

Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux



CIRAD

Actes du colloque
11-12 septembre 1996
Montpellier, France

Illustration de couverture :
Travail du sol sur canne à sucre à la Réunion – B. Siegmund

© CIRAD

Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux

Roland PIROT, Sylvain PERRET, Hubert MANICHON

Editeurs scientifiques

Actes du colloque

11-12 septembre 1996
Montpellier, France

Pirot R., Perret S., Manichon H. (éds.), 1997. Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux.
Actes du colloque, 11-12 septembre 1996, Montpellier, France.
Montpellier, France, Cirad-Sar, collection Colloques, 160 p.

Responsable d'édition : Christine Rawski (Cirad)
Révision et correction : Chantal Mazzela-Second
Mise en pages : Louma productions
Impression : Imprimerie Louis Jean, Gap

Sommaire

INTRODUCTION

La préparation mécanisée des sols : quelles problématiques de recherche ? Sylvain Perret	5
--	---

THÈME 1. Les méthodes de mesure de performances des matériels agricoles

Mesures de performances des équipements agricoles au champ. Roland Pirot	11
Méthode de mesure des paramètres énergétiques des outils de travail du sol. El Hassan Bourarach, Hermann Knechtges	19

THÈME 2. Les méthodes de caractérisation du profil cultural

Utilisation de quelques outils portables pour évaluer le fonctionnement hydrique d'une parcelle cultivée en milieu tropical. J.L. Chopart	27
Approche morphologique de la structure du sol par des méthodes physiques. Jean-François Billot	35
Influence de trois systèmes de mise en valeur sur l'évolution du profil cultural d'un latosolo roxo de l'État du Paraná (Brésil). M.F. Guimaraes, J. Tavares Filho, R. Ralisch, C.C. Medina, M.M.L. Muller, J.L. Piccinin, Jr.O. Brandao	41
Conséquences de l'état du profil cultural sur les peuplements végétaux : réussite de la levée en relation avec l'état du lit de semences. G. Richard, Carolyne Dürr	49
Modélisation de l'émergence des plantules sous des croûtes superficielles. Nicole Souty, Colette Rode	55
Effet du travail du sol au sec à la dent Rs8 sur l'amélioration de la production du sorgho au Burkina Faso. Albert Barro	61
Adaptation des techniques culturales paysannes pour l'amélioration de l'implantation de l'arachide dans le bassin arachidier du Sénégal. Modou Sène	65
Indices de rugosité du sol régionalisés. Serge Guillobez	79

THÈME 3. Les effets des itinéraires techniques sur l'évolution du profil cultural

Traficabilité et gestion des opérations mécanisées : études expérimentales, modèles et formes d'aide à la décision en culture de canne à sucre. Sylvain Perret	87
Travail du sol, état structural et enracinement de végétaux cultivés sur sols ferrallitiques allitiques des îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie). E. Bourdon, C. Duwigi, T. Becquer, F. Letournel, D. Blavet	101

Action des machines de travail du sol et structure du sol. M.-F. Destain	107
Effets des itinéraires techniques sur l'évolution du profil cultural : effets immédiats. Tahar Mansouri, Zouhaier Chaabouni	113
Effets des opérations de préparation du lit de semences et de semis sur la structure de la couche labourée. G. Richard, H. Boizard	119
Préparation des sols de rizière en fin de saison des pluies pour une remise en culture immédiate. Abdul Rozaq	125
L'effet de la récolte mécanique de la canne sur le sol et la plante. Ronald Ng. Cheong, Vivian Rivière, E. Jacquin	131
Le profil cultural : méthode d'observation, base de modélisation de son évolution à long terme. J. Roger-Estrade	139

Perspectives de travail

Le travail du sol : un champ de recherches trop négligé. Hubert Manichon	151
--	-----

INDEX DES AUTEURS	158
-------------------------	-----

La préparation mécanisée des sols : quelles problématiques de recherche ?

Introduction

Sylvain PERRET
Cirad-Sar, Montpellier, France

On doit constater la difficulté à mener des actions de recherche et de développement sur le travail du sol. On peut identifier différentes raisons à cela : (i) les efforts et les progrès effectués sur d'autres actes techniques ont fait gagner beaucoup en productivité ; (ii) le travail du sol est un sujet de recherche complexe, dont les produits se déclinent rarement en termes de normes ou de recettes ; (iii) l'expertise et les décisions possibles sur l'acte technique échappent souvent à l'opérateur direct ; enfin (iv) la demande en la matière est complexe, englobante, d'origine diverse, les aspects socio-économiques interférant souvent avec les thèmes techniques. C'est, en particulier, le cas en milieu tropical et dans les pays en développement, où la motorisation présente certains traits particuliers, inhérents surtout (i) à la part importante de l'utilisation en commun des équipements, et (ii) au ratio « coût de la mécanisation / coût de la main-d'œuvre » souvent plus élevé qu'en pays tempérés industrialisés. Cependant, on constate dans le même temps que les opérations d'installation des cultures (préparation des sols et semis-plantation) sont toujours coûteuses, parfois risquées et souvent déterminantes sur les phases de développement de la culture puis sur les rendements.

Le Cirad a conduit pendant trois ans des actions pluridisciplinaires sur le thème des interactions sol-machine en travail du sol mécanisé, dans le cadre d'une action thématique programmée (Atp). Deux axes ont été privilégiés dans la démarche de l'équipe : (1) l'évaluation technique, agronomique et économique des itinéraires mécanisés, (2) l'étude et la modélisation des relations climat-sol-performances-produits. Un séminaire a eu lieu les 11 et 12

septembre 1996, visant à faire le point des avancées de ce programme, mais également pour faire un point plus global sur le sujet en impliquant des chercheurs d'autres centres français et internationaux. Ce document, sans prétendre à l'exhaustivité, présente des travaux récents et en cours, menés en Europe et en zones tropicales. Une réflexion sur le thème du travail du sol est proposée, dans une perspective de recherche impliquée dans l'innovation technique et organisationnelle. Son objectif est d'identifier les sources d'approximations, les questions qui se posent aux opérateurs et gestionnaires de matériels, les informations nécessaires aux éventuelles décisions.

Des approximations techniques et agronomiques incontournables

Les choix en matière d'investissements en mécanisation se font au regard de conditions techniques et économiques au sein d'une filière ou d'une région (sociétés, coopératives, groupements...) et/ou de critères de décision propres au chef d'exploitation (sociaux, économiques, voire culturels, assolement et types de cultures au moment du choix...). Le matériel acquis se doit d'être adapté aux possibilités financières de l'entreprise ou de l'exploitation, aux disponibilités en travail de l'exploitation, et sur le plan technique (Fievet, 1982).

S'agissant du travail du sol, ce niveau technique est complexe. Le profil cultural est à la fois l'objet des opérations, le support du trafic des engins et le sub-

strat de la culture. Il est la résultante complexe de l'intervention d'un outil donné, dans des conditions données (Manichon, 1982). L'adaptation technique fait l'objet d'approximations, à différents niveaux, et plus particulièrement en conditions de gestion collective d'équipements :

- il existe différentes possibilités techniques pour une même culture ;
- réciproquement, un même matériel peut être mobilisé dans plusieurs systèmes ; les matériels les plus adaptés à un système et à des conditions pédo-climatiques ne sont pas forcément accessibles à l'achat, à la location ou à la prestation de service dans une région donnée ;
- le décalage temporel entre décision d'investissement et mise en œuvre de chantiers s'accroît et occasionne des conditions nouvelles, non prises en compte initialement (cultures, conditions pédo-climatiques...) ;
- les chantiers eux mêmes sont conduits souvent sur la base de la disponibilité de la main d'œuvre et du matériel, de l'organisation, de la gestion et de la cohérence d'un parc dans un parcellaire (exploitation) ou même une région (groupement), sur le respect d'un calendrier.

Concrètement, la cohérence agronomique du chantier à réaliser est souvent reléguée derrière ses derniers éléments. « *Quels sont les moyens les moins coûteux pour faire passer la parcelle de son état actuel à l'état qui est souhaitable, dans l'intervalle de temps disponible ?* » Cette question de fond posée (Manichon, 1982), il apparaît que les solutions dépendent non seulement des contingences exogènes évoquées plus haut, mais également de l'idée que l'opérateur se fait de « l'état souhaitable ». Les difficultés à construire une demande autour du thème de la simplification des itinéraires sont très représentatives de ce point (cas des systèmes caniers à la Réunion et à Maurice).

D'une façon générale, il convient d'admettre que les matériels sont mis en œuvre dans des conditions le plus souvent non-optimales (si tant est que l'on puisse définir les conditions optimales). Les opérateurs doivent alors accepter un risque dont ils ne connaissent ni la nature, ni l'ampleur. Ils constatent alors parfois l'émergence de problèmes agronomiques récurrents (qui peuvent résulter de certains choix systématiques en matière d'itinéraire mécanisé) ou ponctuels (liés à une situation climatique particulière par exemple). L'origine de ces problèmes est difficile à identifier, car les raisonnements approximatifs en matière de type ou de moment d'intervention ont des effets parfois peu visibles à court terme, et sont moins systématiquement sanctionnés que pour d'autres actes techniques. De plus, il est difficile « *de mettre en correspondance une*

intervention à l'aide d'un outil... et une autre donnée qui pourrait être considérée comme un effet — il s'agit le plus souvent du rendement pour le praticien — » (Hénin, 1982).

La préparation des sols : fonctions, choix d'expert et prise de risque

Même si l'on s'affranchit des contingences organisationnelles souvent prédominantes en conditions tropicales (mécanisation collective), la prise de décision sur des critères strictement agronomiques reste un processus complexe. En effet, contrairement à d'autres actes techniques (traitement pesticide, récolte, fertilisation), les objectifs initiaux et les effets résultants d'une opération de travail du sol sont multiples. Les fonctions initiales attribuées à l'opération — émiettement, incorporation de fertilisants, de résidus, de reliquats de pesticides, destruction de précédent cultural, d'adventices, de parasites telluriques — débouchent après travail sur des effets multiples, favorables ou non, attendus ou non. Ils ne dépendent en outre pas seulement du matériel, mais également des conditions d'intervention.

Avant d'intervenir, et une fois posés (i) les choix ou les disponibilités en matériels, (ii) la période d'intervention, l'opérateur analyse la combinaison des objectifs qu'il se donne, des conditions édaphiques et climatiques de l'instant, des résultats probables de l'opération. La connaissance du comportement du sol, son évolution sous le passage des outils dans différentes conditions, est donc nécessaire (expertise). Concrètement, cette décision porte le plus souvent sur le moment de l'intervention, sur certains réglages ou paramètres (profondeur, vitesse...), car les marges de manœuvre concernant le matériel lui-même sont réduites.

L'information nécessaire à cette expertise peut être affinée, approfondie. A plus forte raison lorsque l'opérateur n'a pas le choix — la prestation de service impose souvent matériel, réglages et date —, l'information sur les conséquences probables, sur les risques pris, devient déterminante. Le savoir-faire (choix d'expert) s'efface le plus souvent derrière le pouvoir faire (pari). Les recherches à mettre en œuvre, et les éléments de conseil qui en découlent doivent intégrer ces points.

Questions et thématiques de recherches

Les questions qui se posent à l'opérateur se déclinent en fonction des contraintes extérieures au chantier lui-même, et de la marge de manœuvre qui en résulte. Partant des constats évoqués, on peut formuler une question de recherche apte à fournir de

l'information, non pas en termes de normes, mais de références pour aider aux décisions, pour évaluer les risques : dans une gamme de conditions climatiques et d'états initiaux de sol, avec une gamme de matériels disponibles, (caractéristiques d'une région agro-pédo-climatique), quelles sont (seront) les caractéristiques des chantiers mis en œuvre en termes d'états résultants du sol et de fonctionnements futurs, en termes de fonctionnement des matériels mis en œuvre et de coût d'intervention ?

Une approche multi-critère, pluridisciplinaire, est sans doute à privilégier. Elle permet de fournir des éléments de jugement, de comparaison entre différents itinéraires techniques, évalués en conditions d'exploitation. En complément, un effort de modéli-

sation, notamment en termes de couplage de processus biophysiques et mécaniques avec des processus décisionnels, peut apporter les éléments d'aide à la décision que sollicitent les opérateurs.

Références bibliographiques

Fievet G., 1982 Le choix des équipements agricoles. *In La gestion des équipements*, Iger, p 13-16.

Hénin S., 1982. Les effets du travail du sol. *Science du sol*, 3 : 171-172.

Manichon H., 1982. L'action des outils sur le sol : appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. *Science du sol*, 3 : 203-219.

THÈME 1

Les méthodes de mesure de performances des matériels agricoles

PIROT R., PERRET S., MANICHON H. (éds.), 1997.

Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux.
Actes du colloque, 11-12 septembre 1996, Montpellier, France.
Montpellier, France, Cirad-Sar, collection Colloques, 160 p.

Mesures de performances des équipements agricoles au champ

Roland PIROT

Cirad-Sar, Unité géographie, agronomie et mécanisation,
73 rue J. F. Breton, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

Résumé : Dans le contexte économique actuellement difficile, les entreprises agricoles doivent être de plus en plus performantes et leurs responsables doivent prendre des décisions dans des situations délicates. En ce qui concerne l'utilisation de matériels agricoles, la possibilité de réduction des coûts concerne principalement trois postes : l'investissement initial et son maintien en état de marche ; la performance des matériels (consommation en carburant, puissance nécessaire...) ; la performance des chantiers (temps de travaux, qualité du travail...). Pour choisir en connaissance de cause, l'agriculteur va mettre en œuvre une méthode de réflexion qui lui permet de raisonner ses choix. Il doit disposer de références techniques pour alimenter cette réflexion. En simplifiant, pour l'utilisation des matériels agricoles, ces références techniques sont la façon d'utiliser la puissance en fonction des conditions d'interventions. Le Cirad-Sar a mis au point certains appareillages qui permettent de mesurer en grandeur réelle, les performances des matériels et des chantiers agricoles. Ils sont utilisés pour analyser l'utilisation de la puissance délivrée par le tracteur pour en évaluer les pertes. Cette chaîne de mesure peut chiffrer : la consommation en carburant, et donc la puissance développée ; le glissement (interface sol-tracteur) ; la vitesse réelle de travail ; l'effort de traction nécessaire pour tirer l'outil ; la profondeur de travail. Ces paramètres, associés à d'autres critères de décision, permettront d'aider au choix et à la gestion des équipements agricoles

Un objectif : diminuer les charges de mécanisation

Aujourd'hui les agriculteurs doivent prendre des décisions dans des conditions de production difficile. Les coûts sont élevés et le marché s'internationalise ce qui entraîne une concurrence importante. Si ceci est vrai pour les pays européens ou américains, il l'est

d'autant plus pour les pays en voie de développement et principalement l'Afrique traditionnelle. L'Afrique vient, en plus, de subir une dévaluation dans un contexte de pauvreté technologique qui l'oblige à importer une grosse partie des équipements de production.

Pour les agriculteurs de certaines zones de production motorisée, l'un des objectifs prioritaire est donc de réduire les charges avec une contrainte supplémentaire qu'est la protection de l'environnement (principalement protection des sols). Parmi ces charges, les charges liées à la mécanisation prennent une part importante, il est donc judicieux de se pencher sur leur structure. Pour illustrer ce propos, ces charges de mécanisation sont estimées à 25 % des coûts de production pour une région de grande culture en France. En comparaison, au Sénégal, en riziculture irriguée, les charges de mécanisation représentent 33 % des charges totales et ne concernent, de plus, que la préparation du sol et la récolte.

Si l'on regarde les coûts d'un chantier de travail du sol (tableau I), on se rend compte que trois postes sont particulièrement élevés. Il s'agit :

- de l'intérêt du capital et des amortissements ;
- de la dépense en carburant ;
- des charges d'entretien et de réparation.

L'importance du premier poste montre l'attention particulière à apporter au choix des équipements qui, de nos jours, ne sont plus subventionnés. La hauteur de ce poste est fonction de trois éléments : l'intérêt du capital, le niveau d'investissement, le temps de fonctionnement annuel.

L'intérêt du capital est un paramètre peu modifiable, il est fonction de la situation politico-économique. L'équipement, dans ces régions d'Afrique, ne peut plus être individuel, il est, soit collectif (association de paysans), soit la propriété d'une entreprise de travaux agricoles. Le choix du niveau de puissance se raisonne plus en termes de capacités des matériels plutôt que de surface à travailler. Il s'agira donc de choisir d'une part le niveau de puissance du tracteur nécessaire et suffisant et d'autre part des outils adaptés au niveau de puissance du tracteur. D'une façon assez globale, le prix d'une cellule motrice est directement lié à son niveau de puissance. Quant au temps de fonctionnement annuel, les charges horaires sont inversement proportionnelles au temps d'utilisation annuel.

La dépense énergétique peut aussi être maîtrisée : elle est liée à trois principaux facteurs :

- le mode de conduite du chauffeur : le choix du rapport de vitesse, celui du régime moteur, l'adéquation entre l'outil et la cellule motrice sont autant de facteurs qui vont influencer sur la consommation ;
- les temps de travaux et la période d'intervention : l'utilisation d'outil combinés peut réduire la dépense ; le choix judicieux d'un outil peut limiter le nombre de passages, et faciliter l'intervention à un moment plus propice ;
- la qualité du réglage et de l'entretien des matériels : le mauvais réglage ou entretien entraîne une demande énergétique supérieure : un soc de charrue mal affûté peut demander 20 % de puissance nécessaire en plus.

L'importance des charges d'entretien et de réparations est moindre que les deux précédentes dans des conditions normales d'utilisation. Cependant, dans les conditions difficiles que sont celles des Ped, ces charges peuvent augmenter de façon importante par

manque de connaissances techniques. Une bonne formation de base pourrait pourtant facilement pallier ce type de problème.

En fait, bien maîtriser ses dépenses de mécanisation équivaut en grande partie à bien choisir son niveau de puissance et à bien utiliser la puissance disponible. D'où l'intérêt de connaître les dépenses énergétiques des différents matériels et leurs structures (puissance utile, pertes) en fonction des conditions d'intervention et des résultats que l'on cherche à obtenir.

Une méthode : connaître la façon d'utiliser la puissance

Rappels

Le tracteur est une source d'énergie destinée à animer un outil et malheureusement, comme dans tout transformateur d'énergie, il y a des pertes. Aujourd'hui, les cellules motrices sont de plus en plus souvent équipées de systèmes permettant de mesurer les paramètres influant sur les performances, et de là minimiser les pertes, mais ils sont peu utilisés.

L'énergie est dissipée de deux façons : de façon utile, c'est-à-dire qui permet de réaliser le travail et de façon « inutile », qui correspond à des pertes qu'il faut minimiser.

La puissance disponible

La puissance est fournie par le carburant transformé en énergie mécanique dans le moteur. Déjà à ce niveau, les 2/3 de l'énergie contenue dans les carbu-

Tableau I. Coûts d'un chantier de travail du sol (Havard 1996).

Détails des charges	Montant en FF/h			
	Tracteur	Cover crop	Ensemble	
Frais fixes	Intérêt du capital	23,43	3,76	27,28
	Assurances	P.M.	P.M.	P.M.
	Charges d'abri	P.M.	P.M.	P.M.
	Impôts et taxes	P.M.	P.M.	P.M.
Frais variables	Amortissement	41,67	10,00	51,67
	Entretien et réparations	20,83	5,00	25,83
	Carburant	60,00	0	60,00
	Lubrifiant	19,80	0	19,80
	Salaires	12,5	0	12,5
Frais généraux	0		0	
Prix de revient horaire en FF	169,23	18,75	188,08	

rants sont perdus, le 1/3 restant est utilisable suivant trois formes (figure 1) :

- à la prise de force, la liaison moteur-prise de force est presque directe, la quasi-totalité de la puissance moteur est alors disponible ;
- à la barre, le transfert de la puissance se fait par la boîte de vitesse jusqu'aux roues ;
- aux prises hydrauliques, le moteur du tracteur entraîne une pompe à huile. L'énergie est disponible aux prises hydrauliques.

Les pertes

A chacune de ces différentes formes correspondent des pertes plus ou moins importantes :

- entre le moteur et la prise de force : pertes dans les transmissions (assez faibles) ;
- entre le moteur et les roues (ou essieu) : pertes dans les transmissions (assez faibles) ;
- entre les roues et le sol : pertes par glissement et roulement (quelquefois importantes) ;

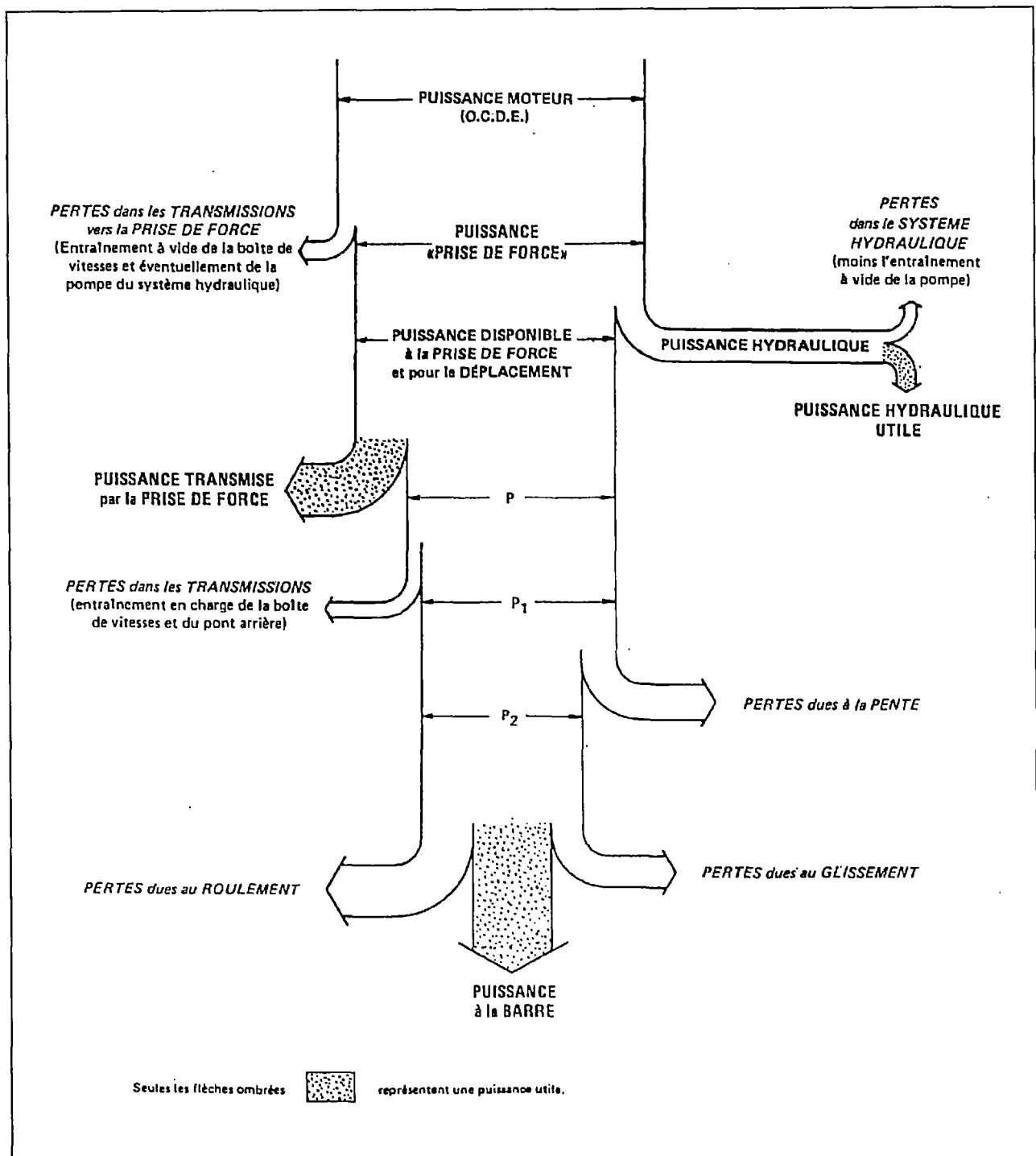


Figure 1. Répartition de la puissance moteur dans le cas général (Cemagref).

