotrons and true root length density. Ph. D Thesis, Texas Tech. Univ. Lubbock (Diss. Abstr. 85-28594).
- UPCHURCH D.R. et RITCHIE J. T., 1983. Root observations using a video recording system in minirhizotrons. *Agron. J.* : (75) 1009-1015.
- VACHAUD G., 1985. Bilan hydrique par mesure dans le sol à l'échelle d'une parcelle cultivée. *In* : "La Sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée", CILF édit. Paris. 67-84.
- VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO S. 1977. Méthode de caractérisation hydro-dynamique *in situ* d'un sol non saturé. *Ann. Agron.* : (23) 1-36.
- Van NOORDWIJK M., 1987. Methods for quantification of root distribution pattern and root dynamics in the field. *In* : "20th Colloq. Int. Potash Institute", Bern, Int. potash Inst. Publishers Berne. 247-265.

VASQUEZ M.D., POSSCHENRIEDER C., CORRALES I., BARCELO J., 1999. Change in apoplastic aluminium during the initial growth response to aluminium by roots of a tolerant maize variety. *Plant Physiology* : (119, 2) 435-44.

VAUCLIN M., 1983. Méthodes d'étude de la variabilité des propriétés d'un sol. *In* : "Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols". Les colloques de l'INRA : n° 15, 9-43.

VAUCLIN M. et CHOPART J.L., 1991a. Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale de dispositifs agronomiques. *In* : "Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride". Aupelf-Uref John Libbey Eurotext édit. Paris. 307-315.

VAUCLIN M. et CHOPART J.L., 1991b. Water balance modelling of a cropped soil : deterministic and stochastic approaches. *In* : "Soil Water balance in the Sudano-sahelian", ICRISAT- IAHS public. n° 199 :471- 482.

VAUCLIN M., THONY J.L., VACHAUD G., REVOL P., RUELLE P., ELRICK D.E. et CLOTHIER B.E., 1991. Field determination of soil hydraulic properties by suction and pressure infiltrometers. *In*: "EGS XVI General Assembly, Wiesbaden", Germany April 1991. 22-26.

VAUCLIN M. et CHOPART J.L., 1992. L'infiltrométrie multidisques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire. *L'Agron. Trop.* : (46 4) 11-27.

VAUCLIN M., 1994. Modélisation du transport de solutés dans la zone non saturée du sol. *Revue des sciences de l'eau* : (7) 81-102.

WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D., 1960. An universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7 th Int. Congr. Soil science : (1) 418-425.