- dans les circuits hydrauliques : pertes par écoulement de l'huile ;
- pertes exogènes : pertes dues à la pente.

Certaines seront relativement constantes (pertes dans les transmissions), d'autres seront fonction des conditions extérieures (pertes par glissement, par roulement et dues à la pente).

Les économies possibles

Elles sont fonction du type de préoccupation. Du point de vue du tractoriste, il s'agira d'une recherche particulière de l'optimum mécanique par :

- l'entretien du tracteur et de ses outils (important en Ped) ;
- l'adaptation et le réglage des outils (choix de la dimension des outils...) ;
- l'utilisation correcte de l'ensemble tracteur-outil : choix du rapport de boîte, du niveau de charge et du régime du moteur, des conditions d'intervention...

L'agronome procédera à un choix des façons culturales donc des outils (choix qualitatif). La préoccupation du gestionnaire sera d'organiser efficacement les chantiers.

Dans ce document, nous ne traiterons que du premier type de préoccupation et c'est dans cette optique qu'un équipement métrologique embarqué a été mis au point.

Un équipement pour mesurer les performances des matériels aux champs

Il s'agit de composants qui sont installés sur le tracteur ou les outils agricoles et qui vont permettre l'enregistrement de certains paramètres caractéristiques.

Cet équipement (figure 2) est constitué de :

- une série de capteurs qui vont quantifier des paramètres physiques en une grandeur électrique ;
- une centrale d'acquisition de données qui gère l'acquisition, effectue éventuellement un premier traitement et stocke les résultats ;
- un système de liaison entre les capteurs et la centrale ;
- un système de liaison avec l'ordinateur pour le transfert des programmes ou des données.

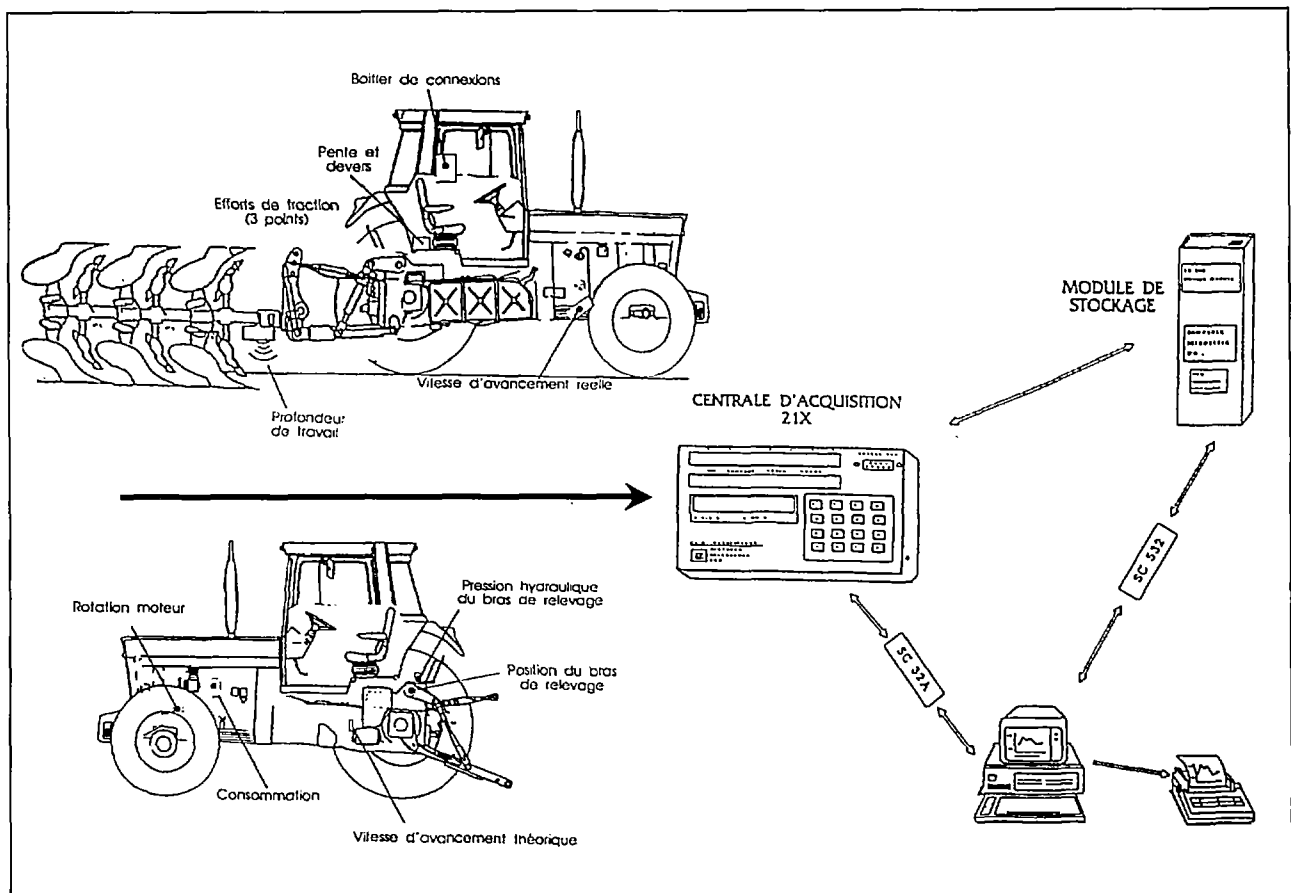


Figure 2. Acquisitions et traitement des données.

Les capteurs

Les capteurs (tableau II) transforment les grandeurs physiques (exemple : rotation, vitesse...) en une grandeur électrique. Pour la plupart, originaires de l'industrie, ils sont de trois types dont deux couramment utilisés¹ : les capteurs analogiques et les capteurs logiques.

Dans les capteurs analogiques, la grandeur électrique est fonction de la grandeur physique (généralement proportionnelle), exemple le thermocouple. Dans les capteurs logiques, la grandeur physique est transformée en une série d'impulsions en fonction du temps, on les appelle aussi compteur : exemple le compte-tours.

La centrale d'acquisition

Les capteurs sont connectés à la centrale d'acquisition qui, par l'intermédiaire d'un programme, va gérer la lecture des mesures des différents capteurs et les stocker.

Après différents essais, notre choix s'est porté sur le modèle 21X ou Cr10 de Campbell scientifique qui a les qualités suivantes :

- matériel portable ;
- alimenté par batteries ;
- entrées logiques, analogiques (et numériques avec programmation) ;
- pré-traitement interne possible ;
- temps de scrutation de 0,0125 s à 1,8 h ;

1. Les capteurs numériques sont peu utilisés, dans ce cas le signal est transformé en codage binaire.

Tableau II. Différents types de capteurs utilisés avec la chaîne de mesure.

Capteurs	Paramètres mesurés	Signal	Précision
Radar	distance réelle	logique	$\pm 1 \% + E_{ts}$
Détecteur de proximité	vitesse des roues	logique	E_{ts}
Détecteur de proximité	régime moteur	logique	E_{ts}
Débitmètre	consommation	logique	$\pm 1 \% + E_{ts}$
Inclinomètre	penne	analogique	$\pm 1 \%$
Barreau dynamométrique	force	analogique	$\pm 0,1 \%$
Capteur ultrasonique	distance au sol	analogique	$\pm 1 \%$
Capteur de pression	pression	analogique	$\pm 1 \%$
Codeur absolu	position angulaire distance (conversion)	analogique	$\pm 0,1 \%$
Potentiomètre	position angulaire	analogique	$\pm 1 \%$
Codeur	outil/chauffeur	numérique	

E_{ts} : erreur due au temps de scrutation.

- allocations mémoire : 20 000 pour le 21X, 30 000 pour le Cr10 ;

- affichage digital des lectures en temps réel ;

- communication avec micro-ordinateur par interface et programme spécifique ;

- programmation directe par clavier intégré ou par logiciel.

Les enregistrements sont effectués de façon autonome, les données sont stockées dans la mémoire de la centrale d'acquisition. Les essais terminés, elle est connectée à un ordinateur et les enregistrements sont transférés sous forme de fichiers lisibles sur un tableur.

Les données déduites des données enregistrées

Les capteurs mesurent des paramètres physiques simples comme des vitesses de rotation, des températures... De ces mesures, on peut calculer certains paramètres plus élaborés.

La puissance développée

En ce qui concerne les tracteurs agricoles, la puissance développée est déduite de la vitesse de rotation du moteur et de la consommation horaire. Le calcul se fait généralement par voie graphique à partir des courbes de référence à l'aide d'un petit programme informatique ou, quand on dispose d'un logiciel de modélisation, par voie mathématique (figure 3).

Le patinage

Le patinage est déduit à partir de la vitesse réelle (mesurée par le radar) et de la vitesse théorique (vitesse des roues x circonférence de la roue) :

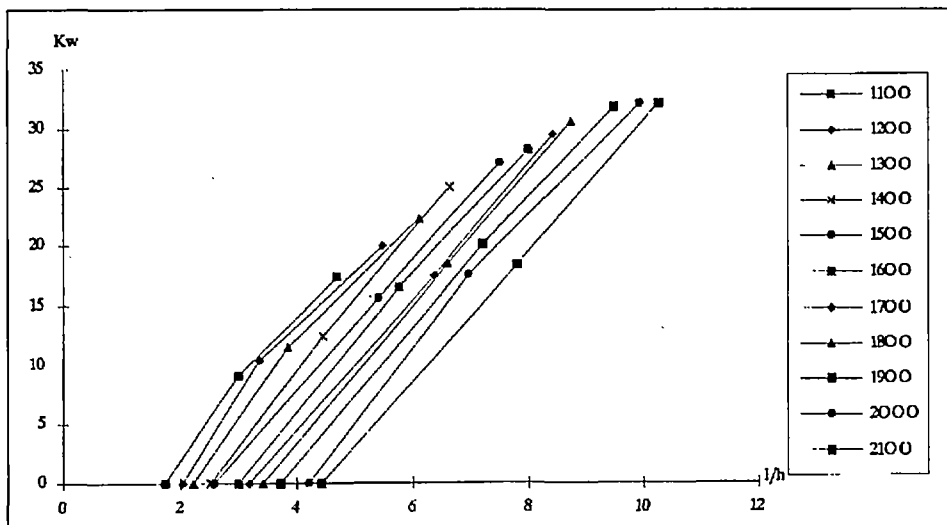


Figure 3. Puissance en fonction de la consommation par centaines de tour moteur.

$$\text{patinage} = \frac{V_{\text{théorique}} - V_{\text{réelle}}}{V_{\text{théorique}}} \times 100$$

$V_{\text{théorique}}$ = vitesse théorique
 $V_{\text{réelle}}$ = vitesse réelle

Les temps de travaux

L'information sur la position des bras de relevage nous permet de savoir si l'outil travaille ou non (bras de relevage baissés = outil au travail), dans ce cas, on peut calculer la surface horaire travaillée :

$$\text{Surface}_{\text{horaire}} = \frac{D_{\text{parcourue}} \times l_{\text{travail}}}{T_{\text{total}}} \times 100$$

$D_{\text{parcourue}}$ = distance parcourue au travail (mesurée par le radar).

l_{travail} = largeur moyenne de travail.

T_{total} = temps total.

Puissance à la barre

Quand l'effort à la barre n'est pas mesuré, on peut obtenir la puissance à la barre en déduisant les différentes pertes (figure 1).

$$\text{Puissance}_{\text{barre}} = (1)P_{U_{\text{pdf}}} - (2)P_{\text{transm}} - (1)P_{\text{epat}} - (2)P_{\text{eroul}} - (1)P_{\text{epente}}$$

$P_{U_{\text{pdf}}}$ = puissance à la prise de force mesurée au banc dynamométrique.

P_{transm} = pertes dans les transmissions.

P_{epat} = pertes au patinage.

P_{eroul} = pertes au roulement, fonction du poids du tracteur et de l'état du sol.

P_{epente} = pertes dues à la pente.

(1) mesuré (2) estimé.

Traitement des données

Le volume des données recueillies est généralement important. Il ne fera l'objet d'un traitement spécial, avec un tableur ou un logiciel de statistique, que lorsqu'elles correspondront à un essai spécifique : c'est le cas de l'expérimentation (voir exemple en annexe 1).

Pour des relevés plus répétitifs tels que le suivi des performances, il est préférable de recourir à un programme de dépouillement automatique. Ce programme aura pour avantage le traitement rapide des données mais aussi l'inconvénient de rigidifier les conditions d'acquisition et le type de résultats obtenus. Le Cirad-Sar a mis au point un programme (TRACTEUR) pour analyser les performances d'un équipement pendant la réalisation d'une opération culturale (voir exemple de données et de résultats en annexe 2).

Pour des études fines reliant conditions d'intervention et performances, il est difficile de travailler dans des parcelles homogènes impossibles à mettre en place, par contre, il est préférable d'utiliser les hétérogénéités qui nous donnent une large gamme de conditions initiales. La géostatistique nous permet alors de cartographier les différentes données.

Cette démarche n'est faisable que s'il est possible d'associer en chaque point de la parcelle, conditions d'intervention et performances du matériel. Certaines méthodes statistiques nous permettent d'établir une cartographie des paramètres si l'on peut les positionner. S'il n'est pas difficile de positionner les paramètres relatifs au sol (humidité, densité), les paramètres caractérisant les performances du tracteur en mouvement nécessitent un système de positionnement en temps réel. Plusieurs systèmes sont disponibles sur le marché dans une gamme de prix étendue. Compte tenu de l'évolution du système Gps, tant pour la qualité que pour son coût, il y a de bonne chance pour qu'il devienne un outil privilégié pour ce type d'étude.

En conclusion

Pour effectuer le relevé des performances des équipements agricoles, la chaîne de mesure, élaborée par le Cirad-Sar est globalement au point. Cette chaîne permet différents types de travaux :

- des expérimentations fines en milieu contrôlé permettant d'associer des résultats agronomiques à des rendements énergétiques des machines qui les réalisent ;
- des suivis de performances des équipements en milieu réel, dans ce cas, c'est le côté plus technico-économique qui est l'objet de l'étude et, faute de système automatique, les conditions d'intervention ne peuvent qu'être sommairement relevées et enregistrées ainsi que le lieu d'intervention du matériel ; c'est, dans ce cas, le nombre des observations qui est privilégié à la finesse de l'observation.

Dans le cas de suivis prolongés, il faut étudier les méthodes de traitement et d'analyse rapide de ces données.

MOUSSET J., 1994. La modélisation du travail pour le conseil en agroéquipement. Recueil des communications de la journée d'étude "Organisation du travail", Cedag, 13-12-1994, Rennes, 7 p.

PIROT R., 1992. Automation of in-field data recording : recent research work at CIRAD-SAR In *Proc. Ag'Eng Congress*, Upsala, Sweden, 1-4 June 1990, 2 p.

PIROT R., 1996. L'acquisition et la gestion de références en agriculture : la cas des équipements en PED. Document de travail CIRAD-SAR, 12 p.

PERRET S., PIROT R., BARRET P., GALLET P., DEURVILHER D., 1994. Etude et définition d'un appareillage électronique d'acquisition de données embarqué sur tracteur. CIRAD-SAR, 20 p + annexes.

PERRET S., RAZAKA B., PIROT R., 1994. In field measurement of tillage implements performances : practical applications in soil tillage relations studies. In *International conference on agricultural engineering. AgEng'94*, Milan, Italie, p. 647-648.

VITLOX O., DEPOORTER J., KETS R., 1992. Essais des tracteur à la prise de force. Station de Génie Rural. CRA de Gembloux. Note technique n° 57.

Références bibliographiques

HAVARD M., 1996. Mécanisation agricole : Exemple d'outils et de méthodes de calcul économique. Dossier de cours CIRAD-SAR, 19 p. + annexes.

HAVARD M., LE GAL P.Y., PIROT R., 1994. Towards a decision support system integrating different kinds of knowledge to choose and manage field equipment. In *International conference on agricultural engineering. AgEng'94*, Milan, Italie. p. 1052-1060.

Annexe 1

Exemple de résultats dans le cas d'une expérimentation visant à définir l'humidité du sol optimale pour l'intervention d'un équipement tracteur-charrue (Perret, 1994)

Mesures effectuées sur chaque parcelle élémentaire (la longueur est fonction de la vitesse de déplacement et du temps de scrutation de la centrale d'acquisition, la largeur est la largeur de travail de l'outil).

Tracteur	Outil	Sol
Vitesse réelle (m s ⁻¹)*	Puissance à la barre (kW)*	Humidité volumique (g cm ³)***
RPM moteur (tour min ⁻¹)*	Profondeur de travail (m)*	Densité sur mottes (g cm ⁻³)***
Consommation GO (l h ⁻¹)*	Largeur de travail (m)***	Résistance à la pénétration (M Pa)***
Puissance prise de force (kW)**		Poids de la bande travaillée (kg)**
Glissement (%)**		

*relevés effectués par la chaîne de mesure au champs

**données calculées

***mesures relevées manuellement

Résultats synthétiques obtenus après traitement des données

(Les parties en grisé correspondent aux conditions optimales pour chaque paramètre)

Sol	humidité de surface	>35%	35-39%	<39%
	résistance à la pénétration	importante	modérée	faible
Tracteur	risque de compaction	non	non	oui
	glissement	modéré	modéré	important
Résultats	demande énergétique globale	importante	modérée	importante
	pertes d'énergie	modérées	faibles	importantes
	lit de semence	grosses motte dures	petites mottes fiables	et terre fine

Annexe 2

Exemple de résultats obtenus pour des relevés de performances de matériels au champ (Pirot 1990).

Données brutes du fichier Cross.Def

Temps h : m : s	Vitesse m/s	R.P.M. Tr/min	Consommation l/h	Pente %	Devers %	Profondeur Cm	Outil 1=Trav	Rep. N°
10:56:16	1,119	2004	07,92	3,15	-25,0	+45,88	0	0
10:56:21	0,810	1992	10,80	,244	-15,4	+45,99	0	0
10:56:26	0,533	2016	10,08	-7,28	-38,3	+46,10	0	0
10:56:31	1,012	1992	10,80	1,44	-38,6	+46,23	0	0
10:56:36	0,628	1992	08,64	-3,12	-26,7	+45,82	0	0
10:56:41	0,887	1956	20,88	-4,42	-27,4	+48,32	1	0
10:56:46	1,301	1656	25,92	-9,92	-36,0	+51,91	1	2
10:56:51	1,679	2088	29,52	-6,42	-22,1	+45,93	1	2
10:56:56	1,562	2052	30,24	-,293	-3,43	+48,74	1	2
10:57:01	1,430	2016	30,96	,594	-4,22	+54,20	1	2
10:57:06	1,350	1896	29,52	1,93	-1,78	+52,55	1	0
10:57:11	1,501	2016	30,96	,233	-6,86	+53,52	1	0
10:57:16	1,554	2028	30,96	1,91	-2,16	+52,59	1	0
10:57:21	1,616	1980	30,24	-2,10	-10,8	+51,74	1	0
10:57:26	0,410	2052	15,12	9,77	-2,89	+45,64	0	0
10:57:31	1,077	1992	16,56	2,19	17,5	+45,77	0	0

Les résultats techniques

Date : 1.12.

Marque du tracteur : Massey Ferguson.

Type du tracteur.

Lieu : Maurice.

Type de sol : humide.

Etat de surface : terrain avec énormément de souches.

Outil : pulvériseur.

Durée de l'essai : 0 h 5 mn 20 s.

Temps de travail : 0 h 2 mn 55 s Pourcentage de fourrières : 45,3 %.

Surface moyenne horaire travaillée avec les fourrières : 0,88 ha/h.

Surface moyenne horaire travaillée sans les fourrières : 1,61 ha/h.

Consommation horaire avec les fourrières : 20,06 l/h.

Consommation horaire au travail : 27,01 l/h.

Moyenne des consommations spécifiques au travail : 0,30 l/kw/h σ : 0,01 l/Kw/h.

Moyenne des puissances Pto pendant le travail : 91,58 kw σ : 13,55 kw.

Puissance maximale Pto pendant le travail : 107,31 kw.

Effort maximal : 64,16 kN ; minimal : 27,04 kN ; moyen : 8,55 kN.

Vitesse moyenne du travail : 5,04 km/h ; glissement moyen : 19,6 %.

Nbre d'enrayures : 4 ; enrayure max : 69,22 m ; enrayure min : 52,12 m.

Prof. travail max : 57,4 cm ; min : 45,9 cm ; moy : 50,3 cm σ : 2,7 cm.

Largeur moyenne de travail : 3,20 m.

Remarques : sans.

Méthode de mesure des paramètres énergétiques des outils de travail du sol

El Hassan BOURARACH¹, Hermann KNECHTGES²

¹Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Département de machinisme agricole, BP. 6202, Rabat, Maroc.

²Fachhochschule Nürtingen, Ecole d'agriculture et d'économie agricole, Allemagne.

Résumé : Le présent article présente une chaîne de mesure des paramètres énergétiques des outils de travail du sol. Les efforts de traction sont déterminés à partir des données de capteurs de force à jauges de contraintes insérés dans les bras inférieurs et d'un capteur de force à jauges de contraintes et d'un inclinomètre insérés dans le bras supérieur. La vitesse d'avancement réelle est donnée par un radar à effet doppler. La consommation en carburant est mesurée à l'aide d'un débitmètre volumétrique. Le taux de glissement de roues, le régime moteur et la vitesse de rotation de la prise de force sont déterminés à partir des signaux d'un capteur à inductance, obtenus par le mouvement de rotation d'une roue dentée liée à ces différents éléments en mouvement. Les signaux sont enregistrés sur une disquette informatique à l'aide d'une centrale d'acquisition des données. Ces données sont ensuite transformées et traitées à l'aide d'un logiciel développé spécialement pour la centrale d'acquisition. La chaîne de mesure a montré une bonne fiabilité et facilité d'utilisation pour la mesure des paramètres énergétiques des outils de travail du sol. Cette chaîne a l'avantage de ne pas changer la géométrie du système tracteur-outil. Contrairement aux méthodes indirectes, la méthode développée donne l'énergie effectivement demandée par l'outil indépendamment de la puissance et du type d'attelage du tracteur.

Les paramètres énergétiques des outils de travail du sol sont déterminants dans la composition du coût de production, d'une part du fait du prix de plus en plus élevé de l'énergie et d'autre part du fait du poids de la consommation du carburant dans le bilan global des opérations culturales. Par ailleurs, la connaissance des paramètres énergétiques aide à une meilleure conception des outils de travail du sol qui sont souvent soumis à des sollicitations diverses et élevées.

Dans la pratique, la consommation en carburant et la puissance requise sont les paramètres-clés pour le choix des outils et des séquences de travail du sol. Cependant pour une évaluation plus précise qui tienne compte des conditions de travail et isole l'outil des effets dus au tracteur, la mesure d'autres para-

mètres est nécessaire. Il s'agit de la consommation et du régime moteur, de l'effort de traction à la barre et des vitesses théoriques et réelles, ou de couples, et du régime prise de force pour les outils animés.

Objectifs de la chaîne développée

La chaîne de mesure présentée a été développée dans le cadre d'un projet financé par la Cee (STD 3 0160/D¹) pour l'étude des performances des outils de travail du sol. Pour son utilisation dans les pays en voie de développement, cette chaîne doit être simple au montage et à l'utilisation. Elle doit tenir compte des conditions d'utilisation de mesure des paramètres énergétiques dans les opérations de travail du sol et, plus particulièrement, des conditions climatiques et de l'environnement technique spécifiques à la plupart des pays en voie de développement.

Pour mesurer les efforts demandés par les différents équipements agricoles plusieurs méthodes sont utilisées (figure 1). La première méthode, la méthode du cadre dynamométrique (système I), est largement utilisée à travers le monde. Elle permet de mesurer les trois composantes de l'effort de traction, mais elle a

1. Ce projet réalisé au Maroc a été mené conjointement par l'Institut für Landtechnik, Université de Giessen, Allemagne; le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, département des systèmes agroalimentaires et ruraux, France et l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Maroc.

l'inconvénient de changer la géométrie de la liaison du système tracteur outil. La deuxième série de méthodes consiste à insérer des capteurs dans le système de liaison pour les attelages trois points (systèmes II et III) ou pour les outils traînés après modification (système V) ou, au niveau de la chape d'attelage, pour les outils traînés (système IV). Une troisième méthode est particulièrement utilisée dans le cas de suivi d'un nombre important de tracteurs ou quand il faut utiliser un tracteur particulier sur lequel il est difficile de faire de grandes interventions. Cette méthode, que nous appelons indirecte, permet de déterminer la puissance demandée par l'outil en se basant sur la consommation du tracteur en carburant. Elle est flexible et facile à mettre en œuvre mais elle reste approximative puisqu'elle englobe des pertes difficiles à mesurer et qui sont fonction des conditions du sol (pertes par glissement et par roulement), de l'état mécanique du tracteur et de son dimensionnement par rapport à l'outil et de la qualité du carburant.

Description de la chaîne

Le tracteur à quatre roues motrices est équipé d'une chaîne de mesure composée des éléments suivants :

- une centrale d'acquisition de données (Data-logger);

- deux capteurs de force dans les bras inférieurs du tracteur;
- un capteur de force dans la barre supérieure;
- un inclinomètre sur le bras supérieur;
- un couplemètre et tachymètre à la prise de force;
- un capteur du régime moteur;
- deux capteurs des vitesses de rotation des roues arrières pour la mesure de la vitesse théorique;
- un débitmètre pour la mesure de la consommation de carburant;
- un radar pour la mesure de la vitesse réelle d'avancement;
- un contacteur à infrarouge;
- un amplificateur à 3 canaux;
- un amplificateur à 1 canal.

L'acquisition et le stockage des données se fait grâce à un datalogger : LAX 55², comportant 16 canaux analogiques (12 bit, A/D vitesse de conversion 50 us/canal), 4 canaux à impulsion (16 bit) et 8 canaux digitaux. Sa capacité de mémoire est de 128 kbit, avec possibilité de sortie RS-232C. La tension d'alimentation est de 12 V en continu ou de 220 V en alternatif. Ses dimensions sont 320 mm x 320 mm x 80 mm et son poids est de 5,5 kg.

La détermination de l'effort de traction se fait à travers la mesure des forces agissant au niveau des bras inférieurs et de la barre supérieure et la mesure de l'inclinaison de la barre supérieure (figure 2).

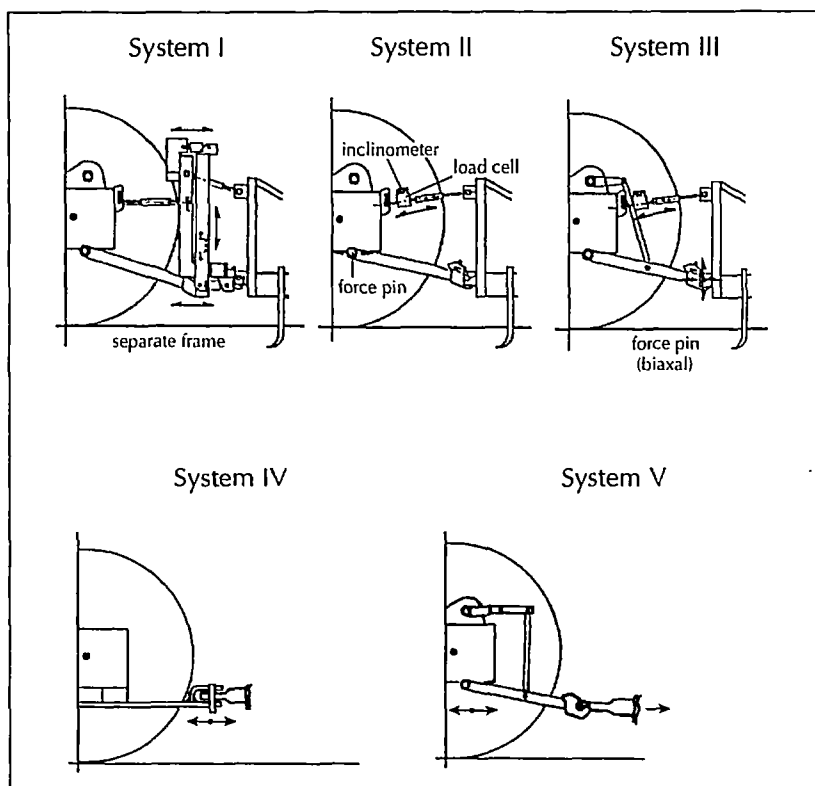


Figure 1. Méthodes de mesures des efforts requis par les outils du travail du sol.

Deux axes capteurs type Brandt LB à jauges de contraintes sont utilisés pour la mesure de la composante horizontale de la force de traction dans les bras inférieurs. Leur intervalle de travail est de 0 à 50 kN, leur sensibilité est de 1 mV/V. Le diamètre dans ces capteurs est de 37,2 mm, ce qui nécessite un alésage manuel supplémentaire de 0,2 mm avant leur montage.

Des chaînes croisées de stabilisation sont utilisées entre les deux bras inférieurs pour éviter tout contact latéral avec des pièces autres que les capteurs (figure 3).

La force horizontale au 3^e point est mesurée à l'aide d'un capteur de force commercial, intégré dans la barre supérieure, et d'un inclinomètre. Le capteur de force est de marque HBM type U2An avec une plage de 0 à 5 kN, une sensibilité 2 mV/V, une tolérance de sensibilité de 2 % en traction et de 5 % en compression. L'inclinomètre Schaevitz Accustar alimenté en courant continu stabilisé donne l'inclinaison instantanée du bras supérieur. Une augmentation de l'inclinaison d'un degré correspond à une chute de la tension de 43,94 et 47,45 mV respectivement pour une tension d'alimentation de 10 et 12V.

L'utilisation de ce système de mesure pour des outils traînés, nécessite d'adopter un montage judicieux transmettant intégralement les forces horizontales de traction. Ce montage comporte des pièces qui prolongent les bras de réglage de façon à ce que les chandelles soient perpendiculaires aux bras inférieurs (système V, figure 1).

La mesure du régime du couple de travail des outils animés est assurée par un couplemètre Walterscheid type : WAL 2,5 d'une capacité de 0 à 2,5 kNm, d'une sensibilité de 0,65 mV/V, inséré dans l'arbre à cardan et relié à un amplificateur Hottinger kws 30 73. Le signal délivré est analogique, alors que la

mesure de la vitesse de rotation de la prise de force repose sur un système inductif délivrant des impulsions. La mesure de vitesse de rotation des roues arrières et du moteur est aussi assurée par des capteurs à induction.

Un radar Dickey John à effet Doppler, placé sur le côté du tracteur et monté face vers l'arrière avec un angle de 35°, mesure la vitesse d'avancement réelle du tracteur — il génère une fréquence proportionnelle à la vitesse d'avancement du tracteur.

Le débitmètre utilisé est de type volumétrique (PLU 116). Le carburant, en excès, est réintroduit dans le circuit d'alimentation après avoir été refroidi dans un échangeur de chaleur qui utilise, comme liquide de refroidissement, le carburant se trouvant dans le réservoir. Le débitmètre peut délivrer aussi bien des signaux analogiques que digitaux. Un débit instantané 60 l/h correspond à une tension de 9 V.

Des amplificateurs Hottinger kws 30 80, 3 canaux kws 30 73, 1 canal sont utilisés pour l'excitation des capteurs de forces et pour l'amplification du signal de sortie.

Mise au point et étalonnage

Le capteur de force des bras inférieurs

A l'étalonnage en laboratoire, l'axe capteur Brandt a montré une bonne linéarité en effort de traction ($Y[V] = -0,2021 X[kN] + 0,0759$. $R = 0,977$), ainsi qu'une bonne sensibilité. Alors qu'en effort de com-

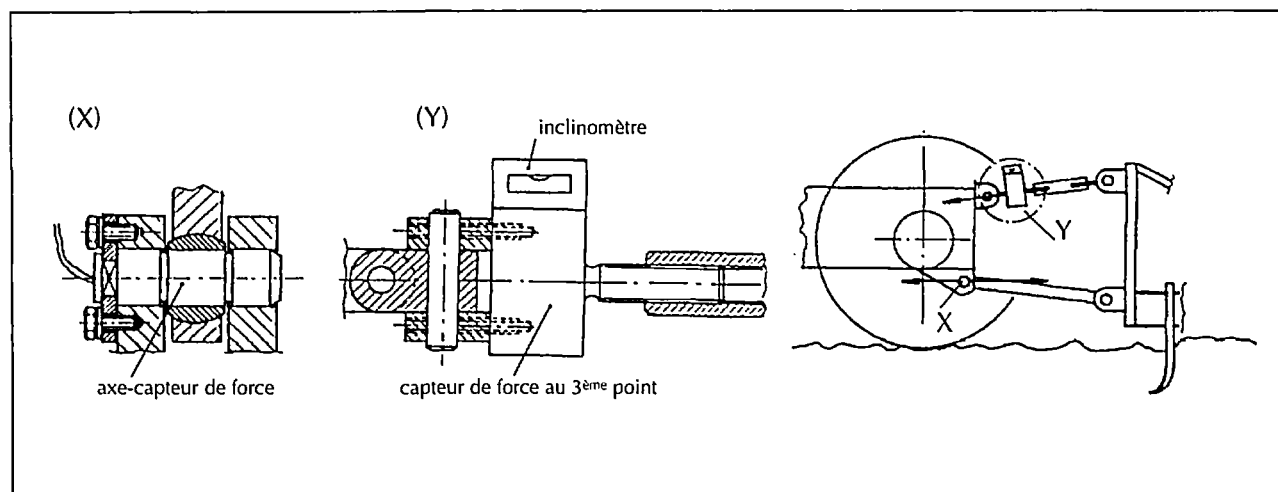


Figure 2. Méthode utilisée pour la mesure de l'effort de traction dans le cas des outils portés.

2. Le nom de marque est donné pour faciliter la description des éléments de la chaîne.

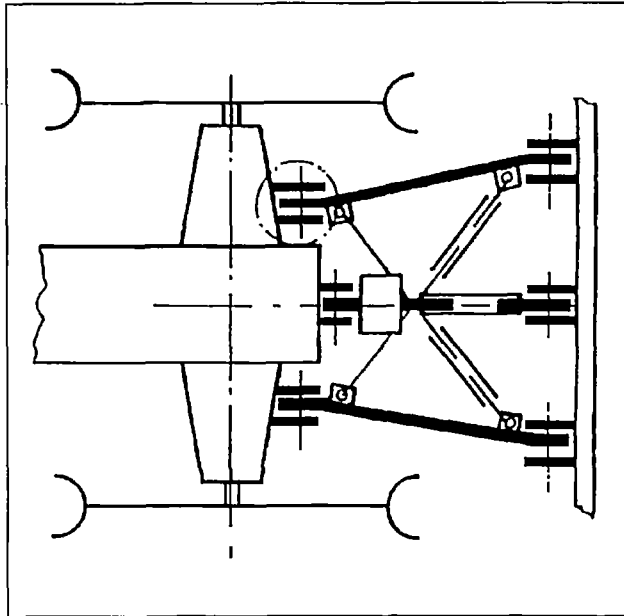


Figure 3. Chaînes croisées de stabilisation des bras inférieurs.

pression nous avons remarqué une chute de tension de 0,18 V pour chaque 10 kN. En changeant le sens d'application de la force agissante, on constate un effet d'hystérésis de 0,67 %.

La mesure du signal délivré par le capteur, quand on le fait tourner de sa position normale (position 0) jusqu'à 180° (40) puis jusqu'à la position opposée c'est-à-dire à 360° (position 80) sous une charge de 5,945 kN, montre que le capteur est peu influencé par la composante verticale mais présente tout de même une hystérésis de 0,18 % due en particulier à la variation du sens de la composante horizontale.

Le capteur du couple à la prise de force

Le couplemètre a été étalonné statiquement au laboratoire. Les résultats ont montré une bonne linéarité des mesures. Le coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées par le couplemètre et celles appliquées réellement au capteur est de 0,43 %.

Le couple (Nm) est déterminé par la fonction :

$$C = 72,464 Y + 0,007 \quad R = 0,998$$

où Y est la tension mesurée en volt.

Le calibrage du capteur de régime de la prise de force donne 1 impulsion/tour. Le régime moteur quand à lui est donné par le facteur 0,0138 tour/impulsion.

Le débitmètre

Le débitmètre mesure des débits de 0 à 60 l/h et la tension délivrée varie de 0 à 9 V. Chaque impulsion

correspond à 1 cm³. Pour un volume de 550 cm³, l'erreur de mesure est de 0,9 % et pour un volume de 1 012 cm³, elle est 2 %.

Le radar

L'étalonnage du radar a donné un facteur de détermination de la vitesse d'avancement de 97,89 impulsions/m.

Procédure d'acquisition et de transformation des données

L'opérateur a la possibilité de suivre sur écran LCD de la centrale, au cours de l'acquisition, la courbe d'un ou de deux paramètres choisis (paramètres généralement les plus importants, où il y a des risques d'erreurs ou pour lesquels on soupçonne une anomalie de mesure). Dans un menu principal, l'utilisateur a la possibilité de choisir les conditions d'enregistrement :

- nouveau ou ancien fichier de données. Ceci permet d'éviter d'écraser les fichiers des mesures précédentes ;
- nombre maximum de mots par canal. Ceci permet dans certains cas d'homogénéiser, la taille des données ;
- date et heure ;
- nombre de canaux analogiques (≤ 12), digitaux (≤ 8) et impulsions (≤ 4) ;
- mode de démarrage/arrêt des mesures (manuel, automatique) ;
- identification du canal qui commande le déclenchement automatique des mesures ;
- intervalle de temps de mesure 50 μ s, 51 μ s, 52 μ s, 999 mn.

En démarrage automatique des mesures, on place deux réflecteurs de lumière à une distance fixée (20 à 50 m). Leur face réfléchissante est parallèle à la direction d'avancement du tracteur. On commence à travailler le sol quelques mètres avant le premier réflecteur (3 à 6 m). Cette distance permet de stabiliser les différents paramètres de fonctionnement des systèmes. Arrivé à la hauteur du premier réflecteur, un capteur à infrarouge, monté sur le côté du tracteur, détectant le rayon infrarouge qu'il émet lui-même et réfléchi par réflecteur, déclenche instantanément les mesures. A l'autre bout du champ, le même capteur entre en action en passant devant le deuxième déflecteur et arrête les mesures. Le démarrage et l'arrêt des mesures peut se faire manuellement. L'arrêt des mesures

déclenche automatiquement le stockage des données recueillies sur disquette (3"1/2).

Ces données brutes recueillies par le datalogger sont en format binaire. Elles sont transformées en format Ascii (utilisable pour les tableurs courants) par un logiciel appelé Lax-Trans (Release 3, version 2.2) développé par Dycker. Ce logiciel permet également d'introduire les transformations nécessaires pour obtenir les grandeurs physiques recherchées et de visualiser les graphes des données obtenues.

Conclusion

Au cours des essais, nous avons relevé un certain nombre d'avantages de la chaîne. Ce sont principalement :

- la précision satisfaisante des mesures eu égard à l'utilisation qui en est faite ;
- une programmation facile de la centrale d'acquisition des données ;

- une large gamme de variante de mesure particulièrement concernant leur fréquence et le mode de déclenchement ;

- une chaîne robuste résistant largement aux vibrations, à la poussière et relativement à la température ;

- une chaîne qui ne change pas la géométrie du système tracteur outil et qui ne prend en compte que ce qui est nécessaire pour l'utilisateur du matériel agricole ;

- une mise au point rapide, une fois le branchement fait, avant le démarrage des séries de mesures (10 à 15 min).

Cependant, cette chaîne de mesure présente certaines limites. L'opérateur doit veiller à la symétrie de la configuration des bras inférieurs dans le cas d'un déséquilibre, d'un outil dissymétrie ou d'un outil traînés. Le dépouillement des données des signaux à impulsions est fastidieux.

THÈME 2

Les méthodes de caractérisation du profil culturel

Utilisation de quelques outils portables pour évaluer le fonctionnement hydrique d'une parcelle cultivée en milieu tropical

J.L. CHOPART

Cirad-ca, BP 5035, 34032 Montpellier cedex 1, France

Résumé : On présente trois exemples d'utilisation de techniques d'étude en milieu réel ou peu contrôlé du fonctionnement hydrique du sol. Il s'agit de l'hydrodynamique de surface d'une parcelle cultivée, de son bilan hydrique, et de l'état physique du profil jugé à travers le développement du système racinaire. Les méthodes utilisées sont décrites, illustrées par quelques résultats et comparées à d'autres. Les caractéristiques hydrodynamiques de surface, qui contrôlent la plus ou moins grande sensibilité du sol au ruissellement et donc à l'érosion ont été évaluées par la méthode de l'infiltrométrie multidisques à succion contrôlée (perméamètre à disques). On calcule la conductivité hydraulique, la "sorptivité" capillaire, la dimension de pores hydrauliquement fonctionnels. L'un des meilleurs indicateurs de l'état physique d'un sol cultivé est son aptitude à être facilement colonisé par les racines de la culture. Actuellement, l'une des méthodes les plus appropriées paraît être celle basée sur la cartographie racinaire sur un profil de sol. Cette méthode, descriptive dans sa version originale, permet maintenant d'obtenir, indirectement, des informations quantitatives (longueur des racines par volume de sol, distances moyennes entre racines, taux d'exploration racinaire du sol). Les méthodes classiques d'évaluation des termes du bilan hydrique (tensio-neutroniques), ou plus nouvelles (Tdr), sont souvent trop lourdes pour du diagnostic agronomique. Dans l'immédiat, une solution paraît être l'utilisation de modèles de simulation du bilan hydrique. Pour être opérationnels, ces modèles doivent être simples avec des variables d'entrée d'obtention facile, et validés dans des milieux comparables. Ces outils d'évaluation au champ : i) de l'eau entrant dans le sol, ii) du capteur d'eau, iii) de l'évapotranspiration et du drainage, participent utilement à une meilleure compréhension des effets d'un outil ou d'un itinéraire technique sur le fonctionnement du sol et du peuplement végétal. Ils servent actuellement au diagnostic. Mieux intégrés dans des modèles de croissance et de fonctionnement du système climat-sol-peuplement végétal, ils pourraient aussi participer à la vocation de pronostic de ces modèles.

En Côte d'Ivoire, comme dans plusieurs autres milieux tropicaux, les études finalisées pour la mise au point de techniques de gestion du sol se font de plus en plus à l'intérieur de dispositifs situés en milieu réel, gérés par des spécialistes de recherche-développement ou

par les paysans eux-mêmes, loin du laboratoire, dans un environnement souvent peu favorable à une instrumentation lourde. La recherche en station doit aussi se faire, souvent, dans des conditions mal contrôlées. Ceci oblige les agronomes spécialistes des relations sol-machine et des relations sol-plante à adapter leurs outils permettant de caractériser l'état du sol et du peuplement végétal pour les rendre opérationnels en milieu réel.

On présentera trois exemples d'utilisation, en Côte d'Ivoire, de techniques d'étude en milieu réel ou peu contrôlé du fonctionnement hydrique du sol, dans un milieu où l'eau est l'un des principaux facteurs limitants. On a tenté d'évaluer l'aptitude du sol à :

- permettre l'infiltration de l'eau ;
- permettre la croissance des racines, capteurs de l'eau et des éléments minéraux ;
- assurer au peuplement végétal ses besoins en eau (Etr).

Ces trois outils n'ont pas la prétention d'être ni les seuls ni les meilleurs pour ce type de mesures. Ils ont été retenus pour leur aptitude à être opérationnels en conditions difficiles et en milieu réel.

Mesure de l'infiltrabilité du sol

Position du problème

La capacité du sol à infiltrer l'eau de pluie lors d'averses souvent très intenses conditionne le stock

d'eau que la culture aura à sa disposition. Elle conditionne aussi le volume d'eau amené à ruisseler, avec les risques consécutifs d'érosion. L'infiltrabilité du sol peut être mesurée avec des parcelles de ruissellement sous pluie naturelle (Roose, 1977) ou simulée (Asseline et Valentin, 1978 ; Casenave, 1982). Ces techniques peuvent être considérées comme la référence, mais sont lourdes à mettre en œuvre et perturbent le milieu cultivé. L'autre méthode est celle de "Muntz", ou double anneau. Apparemment plus légère, elle nécessite des quantités d'eau relativement importantes, ce qui réduit son caractère "portable" en milieu réel. De plus, la méthode Muntz, en appliquant une lame d'eau à la surface du sol, modifie l'état de surface de celui-ci.

Description de la méthode utilisée

Les caractéristiques hydrodynamiques de surface ont été évaluées par une méthode récente, l'infiltrométrie multidisques, issue des travaux de Smettem et Clothier (1989) et introduite en France par le Lthe de Grenoble (Vauclin *et al.*, 1991). La technique a été testée avec succès sur le terrain en Côte d'Ivoire, dès le début de l'année 1991 (Vauclin et Chopart, 1992). Le système de base est constitué de trois appareils comprenant chacun un disque de diamètre différent, muni d'une membrane perméable à l'eau, et d'un réservoir d'eau en communication avec le disque.

Ceci est rendu possible grâce à un réservoir de dépressurisation (figure 1) partiellement rempli d'eau. Dans cette eau plongent deux tubes capillaires, l'un en communication avec l'extérieur, l'autre met en communication les deux réservoirs. En désignant par h_1 la hauteur de la colonne d'eau surmontant l'extrémité inférieure du tube C1 et par h_2 la dénivellation entre le plan de la membrane et l'extrémité du tube C2, la pression effective de l'eau h_0 , exprimée en hauteur de liquide, au niveau de la membrane est : $h_0 = h_2 - h_1$.

La pression h_0 dans le réservoir de dépressurisation est négative (inférieure à la pression atmosphérique) dès lors que $h_1 > h_2$. Elle peut être réglée en faisant coulisser le tube C1.

Ce dispositif constitue en fait un vase de Mariotte à charge constante au niveau de la membrane en contact avec le sol, quel que soit le niveau de l'eau dans le réservoir d'alimentation. Le mode de fonctionnement des appareils et le mode de calcul des grandeurs physiques sont décrits de façon plus détaillée (Vauclin et Chopart, 1992).

A partir d'une mesure en régime permanent de flux d'eau à travers les trois disques, sous une charge légèrement inférieure à la pression atmosphérique, on calcule les deux paramètres moteurs de l'infiltrabilité du sol : la conductivité hydraulique (K_0) et la "sorptivité" capillaire (S_0). On peut également accéder à d'autres grandeurs physiques pouvant expliquer le comportement physique et hydrique du sol. Il s'agit, en particulier, de la grandeur λ_m , qui définit une dimension de pores hydrauliquement fonctionnels à la pression à laquelle l'infiltration est réalisée. On peut aussi évaluer, par calcul, le temps de submersion (t_p) qui correspond à la durée pendant laquelle le sol peut infiltrer entièrement une averse d'intensité constante. Le temps de submersion dépend de l'intensité de la pluie (R), de la conductivité hydraulique du sol (K_0) de sa "sorptivité" (S_0) au voisinage de la saturation, et de la teneur en eau du sol (θ) avant l'averse.

Quelques exemples de résultats

Des premiers résultats obtenus en Côte d'Ivoire (Vauclin et Chopart, 1992) ont permis de valider la méthode dans les conditions locales. Le temps de ruissellement obtenu par calcul sur le site donne des valeurs proches des celles obtenues par observations visuelles lors d'un épisode pluvieux survenu à la fin

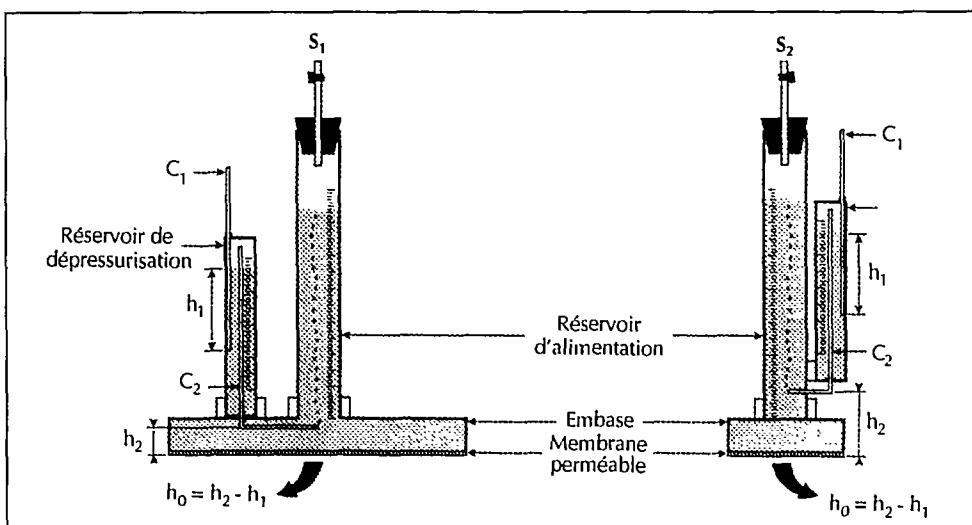


Figure 1.
Mesure de l'infiltrabilité du sol. Schéma des infiltromètres, S1 : diamètre du disque 250 mm, et S2 : diamètre du disque 80 mm.

de la campagne de mesures (Vauclin et Chopart, 1992). Les résultats sont également proches de ceux obtenus précédemment sur un terrain voisin de la même station avec la méthode des parcelles de ruissellement sous pluie simulée (Casta *et al.*, 1989). En revanche, les résultats obtenus sous une charge hydraulique légèrement négative (-20 mm d'eau) s'écartent nettement de ceux obtenus en conditions de charge positive de l'eau (+20 mm), suivant une méthode proche de celle de "Muntz". Les valeurs très élevées de conductivité hydraulique obtenues, supérieures à 100 mm/h, invalident la méthode Muntz pour pronostiquer le comportement du sol sous pluie.

Plus récemment, la méthode a été mise en œuvre en milieu réel, sur un dispositif d'étude et de mise au point de systèmes de culture (dispositif "création-diffusion") dans le nord de la Côte d'Ivoire. On a comparé les effets de différents modes de gestion du sol y compris avec plante de couverture (Chopart, 1995). Après 5 ans de culture continue, il existe de nettes différences d'infiltrabilité du sol entre les systèmes de culture. Cela se traduit, en pratique, par des valeurs de temps de submersion (t_p) plus élevées sur les parcelles avec labour profond qu'avec travail aux disques (figure 2).

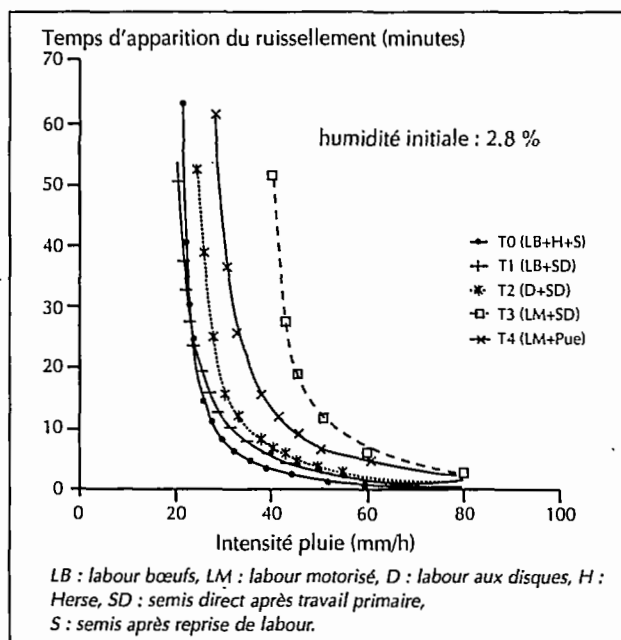


Figure 2. Mesure de l'infiltrabilité du sol en milieu réel dans le nord de la Côte d'Ivoire (Pes de Tchololevogo) sous différents modes de gestion du sol. Temps de submersion en fonction de l'intensité de l'averse (d'après Chopart, 1995).

Mesure du système racinaire

Position du problème

L'un des meilleurs indicateurs de l'état physique d'un sol est son aptitude à être facilement colonisé par

les racines de la culture. L'observation des racines est donc un élément important du diagnostic cultural. Parmi les nombreuses méthodes d'études des racines, il faut privilégier, ici, celles répondant le mieux à un couplage entre état physique du sol et profil racinaire.

Dans cette perspective, les techniques d'étude des racines basées sur les carottages, sans être à rejeter, sont plus lourdes et moins aptes à prendre en compte la variabilité spatiale de l'enracinement. La méthode d'étude des racines par minirhizotrons, séduisante, a le défaut de nécessiter un équipement, certes portable, mais sophistiqué et encore cher.

Description de la méthode

Actuellement, la méthode paraissant répondre la mieux au cahier des charges consiste à cartographier les racines apparaissant sur un profil de sol à l'aide d'une grille. Cette méthode n'est pas nouvelle mais, dans sa version originale, elle restait très descriptive (Bohm, 1979). Elle a bénéficié d'adaptations et de développements, en particulier par Tardieu et Manichon (1986), qui ont permis d'obtenir des informations quantitatives.

Des développements plus récents, associant un véritable comptage des racines (Chopart, 1989) et un logiciel, appelé *Racine* (Siband et Bocquet, 1990), pour traiter les données, permet d'accéder à des grandeurs pertinentes pour l'agronome. Il s'agit de la longueur des racines par unité de volume de sol, des distances moyennes entre racines et surtout du taux d'exploration racinaire du sol (pourcentage du volume de sol exploitable par la culture). Cette grandeur dépend des distances entre racines, de la distance maximale de trajet de l'élément nutritif considéré du sol vers la racine (figures 3 et 4).

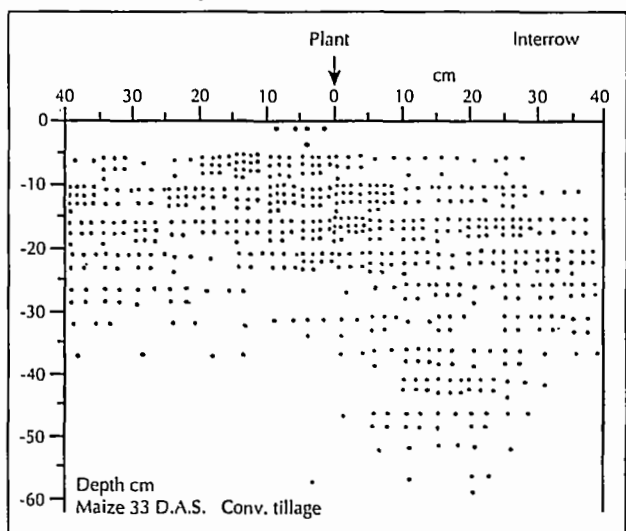


Figure 3. Etude du système racinaire. Cartographie des impacts racinaires sur un profil de sol cultivé en maïs à Bouaké (Côte d'Ivoire). Données de base recueillies sur le terrain (d'après Chopart et Siband, 1993).

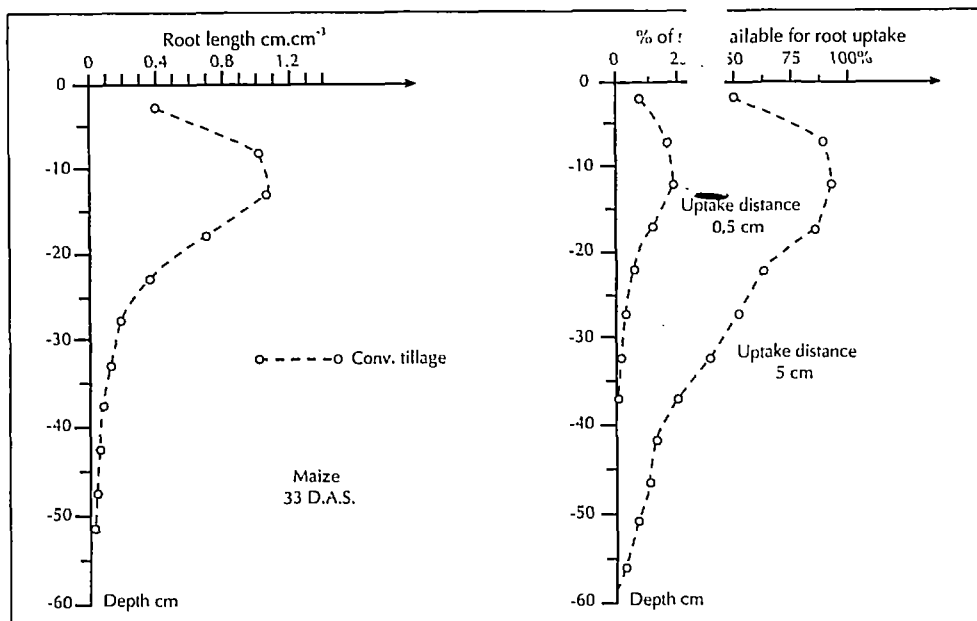


Figure 4.
Etude du système racinaire.
Résultats du traitement des données de base de la figure 3 avec le logiciel Racine : profils de distribution verticale de la longueur de racines par unité de volume de sol et du volume de sol utilisable pour l'extraction racinaire (en pourcentage du total de la zone racinaire).

Pour passer du nombre d'impacts de racines sur le profil aux distances entre racines, on doit tenir compte de la géométrie de répartition des racines dans le sol et de leur degré d'anisotropie (Chopart et Siband, 1993)

Quelques exemples de résultats

La technique de cartographie racinaire permet plusieurs niveaux d'interprétation, suivant les objectifs visés et les moyens disponibles. On peut se contenter, dans certains cas, du pourcentage d'unités de mesure (5x5 cm) comprenant au moins une racine pour un diagnostic rapide (Chopart, 1995), ou comparer des situations à partir des profils de distances moyennes entre racines (Chopart, 1995).

On peut enfin tenter de relier le profil racinaire à un fonctionnement du sol cultivé. Il faut alors aller jusqu'à une estimation fine du pourcentage de sol potentiellement utilisable pour la culture (figure 4). Cette valeur dépend des distances entre racines, de la distance maximale et de la loi de migration de l'élément étudié du sol vers la racine. On a ainsi relié un profil racinaire à un profil d'extraction racinaire de l'eau par le maïs (Chopart 1995 ; 1996), ce qui est une forme de validation de la méthode dans les conditions locales de travail.

Estimation des termes du bilan hydrique

Position du problème

Dans les zones tropicales sèches, l'évapotranspiration d'un peuplement végétal et le drainage de l'eau

au-delà de sa zone racinaire sont des éléments essentiels de la compréhension de sa production, et de la variabilité spatiale et interannuelle de cette production. Ils sont aussi un élément de diagnostic de l'intérêt d'un itinéraire technique ou d'un système de culture pour une gestion optimale de l'eau.

Le bilan hydrique a été longtemps évalué à l'aide d'humidimètres à neutrons. Cette méthode reste la référence, mais elle est lourde. Elle se prête donc mal à un diagnostic agronomique en milieu réel. De nouvelles techniques de mesure in situ de l'humidité du sol, susceptibles de remplacer l'humidimètre à neutrons sont apparues, en particulier le Tdr. Si elles offrent des avantages en matière de portabilité, elles ne paraissent pas encore en mesure de permettre un suivi du bilan hydrique pendant un cycle complet de la culture en milieu réel, sinon avec des gros moyens humains et financiers.

Description de la méthode utilisée

Dans l'immédiat, et en attendant que l'évolution de la technologie propose un outil adéquat, la moins mauvaise solution, pour les évaluations rapides du bilan hydrique en milieu réel, paraît être l'utilisation de modèles de simulation du bilan hydrique. Pour être opérationnels, ceux-ci doivent avoir été validés en milieu contrôlé dans des environnements comparables, grâce aux méthodes de références déjà citées. Ces modèles doivent avoir pour variables d'entrée des éléments relativement faciles à mesurer ou prélever sur le terrain, ou transposables du milieu contrôlé au milieu réel.

Le modèle de bilan hydrique utilisé, *Probe* (Chopart et Siband, 1988) est directement issu d'un modèle de base (Franquin et Forest, 1977), à réservoir, de type

fonctionnel. Les principales modifications sont l'incorporation d'un pas de temps journalier et d'un second réservoir. Le premier est fixe pour calculer le drainage, l'autre de profondeur variable en fonction de la croissance racinaire pour évaluer l'Etr.

Les paramètres d'entrée du modèle sont : la pluie, l'Etp, la réserve en eau utile du sol, le coefficient cultural, la loi de progression du front racinaire, un coefficient empirique d'évaporation sol nu. Le terme appelé pluie est, en fait, l'eau qui rentre réellement dans le sol. On peut mesurer ou simuler séparément la part d'une averse qui va ruisseler, et diminuer d'autant la hauteur de la pluie utile.

Le modèle *Probe* a été validé en Côte d'Ivoire (Chopart et Vauclin, 1990). Il offre l'avantage d'être simple, robuste et d'avoir fait la preuve de son utilité dans les conditions locales, mais ne prétend ni être très précis, ni être valide partout.

Quelques exemples de résultats

L'intérêt de prendre en compte les termes du bilan hydrique pour mieux comprendre les effets du milieu physique et des techniques culturales sur le peuplement végétal et la production a déjà été souligné (Chopart *et al.*, 1991) à partir de résultats obtenus en Côte d'Ivoire et au Sénégal. On y montre comment on peut expliquer :

- une variabilité des effets d'un même travail du sol, la même année, sur différents dispositifs implantés sur un même sol de Côte d'Ivoire ;

- une variabilité interannuelle des effets d'un même travail du sol, sur un même essai de longue durée au Sénégal, sur une période de 20 ans.

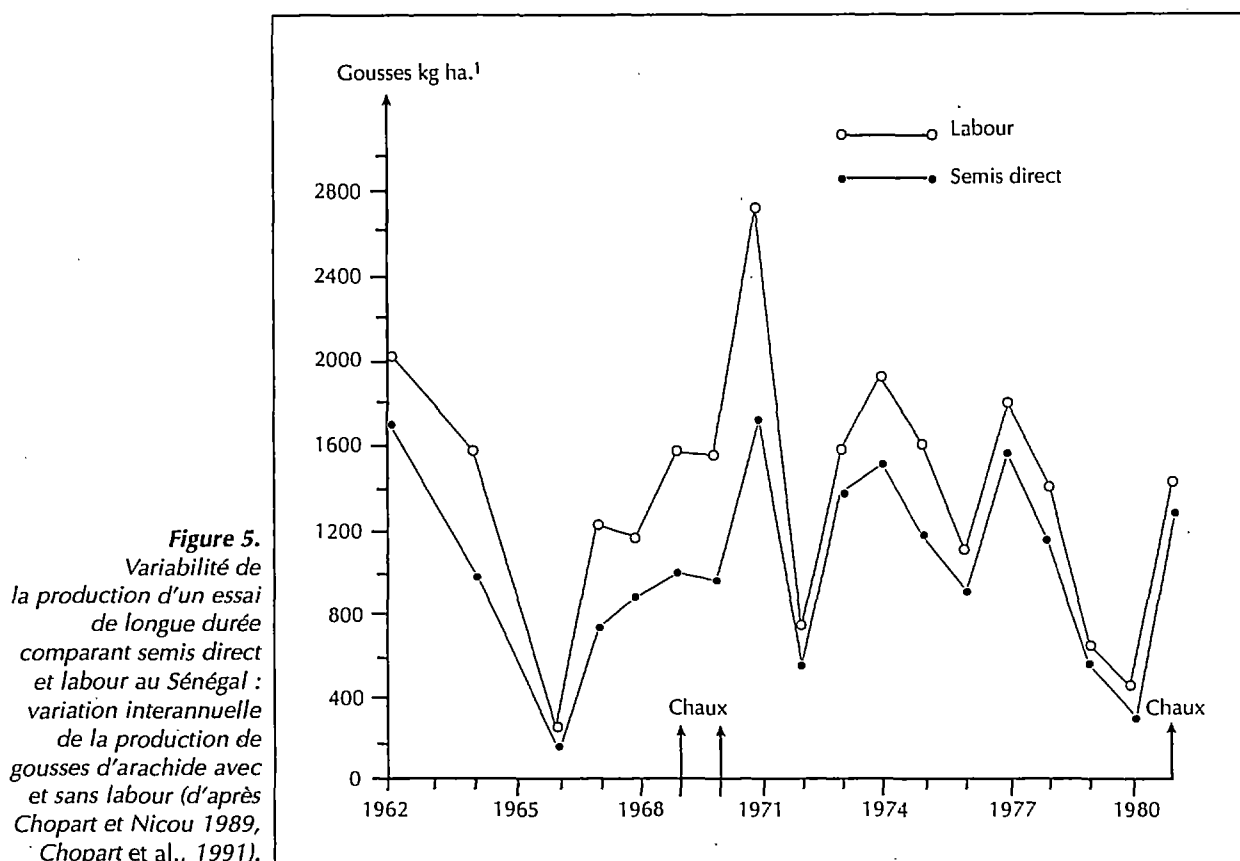
Dans ce dernier cas, on a pu mieux raisonner le concept de durabilité. La grande variabilité de la production (figure 5) constituait un bruit de fond empêchant de répondre aux questions suivantes : l'effet du travail du sol, faiblement positif en moyenne, a-t-il tendance à baisser, a-t-il un effet contre-aléatoire du déficit hydrique ?

La modélisation du rendement, par régression multiple, à partir de variables du bilan hydrique simulé (Etr/Etm, drainage) ainsi que du nombre d'années de culture après défriche ou chaulage, a permis de répondre à ces questions. Elle a également permis de montrer, en plus, l'importance du facteur acidification du milieu dans l'évolution de la production (figure 6).

Semis direct : $R = 1597 \text{ Etr/Etm} - 1,8D - 94T + 885$
 $r = 0,85 \text{ } n = 12$

Labour : $R = 2452 \text{ Etr/Etm} - 1,8D - 140T + 968$
 $r = 0,92 \text{ } n = 12$

R : rendement kg/ha ; D : drainage (mm) ; T : nombre d'années de culture après défriche ou apport de chaux.



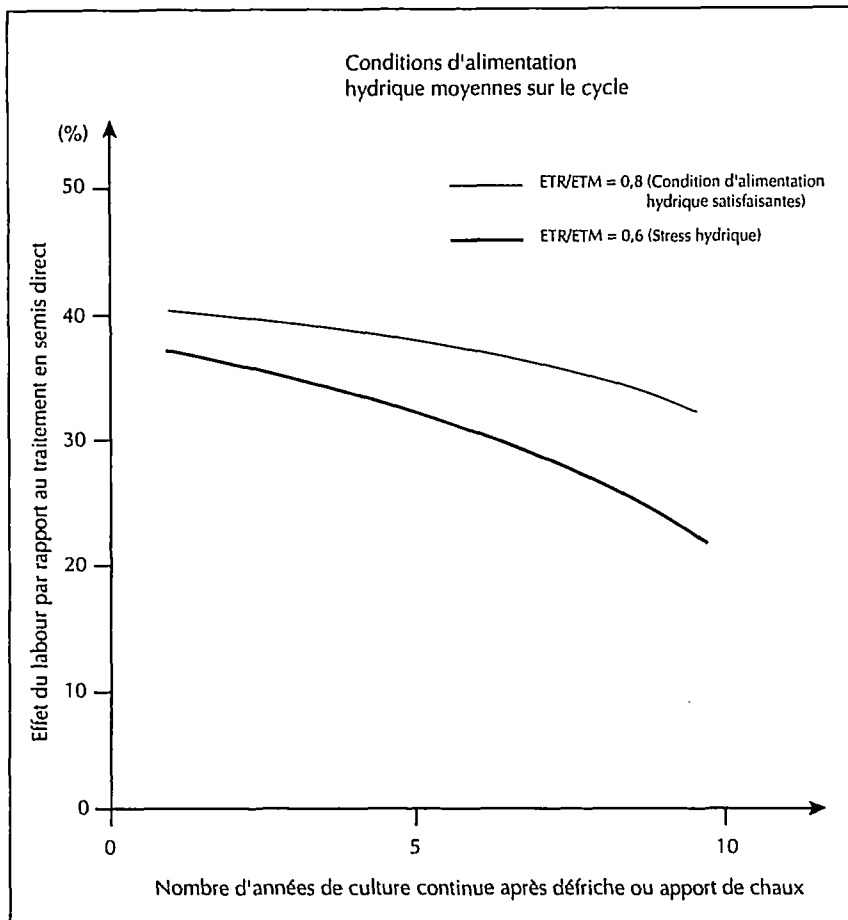


Figure 6. Résultat synthétique de l'analyse des données de l'essai de longue durée (figure 5) après simulation du bilan hydrique, modélisation de la production par régression multiple et simulation de l'effet du labour en fonction du nombre d'années de culture après défriche ou apport de chaux et du taux de satisfaction des besoins en eau. Le drainage est constant, 150 mm/an.

Conclusion

Les quelques outils présentés permettent une évaluation au champ et à des fins agronomiques :

- de la pluie qui entre réellement dans le sol (infiltrométrie) ;
- de l'enracinement, instrument d'interception par la plante de l'eau et des éléments nutritifs ;
- des termes du bilan hydrique (modélisation simple du bilan hydrique).

Ils participent à une meilleure compréhension des effets d'un itinéraire technique sur le fonctionnement hydrique du sol et de la culture. Ils servent actuellement d'outils de diagnostic. Il reste à étendre leur utilisation à un plus grand nombre de situations dans une optique de raisonnement des techniques culturales et d'aide à la décision. Les grandeurs mesurées pourraient aussi être intégrées dans des modèles de croissance et de fonctionnement du système climat-sol-peuplement végétal à vocation de pronostic.

Les outils portables que l'on a mis en œuvre et présentés paraissent bien adaptés à notre problématique d'intervention en milieu réel tropical, avec des moyens limités. Ils ne sont pas les seuls. Il y a bien sûr beau-

coup d'autres outils plus sophistiqués. Il existe également d'autres outils portables plus ou moins proches dans les trois domaines abordés : infiltration de l'eau dans le sol, systèmes racinaires, modèles de bilan hydrique. Une étude comparative des différentes méthodes aurait entraîné de trop longs développements. Il paraît déjà utile que le plus grand nombre possible d'agronomes et de décideurs sachent qu'il existe des outils portables permettant d'accéder sur le terrain à des variables explicatives pertinentes sans forcément avoir recours à des techniques sophistiquées et coûteuses.

Des progrès en matière de portabilité, de fiabilité et d'automatisation sont encore souhaitables. C'est le cas, en particulier, pour la mesure du bilan hydrique sous culture. La modélisation du bilan présentée ne peut tout faire ; il faut pouvoir effectuer des mesures *in situ*. La technique récente du Tdr paraît ici prometteuse et les évolutions sont rapides.

D'une manière générale, si les institutions du Nord sont à priori mieux placées pour initier de nouvelles technologies de diagnostic agronomique, le dialogue avec les partenaires du Sud et la contribution de ceux-ci doivent se faire très tôt pour tenir compte des contraintes mais aussi des opportunités pouvant être différentes de celles du Nord.

Références bibliographiques

- ASSELINE J., VALENTIN C., 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cahiers Orstom sér. Hydrol. 15 (4) : 321-349.
- BOHM W., 1979. Methods of studying root systems. Springer Verlag, Berlin 188 p.
- CASENAVE A., 1982. Le mini simulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes d'interprétation des mesures. Cahiers Orstom sér. Hydrol. 19 (4) : 207-227.
- CASTA P., CHOPART J.L., JANEAU J.L., VALENTIN C., 1989. Mesure du ruissellement sur un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire après 6 ans de culture continue avec ou sans labour. L'Agronomie tropicale 44 (4) : 255-262.
- CHOPART J.L., 1989. Méthodes d'étude de l'enracinement à mettre en œuvre dans le projet de recherche CEE : amélioration de l'alimentation hydrique par les techniques culturales. Note tech. Idessa, 16 p.
- CHOPART J.L., 1995. Etat physique du sol de parcelles paysannes du nord de la Côte d'Ivoire après 5 ans de culture continue sous différents modes de gestion du sol. Note tech. Idessa Cirad-Ca, 27 p.
- CHOPART J.L., 1995. Profondeur d'enracinement d'une culture de maïs : comparaison de différentes méthodes d'estimation *in situ*. Note technique Idessa et Cirad-Ca, 24 p.
- CHOPART J.L., 1996. Comparison of several methods of studying the maize deep root system under field conditions. In : Fifth Symposium International Society of Root Research Abstract, p. 138.
- CHOPART J.L., NICOU R., 1989. Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. L'Agronomie tropicale, 44 (4) : 269-281.
- CHOPART J.L., SIBAND P., 1988. PROBE. PROgrammes de Bilan de l'Eau. Mémoires et travaux de l'Irat, n° 17, 75 p.
- CHOPART J.L., 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. Symp. On the biol. of adventitious root formation" Dallas (USA). USDA techn. Rep., NC 154, 80 p.
- CHOPART J.L., VAUCLIN M., 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. Soil Science Society of America J. 54 (5) : 1377-1384.
- CHOPART J.L., VAUCLIN M., 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 pub, n° 199, p. 345-355.
- FRANQUIN P., FOREST F., 1977. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. L'Agron. tropicale, (32) : 7-11.
- ROOSE E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesure en petites parcelles expérimentales. Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 78 Paris, 108 p.
- SIBAND P., BOQUET D., 1990. Notice de DEI. Note tech. Cirad-Ca, 73 p.
- SMETTEM K.R.J., CLOTHIER B.E., 1989. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disk permeameters. J. Soil Sci. 40 : 563-568.
- TARDIEU M., MANICHON H., 1986. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. Agronomie 6 (4) 345-354 et 6 (5) 415- 425.
- VAUCLIN M. *et al.*, 1991. Field determination of soil hydraulic properties by suction and pressure infiltrimeters. In : EGS XVI General Assembly, Wiesbaden, Allemagne, 22-26 avril 1991.
- VAUCLIN M., CHOPART J.L., 1992. L'infiltrométrie multi-disques pour la détermination *in situ* des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire. L'Agronomie tropicale, 46 (4) : 259-271.

Approche morphologique de la structure du sol par des méthodes physiques

Jean-François BILLOT

Cemagref, Parc de Tourvoie, BP 44, 92 163 Antony cedex, France

Résumé : La structure du sol peut être approchée par des mesures physiques, directement si le paramètre concerné lui est lié, ou indirectement s'il définit un comportement induit. L'emploi des techniques classiques de visualisation des structures internes (rayons X, échographie) s'avère très lourd dès que l'on s'intéresse à un grand volume de sol en place. Aussi convient-il de bien définir le besoin avant de choisir la méthode de mesure. C'est le but poursuivi qui permet de fixer la précision de la mesure et sa fréquence spatiale : la maille. La précision coûte cher, de même que le nombre des mesures. Parmi les mesures physiques effectuées sur le sol, celle de la résistance à la pénétration est la plus rapide à mettre en œuvre. On peut utiliser pour visualiser les variations de dureté du sol dans le plan vertical. On obtient alors un véritable "profil" pénétrométrique qui peut être lu comme un rendu des variations structurales du sol. Il serait séduisant de disposer de méthodes, qui permettent de mesurer rapidement les variations de structure en continu lors d'un passage dans le champ, sans perturbations du sol. Deux types d'approches, électrique et radar vont dans ce sens, elles ont déjà des domaines d'application en dehors de l'agriculture.

Le « profil cultural », méthode d'analyse incontournable pour l'étude qualitative des relations plante-sol et machine-sol, est réalisé par un expert dans un but particulier, connu de lui. Il procède au fur et à mesure, dégageant la terre selon les besoins, fouillant grossièrement ou plus finement si cela s'avère nécessaire, utilisant éventuellement une loupe pour des observations fines. Il module son analyse et se donne, à volonté et « en temps réel », les moyens d'accès à la connaissance. Le dessin qu'il réalise d'après le profil obtenu constitue son interprétation des données. Ce n'est pas une simple image mais le résultat du traitement d'une image évolutive par un système expert. La (ou les) photographie(s) qui peu(ven)t accompagner ce dessin rendent compte de la manière dont les divers éléments structuraux ont été mis en valeur à la pointe du couteau. Des informations complémentaires peu-

vent être tirées des légendes et commentaires qui accompagnent dessins et photos. Cet ensemble constitue alors une approche de la structure du sol.

Le recours à des mesures physiques ne suit pas la même démarche. La mesure est en général effectuée par un opérateur qui n'est pas toujours expert en relations sol-plantes-machines, le protocole de mesure doit donc être précis et pertinent. L'expert intervient pour définir ce protocole et interpréter les résultats de la mesure.

Utilisation de mesures physiques globales

La structure du sol peut être approchée par des mesures physiques, soit directement si le paramètre concerné lui est directement lié (densité, porosité), soit indirectement s'il définit un comportement induit par la structure (propriété mécanique, conductivité hydraulique).

Divers paramètres physiques du sol font habituellement l'objet de mesures dans les champs :

- mesure directe de la taille des éléments structuraux : à partir du tamisage de couches successives de sol, on obtient une connaissance de son état d'émiettement par le tracé de courbes granulométriques ou le calcul d'indices d'émiettement; cette méthode, qui est surtout utilisée dans la couche superficielle travaillée — qui constituera le lit de semence — vise à caractériser l'état du sol après préparation par les outils, ou à comparer l'action relative de différents

outils sur un même sol ; si la surface du sol est seule concernée, on peut obtenir le même type d'informations à partir de l'analyse de photographies, d'enregistrements vidéo, ou encore d'après le relevé des altitudes relatives des éléments de surface au moyen d'un rugosimètre (à aiguilles, à capteur laser ou ultra-sonique) ;

- détermination d'indices caractérisant globalement le comportement mécanique du sol : résistance au cisaillement, à la pénétration (Cone Index, courbes pénétrométriques) ;
- données moyennes précisant l'importance relative des lacunes du sol (densité apparente, porosité, indice de vide), ou la communication entre ces lacunes (perméabilité à l'eau, à l'air).

L'approche des scientifiques vis-à-vis du sol agricole dépend de leurs préoccupations.

Pour le mécanicien (du sol), le sol est à la fois le matériau à travailler et le substrat où appuyer roues et chenilles lors des interventions dans le champ. La mesure lui permet d'évaluer les caractéristiques mécaniques du sol — cohésion, angle de frottement interne — utilisables dans des lois de comportement mécanique. A défaut, il peut utiliser des données plus synthétiques (densité, résistance au cisaillement, à la pénétration, couplées avec l'humidité). Le sol, considéré homogène et isotrope est caractérisé par une valeur moyenne de ces données. L'approche morphologique de la structure ne peut être qu'indirecte, c'est un sous-produit de la mesure, appuyé sur de très bonnes connaissances pédo-climatiques.

Pour l'hydraulicien, le sol est perçu en terme de lieux où s'opèrent les transferts d'eau. Une approche structurale complexe se traduira par une analyse du comportement selon des modèles à plusieurs couches de conductivité hydraulique différente.

Pour l'agronome, le sol est le siège du développement de la plante et des échanges liquides ou gazeux qui y sont liés. La structure est alors perçue à la fois en tant que donnée physique et caractéristique spatiale, lieu de croissance des racines.

Dans tous les cas, il convient de définir le besoin avant de choisir la méthode de mesure. C'est aussi le but poursuivi qui permet de fixer la précision de la mesure et sa fréquence spatiale : la maille. La qualité de la méthode physique dépend de l'adéquation entre le besoin, qui doit être bien analysé et les moyens de mesure utilisés. La précision des mesures coûte cher, de même que leur nombre.

Les démarches descriptives

Les techniques de visualisation couramment utilisées dans le domaine médical (rayons X, scanner, écho-

graphie etc.) peuvent être utilisées sur des prélèvements de sol de faible taille, mais sont très lourdes et coûteuses d'emploi dès que l'on s'intéresse au sol en place. On doit d'autre part opérer alors sur des tranches de sol suffisamment épaisses pour qu'elles tiennent (au moins 10 cm en sol rassi), l'image déduite de la mesure est alors une « moyenne ». Il en est de même lorsqu'on cherche à visualiser la structure du sol à partir de mesures de sa densité (densitomètre gamma).

La méthode pénétrométrique

Parmi les mesures physiques effectuées sur le sol, la résistance à la pénétration est la plus rapide à réaliser. De nombreux pénétromètres plus ou moins sophistiqués sont disponibles sur le marché. Les plus perfectionnés, équipés d'un capteur électronique, stockent les données (résistance à la pénétration en fonction de la profondeur) sur un pc portable. On peut utiliser ces données pour visualiser les variations de dureté du sol dans un plan vertical. On obtient alors un véritable « profil » pénétrométrique qui peut être lu comme le rendu des variations structurales du sol dans la tranche explorée.

Domaine et limites de la méthode

La mise en œuvre de la méthode se révèle difficile en sols caillouteux ou argileux humides.

RENDU DE LA MACRO-STRUCTURE DU SOL

Comme pour toute mesure physique relative au sol, de nombreux paramètres jouent un rôle dans la donnée mesurée (humidité, densité, matière organique libre...) et l'image obtenue ne peut être assimilée à un relevé de la densité du sol que dans des conditions particulières (humidité du sol homogène). D'autre part, la résistance à l'avancement de la pointe diffère, à densité égale du sol, selon qu'elle aborde ou quitte une motte, la localisation précise des limites de celle-ci peut en être affectée.

RENDU DE LA MICRO-STRUCTURE DU SOL

Les données micro-morphologiques (fissures, lissages, structure fine des mottes) et le comportement des racines semblent difficilement accessibles avec ce procédé.

Matériel de mesure

On mesure, à raison de quatre mesures par mm d'enfoncement, au moyen d'un capteur extenso-métrique, la résistance opposée par le sol à la pénétration d'une pointe conique (90°) enfoncée à vitesse régulière. Cette sonde est montée sur un chariot qui est déplacé latéralement selon un pas déterminé (figure 1). Le choix de la taille de la pointe dépend de la profondeur explorée.

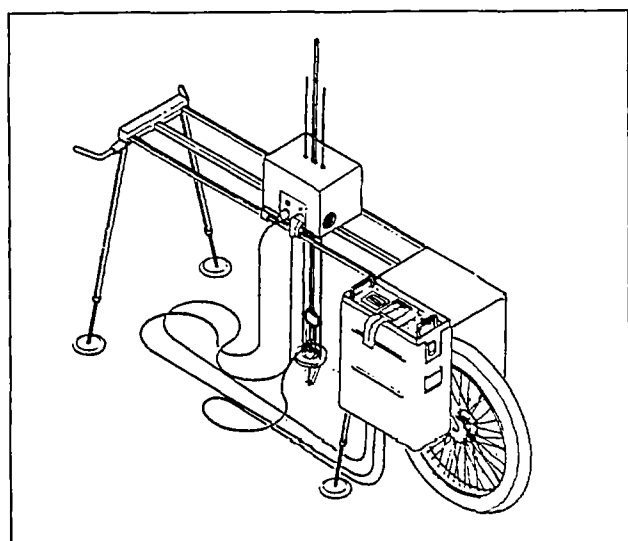


Figure 1. Pénétrömètre « scanner » du Cemagref.

Exemples d'utilisation

La mesure des variations de résistance à la pénétration dans un profil de sol permet de mettre en évidence la structure du sol dans diverses situations culturales :

- action des outils de travail du sol : profondeur, ameublissement, rappuyage ; la figure 2 visualise divers éléments de la macro-structure d'un sol cultivé : sous-sol non tassé, semelle de labour, horizon labouré, couche superficielle nivelée et ameublie, lignes de semis rappuyées ;
- mesures fines dans un lit de semence : effet de tassement et de lissage du sol par le soc du semoir sous la zone de placement de la graine, modelé de la surface du sol sur la ligne de semis (figure 3) ;
- action de tassement du sol : effet des pneumatiques, profondeur, type, semelles ; la figure 4 fournit une représentation des mesures réalisées après arrachage de betteraves en sol sec : les passages successifs des roues du tracteur équipé de l'arracheuse-aligieuse et des roues de la désherbeuse se traduisent par une seule trace de roue qui couvre les trois quarts gauche du profil ; on constate un tassement global de la couche arable qui se traduit par une diminution de 15 % de son épaisseur par référence au témoin, et une augmentation de la résistance à la pénétration qui dans les horizons superficiels passe de 1 à 3 Mpa ; en fonction de leur taille et de leur résistance, les mottes transmettent plus ou moins la charge vers le sous sol à travers la semelle de labour et le déstructuré complètement ; à droite, non perturbé car en dehors du passage des roues, le sous sol sec est resté très dur (>20 Mpa) ;
- évolution des horizons cultivés : reprise en masse, croûte de battance ; la figure 5 met en évidence une reprise en masse de l'horizon anciennement labouré (climat, passages) et l'émiettement localisé sur le rang pour l'implantation du maïs d'une parcelle menée en semis direct depuis plusieurs années.

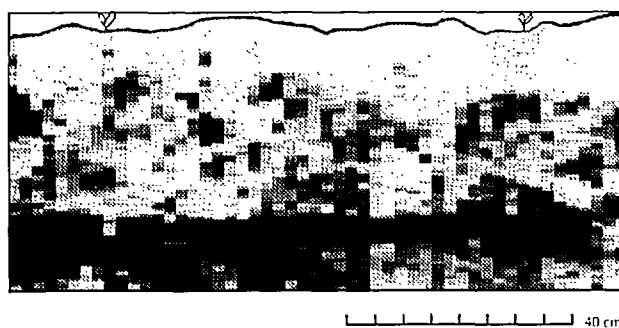


Figure 2. Profil pénétrométrique d'un sol travaillé et semé en maïs.



Figure 3. Profil pénétrométrique dans l'environnement d'une graine de betterave après semis.

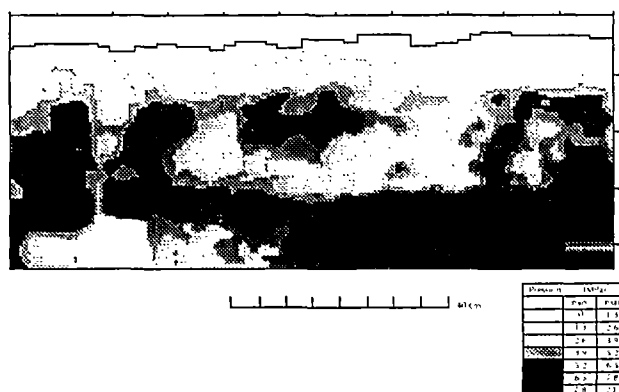


Figure 4. Profil pénétrométrique d'un sol après arrachage de betteraves.

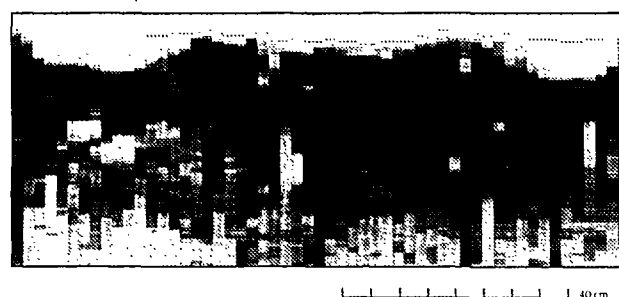


Figure 5. Profil pénétrométrique d'un sol non travaillé mené en « semis direct ».

Les méthodes descriptives dynamiques

Il serait séduisant de disposer de méthodes qui permettent de mesurer les variations de structure en continu lors d'un passage dans le champ, sans perturbations du sol. Deux types d'approches, électrique et radar vont dans ce sens, elles ont déjà des domaines d'application.

La prospection électrique

La prospection électrique consiste à mesurer la résistivité du sol entre deux électrodes traînées à la surface du sol (feuillards de cuivre insérés dans un tapis de caoutchouc), ou encore par l'intermédiaire du champ électromagnétique rayonné par un émetteur radio lointain (méthode radio-magnéto-tellurique) (figure 6 et figure 7). La résistivité mesurée est relative à un volume de sol qui dépend à la fois de l'intervalle horizontal entre les électrodes (50 cm) et de la résistivité moyenne du terrain (profondeur de propagation). On met ainsi en évidence les discontinuités transversales au parcours. Ces matériels sont conçus pour repérer des structures enfouies, des cavités ou des limites de zones. Les domaines d'application sont variés et concernent la géologie (affleurements rocheux) l'archéologie (murs et tranchées) ou le génie civil (analyse du sol préalable au tracé d'une route, vérification de l'homogénéité de la sous-couche

d'une chaussée, détermination de zones polluées). La maille de mesure de l'ordre de 50 cm ne permet pas de mettre en évidence les structures décimétriques ou centimétriques rencontrées en agriculture.

La prospection radar

La prospection radar consiste à localiser, sans contact avec le sol, les discontinuités de permittivité du sol aux ondes électromagnétiques (500 MHz à 1 GHz) par analyse de l'écho provoqué par leur réflexion sur les discontinuités structurales rencontrées. Les images obtenues après un traitement du signal retour, peuvent rendre compte de la présence et de la profondeur de localisation d'éléments structuraux décimétriques. Leur interprétation est complexe car une partie non négligeable de l'énergie véhiculée par l'onde électromagnétique incidente émise par le radar est absorbée par le sol selon dans l'ordre décroissant, son humidité, la rugosité de sa surface, sa densité, sa texture, sa température.

La démarche pratiquée consiste plus à reconnaître la signature de structures types (figure 8) que de visualiser la macro-structure du sol, telle qu'elle apparaît sur le dessin d'un profil cultural ou sur l'image du profil pénétrométrique. Des travaux sont en cours pour accéder à des informations sur la variabilité verticale du sol, ils s'appuient sur la modélisation des propriétés diélectriques de chaque couche. Ces radars géologiques, très coûteux, peuvent être montés sur des satellites et sont utilisés en télédétection.

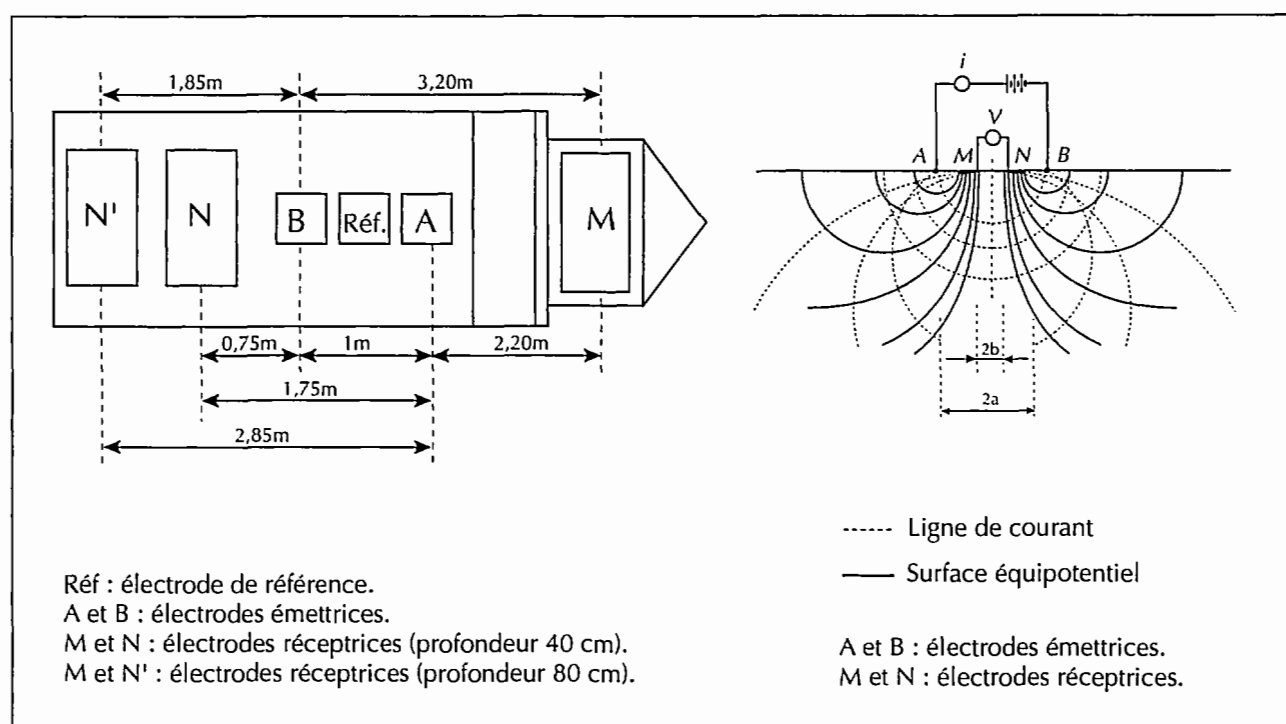


Figure 6. Répartition des électrodes et de propagation du courant électrique dans le sol.

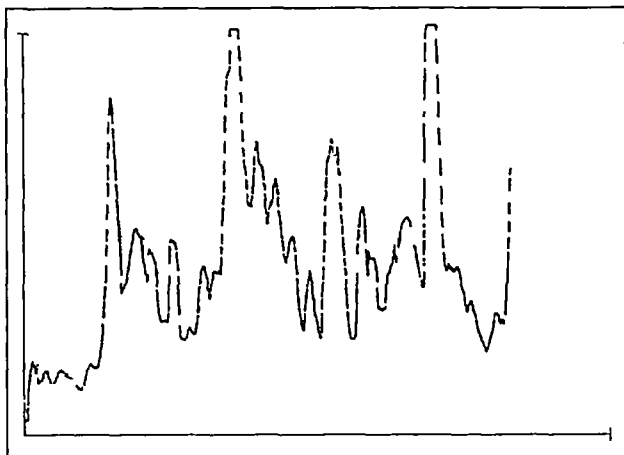


Figure 7. Sortie sur table traçante : variations de résistivité du sol en fonction de la position du tapis de mesure (matériel Elcore de Selva électronique).

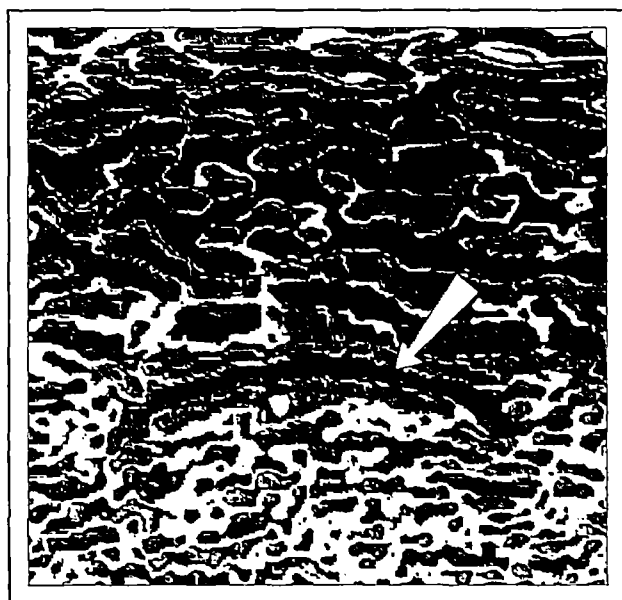


Figure 8. Section radar (SIR.10) avec l'image de la signature d'un drain (flèche) en forme de croissant.

Conclusion

Les mesures physiques globales permettent une approche du type de structure du sol à condition qu'elles soient complétées par une bonne connais-

sance des conditions pédo-climatiques. Dans beaucoup de cas, cette approche est suffisante pour des applications agricoles.

Les variations spatiales de la valeur de paramètres fortement liés à la densité permettent de visualiser la macro-structure d'un sol agricole. Les mesures sont réalisées à l'arrêt. Elles viennent compléter le profil cultural. De mise en œuvre rapide et non destructives, elles accroissent la capacité d'appréhension de la variabilité géographique et temporelle de la structure du sol d'une parcelle.

Les méthodes de prospection dynamiques ne semblent pas actuellement assez fines pour rendre compte de la structure d'un sol agricole. On les réservera à la mise en évidence d'accidents pédologiques ou géologiques ou encore de structures enfouies (anciens chemins, anciennes fondations, anciens fossés, conduites, drains).

Références bibliographiques

- AYERS P.D., 1982. Perumpral J.V., Moisture and density effect on Cone Index. Transaction of the ASAE : 1169-1172.
- BILLOT J.-F., 1982. Les applications agronomiques de la pénétrométrie à l'étude de la structure des sols travaillés. Sci. Sol., 3 : 187-202.
- BILLOT J.-F., MARIONNEAU A., 1989. Analyse de la structure du sol dans les champs au moyen d'un pénétromètre « scanner ». Cemagref, Btmea, 36 : 44-50.
- BUSH D., 1992. Application de la méthode Radiomagnéto-tellurique aux études du proche sous-sol. Exemple du drainage des terres agricoles de la Nièvre. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, 140 p.
- CUM M., GUARNIERI A., LIBERATI P., 1992. Aspetti metodologici e strumentali inerenti l'impiego del penetrometro a cono nello studio della resistenza meccanica del terreno. Ingegneria agraria.
- DALE THREADGILL E., 1982. Residual tillage effects as determined by Cone Index. Transaction of the ASAE : 859-863.
- HARTGE K.H., BOHNE H., SCHREY H.P., 1985. Extra H., Penetrometer measurements for screening soil physical variability. Soil & Tillage Research, 5 : 343-350.
- POTTECHER G., Le radar géologique appliqué à la gestion des réseaux urbains. Brgm.

Influence de trois systèmes de mise en valeur sur l'évolution du profil cultural d'un *latosolo roxo* de l'État du Paraná (Brésil)

M.F. GUIMARAES¹, J. TAVARES FILHO¹, R. RALISCH¹, C.C. MEDINA¹, M.M.L. MULLER², J.L. PICCININ², JR.O. BRANDAO²

¹Professeurs du département d'agronomie de l'Université de Londrina (Uel), Cp. 6001, Cep 86051-970, Londrina (Pr), Brésil

²Élèves du cours de Master du département d'agronomie de l'Uel, Cp. 6001, Cep 86051-970, Londrina (Pr), Brésil

Résumé : Les *latosolos roxos* (sols ferrallitiques) occupent environ 2 000 000 ha (soit 15 %) de la superficie de l'État du Paraná. La durabilité de l'agriculture sur ces sols exige l'adoption de techniques conservationnistes et, dans cette région, le zéro labour est largement employé. Ce travail, évalue l'influence de différents systèmes de cultures (semis direct avec rotation de culture, et semis direct avec vaine pâture, et pâturages) sur l'évolution du profil cultural d'un *latosolo roxo distrófico* (sol ferrallitique désaturé). Il en ressort que la mise en valeur provoque une certaine compactation du sol ainsi qu'une réduction de l'activité biologique, dans l'ordre suivant : forêt ; semis direct avec rotation de cultures ; semis direct avec vaine pâture ; pâturage. Les analyses chimiques montrent que la mise en valeur améliore la C_{ec} des sols par rapport à la forêt, et que le niveau de matière organique reste acceptable. La mise en valeur peut donc ne pas dégrader les sols ; le zéro labour avec rotation de cultures semble être une très bonne option pour l'agriculture locale.

Les *latosolos roxos* (sols ferrallitiques) occupent environ 2 900 000 ha (soit 15 %) de la superficie de l'État du Paraná (Farias, 1988). On les trouve principalement sur des plateaux légèrement ondulés (pente < 6 %) ; ils sont très argileux (70 % d'argile) et présentent dans l'horizon B une structure finement grumeleuse, dit « café en poudre ». Leurs caractéristiques physiques sont, selon Derpsch et al. (1991) très favorables.

La technique du semis direct est aujourd'hui de plus en plus utilisée par les agriculteurs. Elle concerne actuellement environ 30 % des surfaces cultivées dans la région. Elle apparaît comme une alternative intéressante soit pour la maîtrise des processus d'érosion, soit pour la gestion durable de l'environnement.

La durabilité de l'agriculture sur ces sols exige l'adoption de techniques conservationnistes. Selon les modalités de leur gestion, leurs caractéristiques physiques,

chimiques et biologiques peuvent évoluer positivement ou négativement vis-à-vis de la production agro-sylvo-pastorale.

Ainsi le travail du sol est probablement l'activité qui transforme le plus leur comportement physique et chimique, car elle influe directement sur la structure, qu'il y ait ou non travail du sol, étant donné que l'on recherche toujours des conditions optimales de structure pour la production (Vieira, 1985).

Comme les propriétés des sols sont interdépendantes, le changement de l'une d'entre elles provoque normalement des modifications de toutes les autres : si par exemple, la structure est affectée par le travail (ou le non-travail : techniques des semis directs) du sol, des changements sont observés en ce qui concerne la porosité, la densité globale, la rétention de l'eau et la stabilité des agrégats (Vieira, 1985).

Dans ce travail, on a essayé d'évaluer l'influence de différents systèmes de cultures sur l'évolution du profil cultural d'un *latosolo roxo distrófico* (sol ferrallitique désaturé).

Matériel et méthodes

Les travaux ont été conduits dans l'exploitation Rhenânia, située dans la commune de Rolândia (N.W. du Paraná). L'altitude est d'environ 630 mètres. Le sol

1. Coordonnées géographiques : 51°20' W, 23°20' S.

est du type ferrallitique désaturé (*latosolo roxo distrófico*). Le travail a été effectué entre les mois de mars et juillet 1997.

Le climat de la région est de type subtropical humide (d'après la classification de Koppen), avec des précipitations moyennes annuelles entre 1 800 et 2 400 mm, et un déficit hydrique entre juillet et août (Correa *et al.*, 1982).

En ce qui concerne les modes de gestion des sols, trois parcelles ont été étudiées, l'une de pâturage (I), l'autre de semis direct avec vaine pâture (II), et la troisième de semis direct en rotation culturale (III). Celle-ci suit le calendrier ci-dessous :

- en été : soja, maïs ;
- en hiver : blé, avoine, triticale (*Secale cereale*).

Le pâturage a été installé en 1987 avec *Brachiaria brizantha* ; le troupeau est constitué de buffles.

Une parcelle de forêt naturelle (IV) a été utilisée pour servir de référence pour toutes les études.

Pour les études concernant le type et l'organisation des structures du sol, on a ouvert deux tranchées (130 cm de largeur, 100 cm de profondeur) pour chaque traitement étudié. Les analyses ont été effectuées selon la méthodologie du profil cultural (Hénin *et al.*, 1960 ; Manichon, 1982) modifiée par Dersigny *et al.* (1990), et Ralisch *et al.* (1995) pour les conditions des sols tropicaux.

À partir de la caractérisation des différentes structures, des analyses physico-chimiques (pH/CaCl₂, C_{ec}/pH du sol, matière organique) ont été effectuées pour chacune d'entre elles selon la méthodologie de l'Embrapa (1979). Les résultats présentés sont la moyenne de trois répétitions pour chaque structure caractérisée aux champs.

Résultats et discussion

A l'échelle du profil cultural, différentes organisations peuvent être mises en évidence ; les profils sont décrits ci-après.

Profil sous forêt

Voir figure 1.

Volume de sol L (libre)

- surface : assez régulière ;
- épaisseur : +/- 10 cm ;
- humidité : humide ;
- matière organique : litière en voie de décomposition ;
- structure : agrégats et mottes de taille et forme assez variée ;
- activité biologique : élevée ;
- racines : grande quantité entre et intra-agrégats, avec développement préférentiellement vertical et bien ramifié ;
- porosité : visible à l'œil nu et inter-agrégats sont préférentiellement d'assemblage d'agregats et de cavités arrondies ;
- faces de rupture des mottes : rugueuse ;
- cohésion des mottes : faible.

Volume F (fissuré avec prédominance de mottes non compactées)

- épaisseur : 10 à 30 cm ;

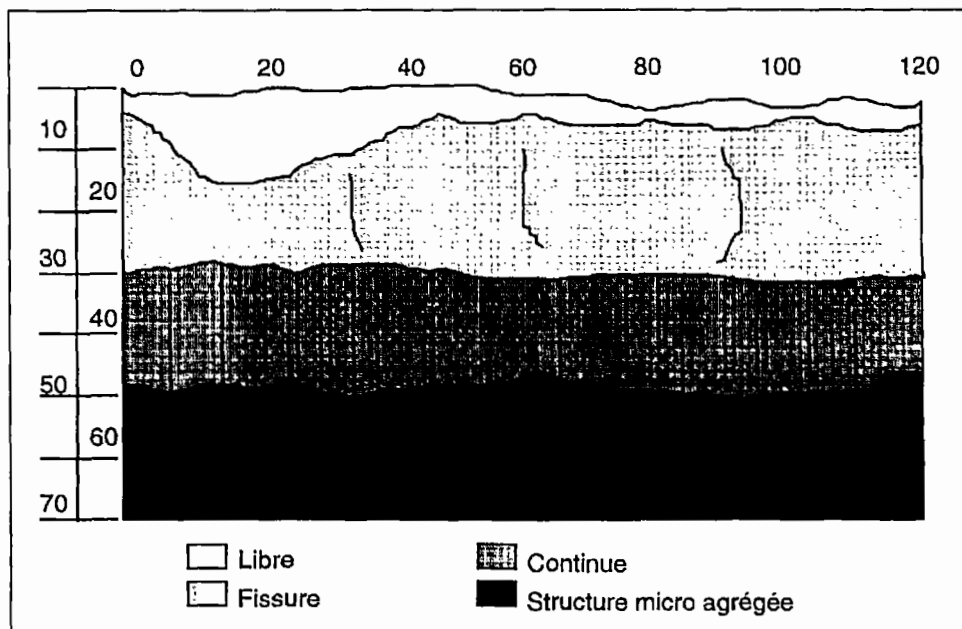


Figure 1. Caractérisation des structures de sol sous forêt par la méthode du profil cultural.

- humidité : humide ;
- matière organique : abondante ;
- structure : agrégats, mottes de taille entre 5 et 10 cm de forme plutôt polyédrique ; même chose intra-mottes ;
- activité biologique : élevée ;
- racines : grande quantité entre et intra-agrégats, avec développement vertical et horizontal, bien ramifiées ;
- porosité : visible à l'œil nu préférentiellement fissurée, mais des cavités arrondies ont été trouvées ; la porosité inter-agrégats est fissurée, d'assemblage d'agré-gats et tubulaire ;
- faciès de rupture des mottes : rugueuse ;
- cohésion des mottes : faible.

Sur le plan chimique, ce volume est caractérisé par un pH/CaCl₂ de 4,0, une C_{ec}/pH du sol de 3,6 cmol/dm³ et une teneur de matière organique de 29,0 g/dm³.

Volume C (continu, avec prédominance de mottes non compactées)

- épaisseur : 30 à 45 cm.

Il est semblable au volume F précédent, avec les différences suivantes : réduction de la quantité de matière organique et disparition des fissures ; la porosité est devenue d'assemblage d'agré-gats, même pour les mottes.

Au niveau chimique, ce volume est caractérisé par un pH/CaCl₂ de 4,1, une C_{ec}/pH du sol de 2,5 cmol/dm³ et une teneur de matière organique de 23,0 g/dm³.

À partir de 45 cm, le sol devient assez homogène, humide, avec la présence d'une structure micro agrégée (« café en poudre ») typique les sols ferrallitiques, avec une forte porosité d'assemblage d'agré-gats et une forte présence de racines.

Profil sous semis direct depuis vingt-quatre ans

Voir figure 2.

Volume de sol L (libre)

- surface : assez régulière ;

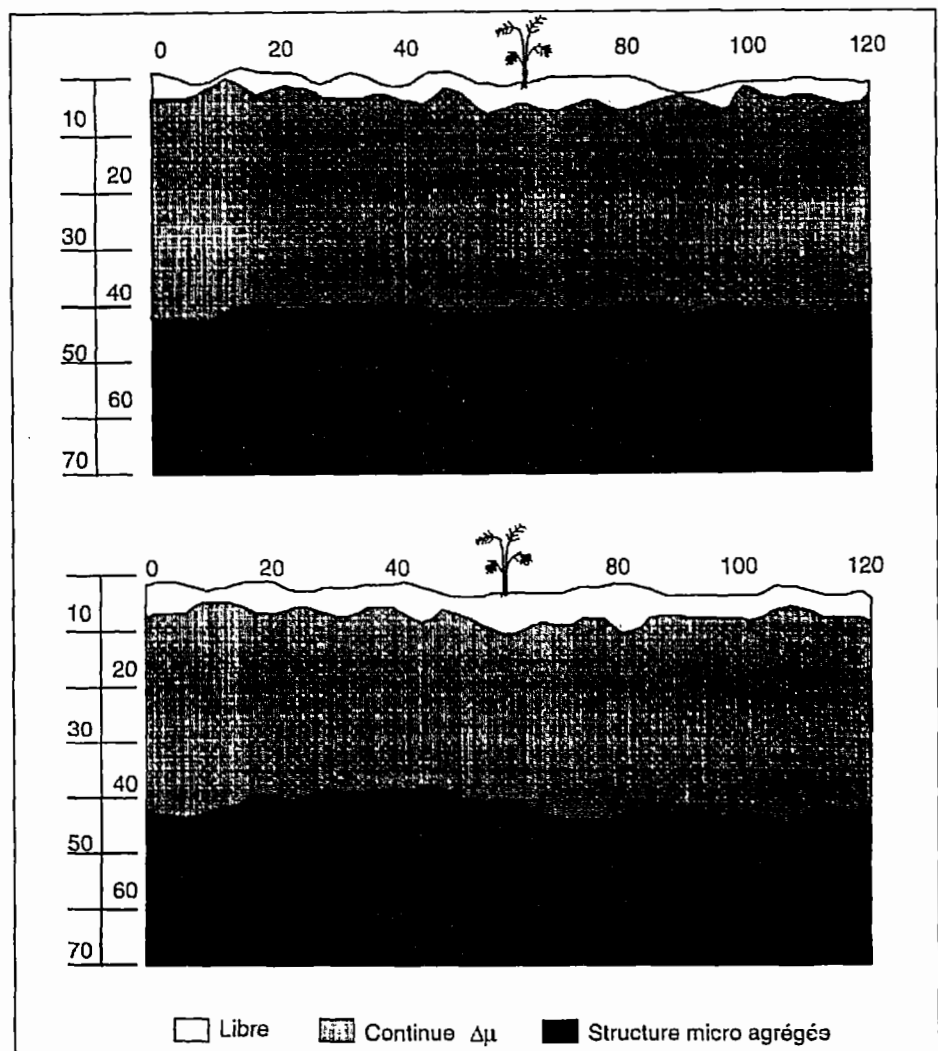


Figure 2.
Caractérisation
des structures de sol
sous semis direct
par la méthode
du profil cultural.

- épaisseur : +/- 3 cm ;
- humidité : plutôt sec ;
- matière organique : résidus de la dernière culture (maïs) ;
- structure : agrégats et mottes de taille qui varie entre 2 et 5 cm, forme polyédrique et, en moindre quantité, arrondie ;
- activité biologique : faible ;
- racines : grande quantité entre les agrégats, faible intra-agrégats, avec développement dans les deux cas préférentiellement vertical et ramifié ;
- porosité : visible à l'œil nu et inter-agrégats sont préférentiellement d'assemblage d'agrégats ;
- faces de rupture des mottes : rugueuse ;
- cohésion des mottes : faible.

Volume CΔμ (continu, avec prédominance de mottes plus ou moins compactées)

- épaisseur : 3 à 42 cm ;
- humidité : humide ;
- matière organique : abondante (racines en voie de décomposition) ;
- structure : agrégats, mottes de taille entre 3 et 5 cm des formes aussi bien polyédriques qu'arrondies ; intra-mottes, les formes sont plutôt arrondies ;
- activité biologique : semble assez faible ;
- racines : bonne quantité entre et intra-agrégats, avec développement plutôt vertical et ramifié ;
- porosité : visible à l'œil nu préférentiellement d'assemblage d'agrégats, mais des cavités arrondies ont été trouvées ; la porosité inter-agrégats est fissurée, d'assemblage d'agrégats et tubulaire ;
- faces de rupture des mottes : plutôt rugueuses, mais des faces plus ou moins lisses ont été détectées ;
- cohésion des mottes : moyenne.

Sur le plan chimique, ce volume est caractérisé par un pH-CaCl₂ de 5,9, une C_{ec}-pH du sol de 8,2 cmol/dm³ et une teneur de matières organiques de 21,2 g/dm³.

À partir de 42 cm, il semble que le sol est non-anthropisé et devient assez homogène, plutôt humide, avec la présence d'une structure micro agrégée (« café en poudre ») typique des sols ferrallitiques, avec une forte porosité d'assemblage d'agrégats et une forte présence de racines.

Au niveau chimique, ce volume est caractérisé par un pH/CaCl₂ de 5,0, une C_{ec}/pH du sol de 2,9 cmol/dm³ et une teneur de matière organique de 11,5 g/dm³.

Profil sous semis direct en rotation avec vaine pâture

Voir figure 3.

Volume de sol L (libre)

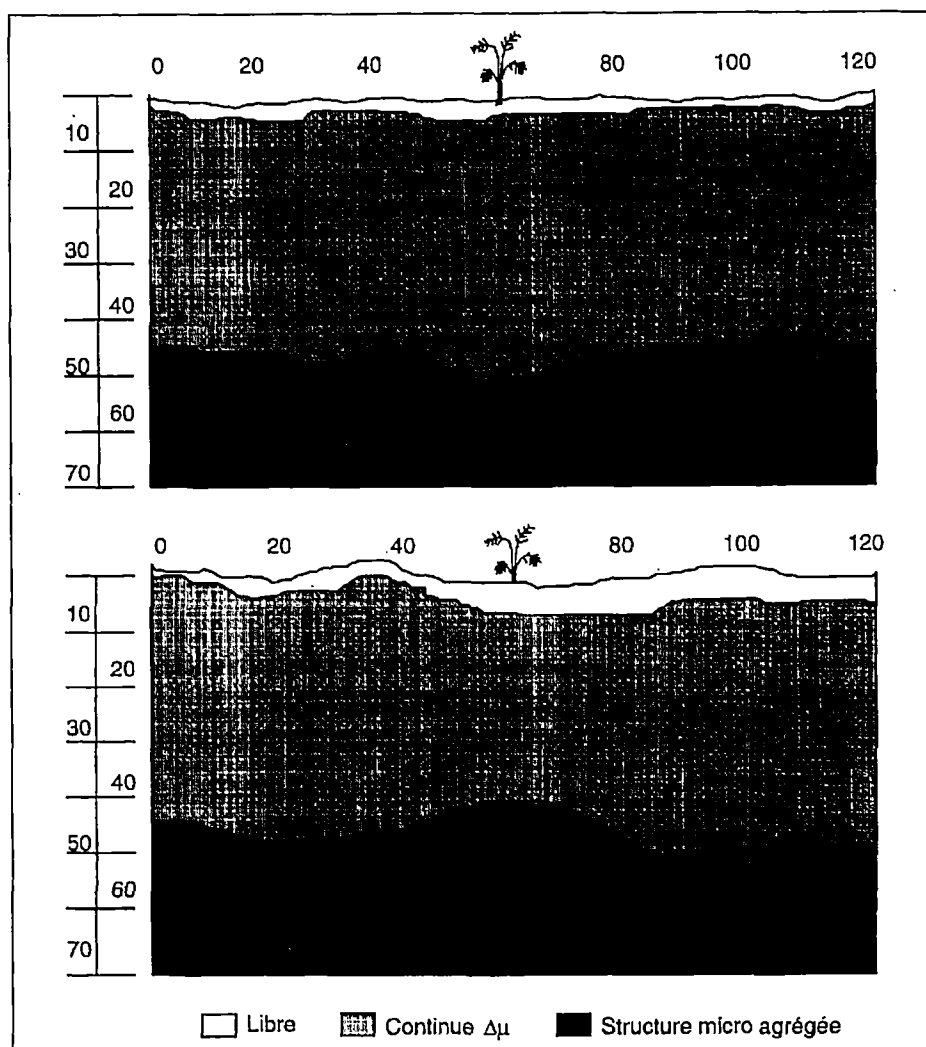
- surface : assez régulière ;
- épaisseur : 0 à 5 cm ;
- humidité : plutôt humide ;
- matière organique : résidus de la dernière culture (soja) ;
- structure : sol pulvérisé, agrégats bien individualisés de taille < 3 cm, forme plutôt arrondie ;
- activité biologique : très faible ;
- racines : grande quantité entre les agrégats, faible intra-agrégats, avec développement dans les deux cas préférentiellement vertical et ramifié ;
- porosité : visible à l'œil nu et inter-agrégats sont préférentiellement d'assemblage d'agrégats ;
- faces de rupture des mottes : plutôt rugueuses, mais des faces plus ou moins lisses ont été observées ;
- cohésion des mottes : faible.

Volume CΔμ (continu, avec prédominance de mottes plus ou moins compactées)

- épaisseur : 5 à 45 cm ;
- humidité : plutôt humide ;
- matière organique : faible quantité (racines en voie de décomposition) ;
- structure : agrégats, mottes de taille entre 3 et 5 cm des formes polyédriques ; intra-mottes, les formes sont plutôt polyédriques, mais des agrégats bien arrondis ont été détectés ;
- activité biologique : aucune ;
- racines : grande quantité entre mottes dans les 10 premiers cm, avec développement vertical et horizontal et bien ramifié ; intra-agrégats, la quantité de racines est plus élevée au-delà de 10 cm, avec développement plutôt vertical et ramifié ;
- porosité : visible à l'œil nu essentiellement d'assemblage d'agrégats, mais des cavités arrondies ont été trouvées ; la porosité inter-agrégats est d'assemblage d'agrégats et tubulaire ;
- faces de rupture des mottes : plutôt rugueuses, mais des faces plus ou moins lisses ont été détectées ;
- cohésion des mottes : moyenne.

Sur le plan chimique, ce volume est caractérisé par un pH/CaCl₂ de 5,7, une C_{ec}/pH du sol de 4,0 cmol/dm³ et une teneur de matière organique de 13,3 g/dm³.

Figure 3.
Caractérisation
des structures de sol
sous semis direct
avec vaine pâture par
la méthode du profil cultural.



A partir de 45 cm, il semble que le sol est non anthropisé et devient assez homogène, plutôt humide, avec la présence d'une structure micro agrégée (« café en poudre ») typique des sols ferrallitiques, avec une forte porosité d'assemblage d'agrégats et présence de racines.

Au niveau chimique, ce volume est caractérisé par un pH/CaCl₂ de 5,9, une Cec/pH du sol de 3,4 cmol/dm³ et une teneur de matière organique de 10,4 g/dm³.

Profil sous pâturage

Voir figure 4.

Volume de sol L (libre)

- surface : plus ou moins irrégulière ;
- épaisseur : 0 à 2 cm ;
- humidité : très sec ;
- matière organique : surtout des racines ;
- structure : sol pulvérisé, agrégats bien individualisés de taille très petite ;
- activité biologique : non présente ;

- racines : grande quantité ;
- porosité : visible à l'œil nu est préférentiellement d'assemblage d'agrégats.

Volume CΔμ (continu, avec prédominance de mottes compactées)

- épaisseur : 0 à 13 cm ;
- humidité : plutôt humide ;
- matière organique : racines en voie de décomposition ;
- structure : agrégats et mottes de taille entre 3 et 5 cm, avec des formes entre et intra-mottes polyédriques et laminaires ;
- activité biologique : non observée ;
- racines : grande quantité entre mottes avec développement surtout horizontal, très peu de ramifications ; intra-agrégats, la quantité de racines est presque nulle, avec développement irrégulier (racines tortueuses, et de forme aplatie, sans ramifications) ;
- porosité : visible à l'œil, elle est assez faible, essentiellement avec quelques cavités arrondies ; la

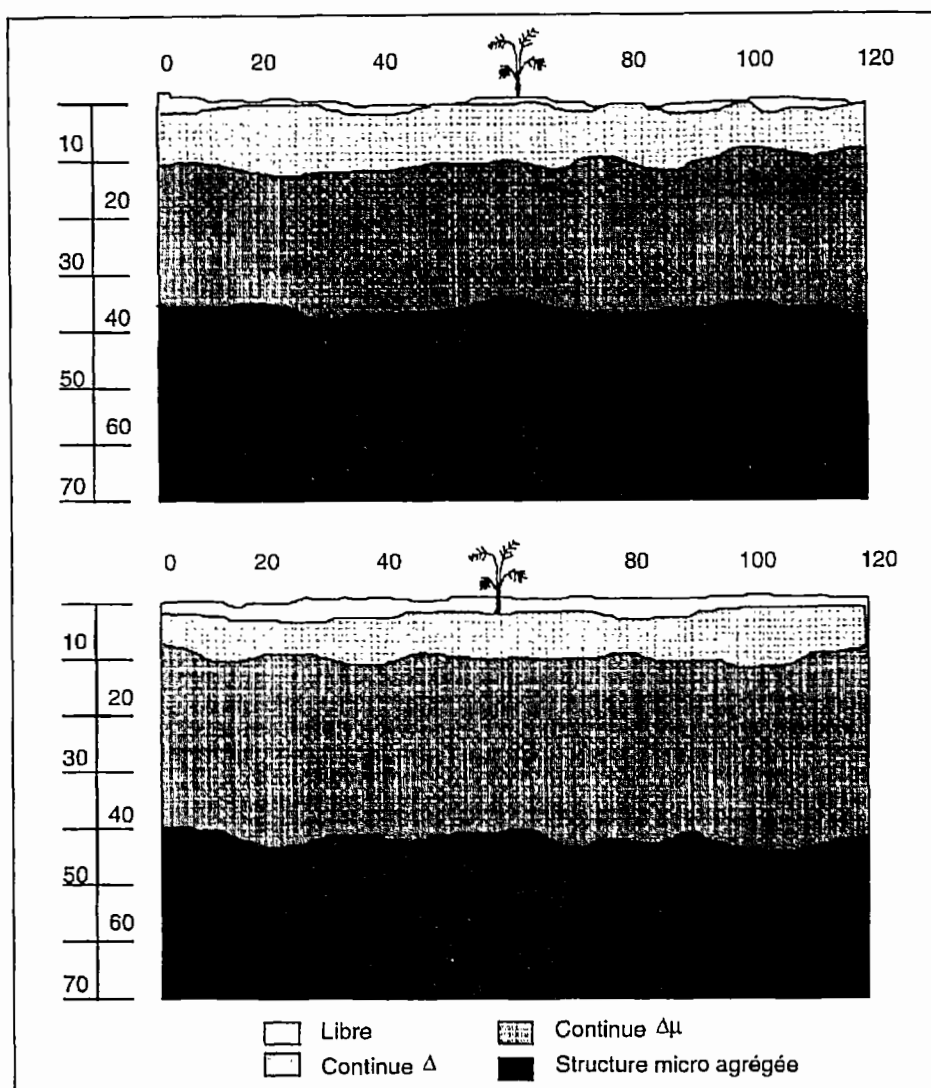


Figure 4.
Caractérisation
des structures de sol
sous pâturage par la méthode
du profil cultural.

porosité inter-agrégats est extrêmement faible avec quelques fissures et de petits pores tubulaires ;

- faces de rupture des mottes : lisses ;
- cohésion des mottes : forte.

Sur le plan chimique, ce volume est caractérisé par un pH/CaCl₂ de 6,1, une Cec/pH du sol de 8,7 cmol/dm³ et une teneur de matière organique de 37,5 g/dm³.

Volume CΔμ (continu, avec prédominance de mottes plus ou moins compactées)

- épaisseur : 13 à 41 cm ;
- humidité : plutôt humide ;
- matière organique : racines et charbon en voie de décomposition ;
- structure : agrégats et mottes de taille entre 3 et 5 cm, avec des formes entre et intra-mottes polyédriques ;
- activité biologique : intense (fourmis, termites) ;
- racines : grande quantité entre mottes avec développement plutôt vertical avec ramifications ;

intra-agrégats, bonne quantité de racines, ramifiées ;

- porosité : visible à l'œil, elle est essentiellement d'assemblage d'agréats, la porosité inter-agrégats est surtout d'assemblage d'agréats ;

- faces de rupture des mottes : rugueuses, mais des faces lisses ont été observées ;

- cohésion des mottes : moyenne.

Sur le plan chimique, ce volume est caractérisé par un pH/CaCl₂ de 5,7, une Cec/pH du sol de 6,9 cmol/dm³ et une teneur de matière organique de 24,4 g/dm³.

A partir de 45 cm, il semble que le sol est non-anthropisé et devient assez homogène, plutôt humide, avec la présence d'une structure micro agrégée (« café en poudre ») typique les sols ferrallitiques, avec une forte porosité d'assemblage d'agréats et présence de racines.

Au niveau chimique, ce volume est caractérisé par un pH/CaCl₂ de 5,4, une Cec/pH du sol de 3,4 cmol/dm³ et une teneur de matière organique de 13,5 g/dm³.

Discussion et conclusion

D'une façon générale, dès que l'on commence à exploiter les sols, des zones plus ou moins compactées apparaissent dans les trois systèmes de mise en valeur, dans l'ordre suivant de compactation croissante : forêt < semis direct < semis direct avec vaine pâture < pâturage. La majorité des structures des sols sous semis direct sont de type C Δ μ (continue plus ou moins compactée). Celles sous pâturage sont de type C (compactée).

Il est également observé que la mise en valeur a entraîné une réduction de l'activité biologique, dans l'ordre décroissant suivant : forêt > semis direct > semis direct avec vaine pâture > pâturage, donc dans le même ordre qu'en ce qui concerne la compacité.

Les analyses chimiques montrent que la mise en valeur améliore la C_{ec}, et que la matière organique reste à des niveaux acceptables.

On peut conclure des observations précédentes que l'exploitation des sols avec la technique du semis direct semble une très bonne option pour l'agriculture locale, surtout quand elle est effectuée avec une rotation culturale.

Références bibliographiques

CORREA A.P., GODOY H., BERNARDES L., 1982. Características climáticas de Londrina. Circular do IAPAR 5,

Fundação Instituto Agrônomo do Paraná, Londrina, 16 p.

DERSIGNY C., GUIMARAES M.F., VISINTIN L.M.R., 1990. Observação do estado estrutural e da repartição espacial do sistema radicular do milho cultivado num latossolo roxo. RESUMOS, Londrina.

DERPSCH R., ROTH C.H., SIDIRAS N., KÖPKE U., 1991. Controle da erosão no Paraná, Brasil : Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, 274 p.

EMBRAPA, 1979. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro- R.J.). Manual de métodos de análise de solo, Rio de Janeiro.

FARIAS G.S., 1988. de Manejo de Latossolos no estado do Paraná. In : Anais da 3a Reunião de classificação, correlação de solos e interpretação de aptidão agrícola. Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS/SBCS, Documentos, p. 141-143.

HENIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1996. Le profil cultural 1^{re} ed., Masson, Paris, 320 p.

MANICHON H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Docteur ingénieur INA-PG, 241 p.

PEDRO G., CHAUVEL A., MELFI A.J., 1976. Recherche sur la constitution et la genèse des Terras Roxa Estruturada du Brésil. Introduction à une étude de la pédogenèse ferrallitique. Ann. Agron. 27 (3) : 265-294.

RALISCH R., TAVARES FILHO J., GUIMARÃES M.F., MEDINA C.C., 1995. Structure et fertilité des sols tropicaux. Réunion de groupe thématique. Montpellier, Orstom, p. 57-62.

VIEIRA M.J. 1985. Comportamento físico do Solo em Plantio Direto. In : Atualização em plantio direto. Eds., Fancelli A. L, Torrado P.V., Machado J. Fundação Cargill, Campinas, p. 163-179.

Conséquences de l'état du profil cultural sur les peuplements végétaux : réussite de la levée en relation avec l'état du lit de semences

G. RICHARD, Carolyne DÜRR

Inra, Unité d'agronomie de Laon-Péronne, Rue Fernand Christ, 02007 Laon cedex, France

Résumé : Les semences et plantules sont particulièrement sensibles aux conditions physiques dans le lit de semences : elles explorent un faible volume de sol au sein duquel les conditions sont très fluctuantes et peuvent entraîner la mort de la plante. Les principaux facteurs physiques qui influent sur le déroulement de la levée sont l'eau, l'oxygène, la température et les obstacles mécaniques à la croissance de la plantule. Si les conditions climatiques, survenant après le semis, sont déterminantes vis-à-vis des conditions physiques dans le lit de semences, l'état structural a, lui aussi, un rôle important. Il influe sur les paramètres de transfert au sein du lit de semences qui déterminent la capacité de stockage d'eau, de chaleur et d'oxygène et la facilité avec laquelle ils circulent, et il conditionne le contact entre la semence et les fragments terreux. Par ailleurs, certains éléments structuraux liés à l'état initial du lit de semences ou à sa dégradation ultérieure peuvent jouer un rôle d'obstacle mécanique à la levée. Les trois principaux types de processus sur lesquels joue l'état structural seront illustrés par une présentation des travaux récents sur la germination en fonction des conditions d'imbibition et des conditions d'aération au sein du lit de semences, et sur la levée selon la présence de mottes dans le lit de semences ou d'une croûte de battance à sa surface. L'ensemble de ces connaissances est actuellement intégré dans un modèle de prévision des levées qui devra permettre une meilleure définition des critères de jugement de l'état du lit de semences.

Au moment de sa mise en terre, une semence est le plus souvent sèche. Son humidité est faible et par conséquent son activité métabolique très réduite ce qui permet sa conservation. Une fois mise en terre, la semence commence par se réhydrater, l'activité métabolique reprend, les échanges respiratoires augmentent. Au bout d'un certain temps, les premières divisions cellulaires ont lieu et se traduisent par la percée des téguments de la semence de la radicule. On dit alors que la germination a lieu. Cette première phase de la vie d'une plante dépend de la possibilité d'absorption d'eau et d'oxygène par la semence, et aussi de la température. Ensuite, débute la période de

croissance souterraine de la plantule qui aboutit à la levée. La levée marque le moment où la photosynthèse commence à prendre le relais des réserves séminales pour assurer la fourniture des substrats carbonés nécessaire à la croissance. La phase de levée, en plus des conditions thermiques, hydriques et d'aération du milieu, dépend des conditions mécaniques. La rencontre d'obstacles offrant une résistance mécanique supérieure à la poussée d'une plantule en croissance peut perturber la levée, voire l'empêcher. Ainsi, les semences et plantules sont particulièrement sensibles aux conditions physiques dans le lit de semences : elles explorent un faible volume de sol au sein duquel les conditions sont très fluctuantes et peuvent entraîner la mort de la plante. Si les conditions climatiques, survenant après le semis, sont déterminantes vis-à-vis des conditions physiques dans le lit de semences, l'état structural a lui aussi un rôle important (Richard et Boiffin, 1990).

Le bilan d'énergie à la surface du sol détermine le flux d'évaporation à la surface du sol, dont dépend le dessèchement du sol. Il détermine aussi le flux de chaleur à la surface du sol, dont dépend le réchauffement ou le refroidissement du sol. Les propriétés optiques et aérodynamiques de la surface qui interviennent dans le bilan d'énergie dépendent de l'état structural de la surface du sol.

L'ensemble des paramètres qui interviennent dans les transferts de masse et de chaleur dans le sol dépendent de l'état structural du sol, que ce soient les paramètres « capacitifs » qui représentent les capacités de stockage de l'eau, de la chaleur et de l'oxygène, ou les paramètres « conductifs » qui représentent la faci-

lité avec laquelle ils circulent dans le sol. Ainsi les profils de température, d'humidité et de concentration en oxygène dans le lit de semences évoluent en fonction des conditions climatiques et de l'état structural du lit de semences.

L'état structural conditionne le contact entre la semence et les fragments terreux, donc il intervient dans les vitesses d'absorption de l'eau et de l'oxygène.

Certains éléments structuraux liés à l'état initial du lit de semences ou à sa dégradation ultérieure peuvent jouer un rôle d'obstacle mécanique à la levée.

Enfin, pour un réglage donné du semoir, l'état structural du lit de semences peut influencer sur la profondeur de semis. Il joue donc sur le positionnement des semences par rapport aux profils de température, de teneurs en eau et en oxygène et par rapport à la présence éventuelle de mottes.

L'état structural du lit de semences a des effets multiples et contradictoires sur les conditions physiques dans le lit de semences. Aussi, malgré de nombreuses expérimentations conduites sur l'implantation de cultures, les règles de décision en matière de préparation de sols et de semis restent empiriques et imprécises. Différents travaux ont permis de mieux comprendre et de quantifier les principaux effets de l'état structural du lit de semences. On se propose d'illustrer (1) l'influence de l'état structural sur les facteurs physiques du lit de semences et la réaction de la plante à ces facteurs, et (2) les bases d'une modélisation de la phase allant de la germination à la levée, à partir de l'étude de la germination en fonction des conditions d'imbibition et de la levée en présence de mottes dans le lit de semences.

Etat du lit de semences et imbibition des semences

Sur la figure 1 sont illustrés différents effets de l'état structural du lit semences sur les variables qui vont déterminer l'imbibition d'une semence : profil hydrique, position de la semence, taille des fragments terreux. Ces résultats ont été obtenus dans des expérimentations où le déroulement de l'implantation de la betterave sucrière était comparé dans des lits de semences préparés à l'automne ou au printemps.

Le lit de semences préparé à l'automne a une structure massive dans les premiers centimètres du fait de la reprise en masse hivernale, tandis que celui préparé au printemps a une structure fragmentaire avec une forte proportion de petites mottes et de terre fine (figure 1a). Le lit de semences préparé à l'automne est plus humide le jour du semis (figure 1d) : sa structure

plus continue permet une meilleure réalimentation en eau de la surface du sol. Les fragments terreux entourant la semence sont plus grossiers dans le lit de semences préparé à l'automne (figure 1b), et dans ce même lit de semences, les semences sont placées plus superficiellement (figure 1c). Comment évaluer le poids de ces différentes conditions, les hiérarchiser et prévoir le déroulement de la germination dans ces deux situations en fonction des conditions climatiques ?

Pour que la germination se réalise, il faut tout d'abord que la semence se réhydrate. Il a été établi, pour différentes espèces, qu'une semence ne pouvait germer qu'à partir du moment où elle a atteint un certain seuil de teneur en eau. Cette humidité critique (exprimée par rapport au poids frais des semences) est de $0,25 \text{ g g}^{-1}$ pour le maïs, de $0,24 \text{ g g}^{-1}$ pour le blé, $0,31 \text{ g g}^{-1}$ pour la betterave par exemple. Une semence peut être caractérisée par une relation entre son humidité et le potentiel de l'eau qui lui correspond. Pour le maïs par exemple, à l'humidité de $0,25 \text{ g g}^{-1}$ correspond un potentiel hydrique de $-1,6 \text{ MPa}$. Une fois la semence mise en terre, son potentiel hydrique tend, à tout instant, à se mettre en équilibre avec le potentiel hydrique du sol qui l'entoure. Si l'eau du sol est à un potentiel inférieur à $-1,6 \text{ MPa}$, la semence de maïs ne peut extraire suffisamment d'eau du sol pour atteindre l'humidité critique de germination. Son humidité atteint un palier correspondant au potentiel de l'eau dans le sol. Au potentiel de l'eau liquide contenue dans les agrégats entourant la semence correspond une pression de vapeur d'eau de l'atmosphère gazeuse du sol (loi de Kelvin). Une semence peut aussi s'imbiber à partir de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, mais avec une vitesse plus faible qu'à partir de l'eau liquide. Il en résulte que, dans un lit de semences, une semence s'imbibe à partir de l'eau en phase liquide par les points de contacts avec les fragments terreux du sol et à partir de l'eau en phase gazeuse par le reste de sa surface (figure 2).

S_l : surface d'imbibition à partir de l'eau en phase liquide.

S_v : surface d'imbibition à partir de l'eau en phase vapeur.

$S_t = S_l + S_v$: surface totale de la semence.

La proportion de la surface de la semence en contact avec l'eau liquide du sol (S_l/S_t) dépend de la taille des éléments structuraux entourant la semence, du niveau de tassement du lit de semences et de du potentiel hydrique autour de la semence. Dans des situations où la taille des éléments structuraux est très inférieure à celle de la semence, le rapport S_l/S_t devrait être équivalent à la fraction du volume total occupé par ces éléments, c'est-à-dire au complément de la porosité ménagée entre les éléments structu-

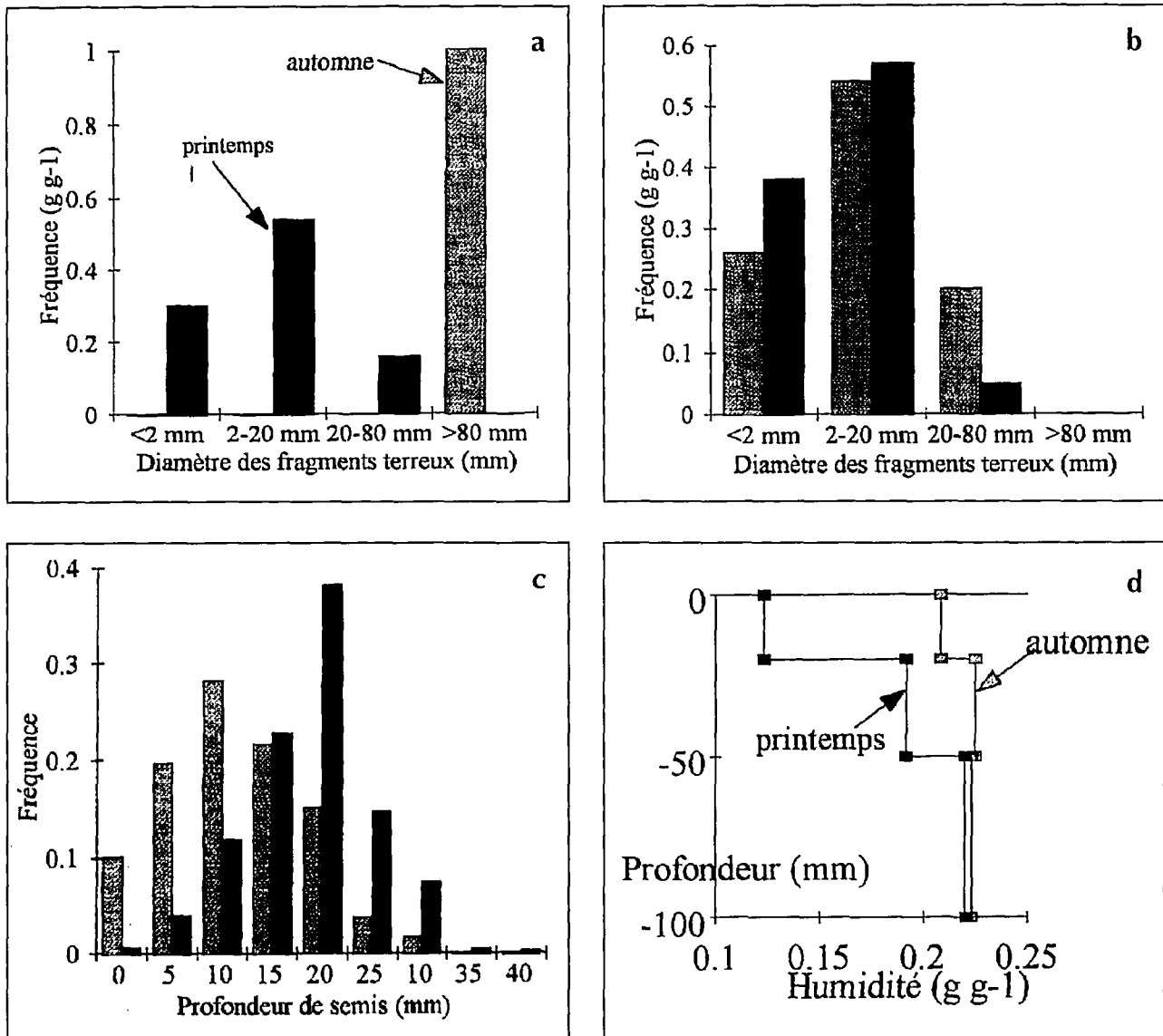


Figure 1. Distribution de la taille des fragments terreux avant le passage du semoir (a) et après le passage du semoir (b), distribution des profondeurs de semis (c), et profils hydriques le jour du semis (d) en fonction de la date de préparation du lit de semences (sol de limon moyen, avril 1992 ; Richard, non publié).

raux, si les éléments structuraux sont saturés en eau et en l'absence d'eau dans l'espace poral structural. Pour le maïs, Bruckler (1983) a vérifié expérimentalement cette hypothèse en obtenant la relation suivante :

$$S_i/S_t = 0,94 (1 - N_s) - 0,16 \text{ avec } N_s : \text{porosité structurale autour de la semence [relation 1]}$$

Pour des potentiels hydriques proche de 0, le volume poral structural contient aussi de l'eau du fait de la formation de ménisques entre les fragments terreux. Dans ces conditions, le rapport S_i/S_t est supérieur à celui estimé à partir de la relation 1. Pour des potentiels hydriques faibles (< -300 kPa), la disparition progressive des ménisques d'eau à l'interface entre les fragments terreux et la semence réduit le rapport S_i/S_t estimée à partir de la relation 1. De plus, la conductivité hydrique du sol ne permet pas toujours de compenser les pertes d'eau des fragments terreux

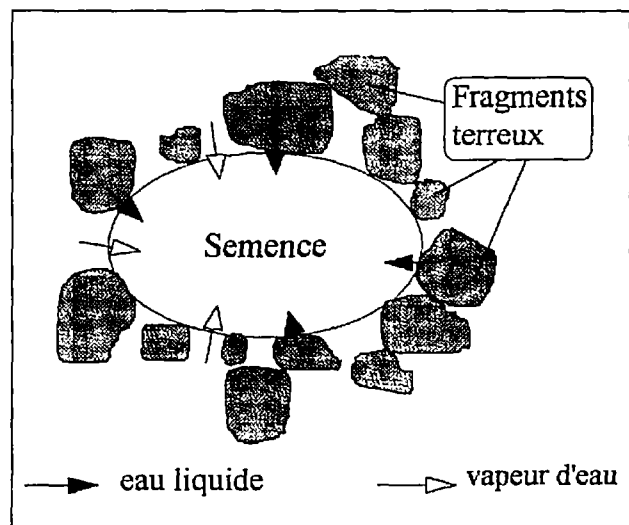


Figure 2. Représentation schématique du système sol-semence (d'après Bruckler, 1983)

entourant la semence liée à l'imbibition des semences par un flux d'eau provenant du sol. Bruckler (1983) propose un facteur de correction du rapport S_f/S_i selon le potentiel hydrique autour de la semence. Il prend en compte à la fois les surfaces réelles d'imbibition et les valeurs limitantes de la conductivité hydraulique et il est supposé indépendant de la porosité structurale du milieu.

L'ensemble de ces connaissances a été synthétisé dans un modèle d'imbibition des semences au sein d'un lit de semences réalisé par Bruckler (1983). Ce modèle est basé sur les lois physiques de transfert d'eau sous formes liquide et gazeuse et suppose que toute la résistance aux transferts d'eau est localisée à la périphérie de la semence, au niveau d'une couche poreuse fictive arbitraire. Le modèle, qui a été validé au laboratoire et au champ (Boiffin *et al.*, 1983), peut être utilisé pour étudier l'effet de différents états structuraux et hydriques du lit de semences sur la réalisation de la germination. Sur le tableau I sont illustrés les effets de la masse volumique et du potentiel hydrique autour de la semence sur la durée au bout de laquelle l'humidité critique d'une semence de maïs est atteinte. Il apparaît que c'est le potentiel hydrique autour de la semence qui détermine la possibilité de germination et en grande partie la cinétique d'imbibition. Même pour des différences extrêmes de tassement du lit de semences, l'état

structural n'induit des écarts de délais d'obtention de l'humidité critique que de 10 à 20 heures suivant le potentiel hydrique.

Ces résultats montrent le rôle prépondérant du potentiel hydrique autour de la semence par rapport à celui de l'état structural sur la possibilité de germination et sur le délai de germination. C'est le positionnement de la semence par rapport au profil hydrique au sein du lit de semences qui apparaît comme le point-clé de la réussite de l'imbibition et de la germination des semences. Il apparaît prépondérant d'établir les modalités de dessèchement des premiers centimètres du sol en fonction de leur état structural et de modéliser l'effet de la taille des fragments terreux entourant la semence sur la surface d'imbibition des semences.

Etat du lit de semences et émergence des plantules

Une fois la germination réalisée, les obstacles mécaniques à l'émergence de la plantule constituent l'un des principaux facteurs de perturbation de la cinétique de levée. Les éléments structuraux situés entre la semence et la surface, non soudés les uns aux autres (par opposition aux croûtes de battance),

Tableau I. Effet du potentiel hydrique et de la masse volumique autour de la semence sur la durée d'obtention de l'humidité critique de germination pour le maïs à une température de 20° C (d'après Bruckler, 1983).

Potentiel hydrique (MPa)	0	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-1,6	-1,2	<-1,6
Masse volumique (g cm ⁻³)	*	0,9	1,6	0,9	1,4	0,9	1,4	*
Porosité structurale (cm ³ cm ⁻³)		0,40	0,05	0,40	0,20	0,40	0,20	
S_f/S_i (cm ² cm ⁻²)		0,25	0,75	0,30	0,45	0,20	0,35	
Germination possible (oui/non)	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non
Durée d'obtention de l'humidité critique	15	37	19	50	40	100	80	

* Quelle que soit la masse volumique du lit de semences.

Tableau II. Proportions de fragments terreux de calibre 20-80 mm (g g⁻¹) obtenues dans des lits de semences de blé et de betterave sucrière pour deux dates de semis (essai de longue durée, Inra, Agronomie, Mons en Chaussée, Boizard *et al.*, 1994).

	Blé*		Betterave*	
	Semis précoce (10-20/10)	Semis tardif (15-20/11)	Semis conventionnel (25/3-18/4)	Semis précoce (5-15/3)
1991	0,12	0,33	0,10	0,18
1992	0,36	0,54	0,07	0,04
1993	0,40	0,56	0,09	0,03
1994	0,35	0,35	0,08	0,31
1995	26	27	07	21
Moyenne	0,30	0,41	0,08	0,15
Ecart-type	0,11	0,13	0,01	0,12

* Le précédent du blé est la betterave, celui de la betterave est le blé. La préparation du lit de semences est effectuée en un seul passage à l'aide d'une herse rotative pour le blé, d'un précilitor pour la betterave.

mais de dimension suffisante pour perturber le trajet de la plantule peuvent constituer un obstacle à la levée. La plantule doit soulever l'obstacle ou le contourner pour parvenir à la surface du sol. Sinon, il y a mortalité de la plante.

Sur le tableau II est illustrée la variabilité des proportions de fragments terreux d'un diamètre > 2 cm dans des lits de semences de blé ou de betterave. Les lits de semences de blé sont plus motteux en moyenne que les lits de semences de betterave. Les lits de semences des semis de blé tardifs sont plus motteux que ceux des semis précoces. Les lits de semences des semis de betterave précoces sont plus motteux que ceux des semis conventionnels. La variabilité entre années est importante. Les répercussions de ces états sur la levée des plantes sont difficilement prévisibles, et ce d'autant plus qu'ils interagissent avec la profondeur de semis. Il est donc nécessaire de connaître les réactions des différentes espèces à la présence de ces éléments structuraux de grande taille.

Le comportement de la plantule face à un élément structural dépend de la poussée qu'elle est capable d'exercer, c'est-à-dire de sa force d'émergence. Celle-ci est très variable selon les espèces, de quelques grammes pour la betterave, à près de 200 g pour le maïs ou de 500 g pour le coton. Au sein d'une espèce, elle est, aussi, très variable entre les semences et elle dépend de l'âge de la plantule (Souty et Rode, 1994). C'est le poids de l'obstacle relativement à la force d'émergence de la plantule qui va définir si l'obstacle peut être soulevé ou non. Si l'obstacle ne peut être soulevé, c'est la géométrie de l'obstacle qui va définir la durée de son contournement.

Sur la figure 3 est présenté le taux de plantules de betterave capables de soulever un obstacle en fonction de son poids et de sa forme. L'obstacle est de forme cylindrique de section variable, la plantule vient buter au centre de la section du cylindre. Il apparaît que le taux de plantules capables de soulever un obstacle diminue avec l'augmentation du poids et de la section de l'obstacle. Disposant de la variabilité des forces d'émergence au sein du lot de semences, Souty et Rode (1994) ont pu confronter les taux observés à ceux des plantules qui, pour un poids d'un obstacle donné, ont une force d'émergence supérieure à ce poids (courbe en trait plein sur le graphique).

Le taux de plantules soulevant les différents obstacles est généralement supérieur à celui calculé à partir de la courbe de fréquence des forces d'émergence. Cependant, lorsque le point d'application de la plantule n'est pas le centre de la section du cylindre, là où s'applique le poids de l'obstacle, la force que doit fournir la plantule s'écrit de la façon suivante selon l'équation d'égalité des moments des forces (Souty et Rode, 1994) :

$$\text{Force (plantule)} \geq \text{Poids (obstacle)} * R/(R+d) \text{ [relation 2]}$$

R : rayon du cylindre

d : distance du point d'application de la plantule au centre de la section du cylindre.

La force que doit exercer la plantule est plus faible que le poids de l'obstacle, et ce d'autant plus que la taille de l'obstacle est grande. La possibilité pour une plantule de soulever un obstacle dépend donc du poids de l'obstacle et de sa géométrie, de la force d'émergence de la plantule et de son point d'application sur l'obstacle. Cependant, ceci n'est applicable

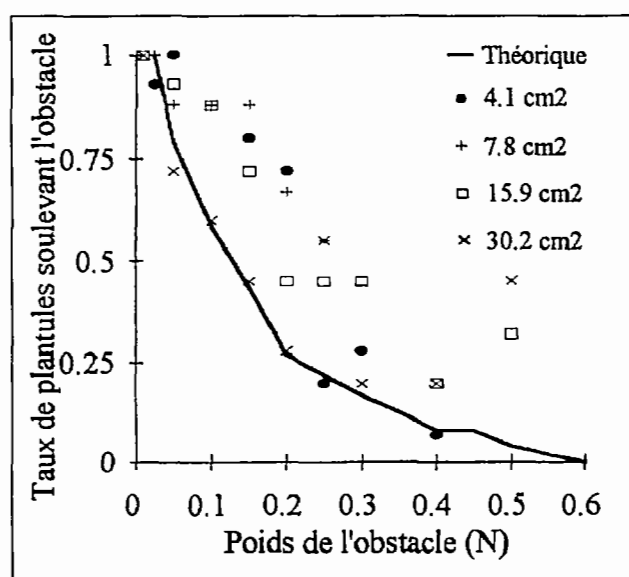


Figure 3. Pourcentage de soulèvement par des plantules de betterave sucrière d'obstacles de poids et de surface différents. Soulèvement d'au moins 0,3 mm en 24 heures (d'après Souty et Rode, 1994).

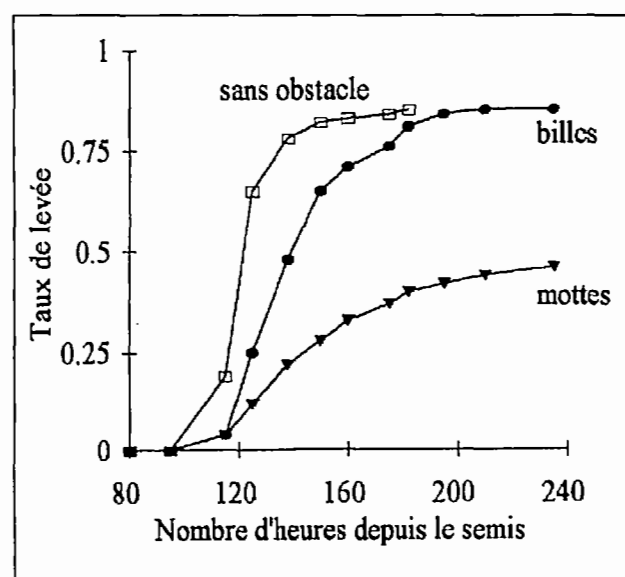


Figure 4. Cinétiques de levée de betterave sucrière en présence ou non d'obstacles inclus dans le lit de semences. Diamètre des obstacles : 3 cm (Dürr, non publié).

que pour les mottes situées à la surface du sol. Pour les mottes incluses dans le lit de semences que la plantule ne peut déplacer, la levée ne peut s'effectuer que par contournement.

Sur la figure 4 sont comparées des cinétiques de levée de betterave sucrière en présence ou non d'obstacles inclus dans le lit de semences. Ce sont des résultats de laboratoire obtenus soit avec des billes de verre sphériques, soit avec des mottes naturelles de même diamètre (3 cm). Les obstacles sont disposés au-dessus de la semence (la semence et le centre de l'obstacle sont sur une même verticale). Dans le cas des billes de verre, la cinétique de levée est décalée sans réduction du taux de levée : l'obstacle n'a entraîné qu'un allongement du trajet. Le trajet à parcourir est resté inférieur à la longueur maximale de l'hypocotyle, et par conséquent le taux de levée n'a pas été modifié par la présence d'un obstacle. L'obstacle étant sphérique, le supplément de trajet peut être calculé facilement ; il est de $(\pi/2 - 1) \cdot R$, soit environ 1 cm dans le cas présenté. Dans le cas des mottes naturelles, il y a aussi une réduction du taux de levée, malgré un diamètre des mottes similaire à celui des billes de verre. En fait, certaines plantules se sont retrouvées coincées dans des anfractuosités à la périphérie des mottes. L'effet de la taille des mottes rencontrées par les plantules sur leur mortalité apparaît plus important que celui sur l'allongement du trajet à parcourir. Des travaux sont en cours pour établir les variations de taux de mortalité des plantules en fonction de la géométrie de l'obstacle rencontré.

Conclusion

Les résultats présentés illustrent certains des effets multiples de l'état du lit de semences sur la levée. Ils sont applicables à d'autres espèces et conditions que celles présentées (Sene, 1995). D'autres effets seraient aussi à considérer : par exemple les problèmes d'aération du lit de semences ou de levée en présence de croûte de battance (Richard et Boiffin, 1990 et N. Souty dans cet ouvrage). Nous cherchons actuellement à intégrer l'ensemble des connaissances acquises sur le fonctionnement physique du lit de semences et sur le fonctionnement biologique des semences et plantules dans un modèle de prévision des levées (Dürr *et al.*, 1995). Une maquette du lit de

semences peut être simulée dans ce modèle, ce qui permet de prendre en compte la variabilité du positionnement de la semence et des éléments structuraux qu'elle est susceptible de rencontrer. La plupart des fonctions biologiques (vitesse de germination, vitesse d'élongation, force d'émergence) prennent en compte la variabilité biologique d'un lot de semences. Un tel outil devra permettre de multiplier les comparaisons d'états de lits de semences en faisant varier les conditions climatiques, les profondeurs de semis et les caractéristiques des semences. La statistique des résultats obtenus permettra d'analyser les interactions entre ces différents facteurs et devrait aider à juger de façon moins empirique les états d'un lit de semences.

Références bibliographiques

- BOIFFIN J., BRUCKLER L., AUBRY C., 1983. Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination. III. Valeur prévisionnelle d'un modèle d'imbibition au champ et caractérisation des lits de semences. *Agronomie*, 3 : 291-302.
- BOIZARD H., RICHARD G., GUERIF J., BOIFFIN J., 1994. Effects of harvest and tillage operations on soil structure. *Proceedings 13th International ISTRO Conference*, 24-29 July, 1994, Aalborg, p. 19-24.
- BRUCKLER L., 1983. Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination. I. Elaboration d'un modèle du système « terre-graine ». *Agronomie*, 3 : 213-222. II. Contrôle expérimental d'un modèle d'imbibition des semences et possibilités d'application. *Agronomie*, 3 : 223-232.
- DÜRR C., DUBRULLE P., BOIFFIN J., RICHARD G., DUVAL Y., 1995. Mise au point d'un modèle de simulation des levées de la betterave sucrière. *Proceedings of the 58th IIRB Congress*, Dijon, 19-22 Juin 1995, p. 425-431.
- RICHARD G., BOIFFIN J., 1990. Effet de l'état structural du lit de semences sur la germination et la levée des cultures. In *La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur*, J. Boiffin (éditeur), Les colloques de l'INRA, INRA, Versailles, France 53 : 111-134.
- SOUTY N., RODE C., 1994. Caractérisation des plantules de betterave sucrière et modélisation de l'émergence. In *L'implantation de la betterave industrielle*, J. Boiffin et A. Choppin de Janvry (éds), *Les colloques de l'INRA*, INRA, Versailles, France, 67 : 39-64.
- SENE M., 1995. Influence de l'état hydrique et du comportement mécanique du sol sur l'implantation et la fructification de l'arachide. Thèse de l'ENSA Montpellier, 127 p.

M odélisation de l'émergence des plantules sous des croûtes superficielles

Nicole SOUTY, Colette RODE

Inra, Unité de science du sol, Centre de recherches d'Avignon,
Domaine Saint-Paul, Site Agroparc, F84914 Avignon Cedex 9, France

Résumé : L'émergence des plantules en relation avec la résistance de la surface du sol est étudiée au laboratoire. Le taux d'émergence est déterminé pour différentes plantules en croissance (maïs, betterave et carotte) sous des croûtes de sol fabriquées dont les caractéristiques physiques et mécaniques sont connues. La probabilité d'émergence dite théorique est estimée à partir de la distribution des forces de croissance des plantules mesurées à l'aide d'un dispositif réalisé au laboratoire et en utilisant un modèle mécanique de rupture de plaque circulaire par flexion. Une relation est alors établie entre la force de croissance de la plantule et la résistance de la croûte que la plantule doit vaincre pour émerger. Une adéquation satisfaisante est observée entre les taux d'émergence calculés et expérimentaux pour les trois espèces considérées dont les plantules exercent des forces de croissance différentes.

La réussite de la levée, après celle de la germination, est une condition nécessaire à la mise en place satisfaisante du peuplement. Les causes d'un faible taux d'émergence sont diverses et nombreuses. Elles peuvent être dues à la nature du sol et aux modifications de son état de surface qui mettent les plantules dans des conditions non favorables à leur développement et à leur aptitude à l'émergence. Les conditions climatiques (chaleur, vent, pluie) entraînant soit une sécheresse, soit un excès d'eau dans le lit de semences sont évidemment les plus impitoyables pour la survie d'une plantule. Une séquence particulière des conditions climatiques : pluie, chaleur et/ou vent, peut conduire dans le cas des sols essentiellement argilo-limoneux, à la formation de croûtes superficielles. Pour émerger la plantule doit alors être capable de traverser ces croûtes qui lui opposent une résistance. Une autre cause de faible taux d'émergence est liée aux semences ; leur calibre et leur masse ont une influence sur la valeur de la force de croissance de la plantule qui en est issue.

De nombreuses études ont été réalisées par différents chercheurs sur la détermination du taux d'émergence des plantules au champ et au laboratoire (simulation de pluie) en fonction des caractéristiques de la couche superficielle de sol (densité, teneur en eau, résistance à la rupture mesurée avec un pénétromètre soit *in situ* soit sur des briquettes de sol). Plus tard la prise en compte de la biologie des plantules en mesurant la force de croissance de leur partie aérienne et certaines hypothèses sur l'environnement de la plantule dans le sol et sur le processus mécanique de rupture des croûtes (la semence est considérée comme centrée sur une plaque circulaire de croûte de sol à laquelle la théorie de Timoshenko et Woinwsky-Krieger (1961) peut être appliquée) ont permis (i) de classer les plantules en fonction de la valeur moyenne de leur force, (ii) de calculer la force théorique nécessaire à la rupture d'un milieu et (iii) de comparer cette force à la valeur moyenne de la force pour juger de la possibilité d'émergence (Goyal *et al.*, 1982). Cependant dans tous ces travaux subsiste une hétérogénéité verticale et horizontale de la surface encroûtée et les conditions expérimentales des suivis d'émergence et des mesures des grandeurs physiques et mécaniques du milieu sont différentes ; de plus, la valeur moyenne de la force de croissance n'est pas un bon paramètre pour caractériser une population de plantules pour laquelle existe une grande variabilité des valeurs des forces.

L'objectif de notre travail en laboratoire est d'élaborer un modèle prédictif d'émergence sous des croûtes fabriquées isotropes, homogènes et continues, en maintenant de façon identique et reproductible les conditions expérimentales relatives au suivi de l'émer-

gence et à la mesure des forces de croissance des plantules afin d'établir des relations rigoureuses entre caractéristiques des obstacles et caractéristiques des plantules.

Matériel et méthodes

Toutes les expérimentations ont été conduites à l'obscurité et à 20 °C (0,5 °C).

Approche théorique de l'émergence

La théorie de la rupture des plaques minces circulaires (Timoshenko et Woinowsky-Krieger, 1961) appliquée à la croûte de sol autour de la plantule permet d'exprimer la contrainte en traction produite à la surface supérieure de la croûte en fonction de la force de croissance de la plantule :

$$(1) \Gamma_{(max)} = (F/e^2) \cdot (1+\nu) \cdot (3/2\pi) \cdot ((1/4) \cdot (r/a)^2 - \log_e (r/a))$$

avec $2a$: portée de la croûte, e : épaisseur, r : rayon de la charge, ν : coefficient de Poisson et F : force nécessaire à la rupture.

Dans le cas d'un coléoptyle (maïs) où la charge est portée sur un disque de 1 mm de diamètre cette équation (1) est applicable. Dans le cas d'un hypocotyle (betterave, carotte) la charge est portée par une ellipse dont les valeurs des axes b et h peuvent être mesurées ; dans ces conditions l'équation (1) se transforme en :

$$(2) \Gamma_{(max)} = (F/e^2) \cdot (1+\nu) \cdot (3/2\pi) \cdot (1/4 \cdot (\sqrt{b} \cdot \sqrt{h}/2a)^2 - \log_e (\sqrt{b} \cdot \sqrt{h}/2a))$$

Si une plantule rompt une croûte dont la résistance à la rupture F est mesurée à l'aide d'un pénétromètre, la valeur de la contrainte créée dans les deux cas est la même. L'égalité des expressions de Γ_{max} conduit alors à une relation entre force de la plantule et résistance obtenue avec le pénétromètre : $F_{(croûte)} = k \cdot F_{(plantule)}$ avec $k > 1$ dans le cas de ces expérimentations où les valeurs des grandeurs géométriques utilisées sont : $a = 22 \cdot 10^{-3}$ m, r (embout du pénétromètre) = $1,5 \cdot 10^{-3}$ m. Ainsi une croûte de résistance $F_{(cr)}$, sera rompue par toute plantule dont la force mesurée est au moins égale à $F_{(cr)} / k$.

Fabrication et caractérisation des croûtes

Elles ont la forme de disques de 60 mm de diamètre, de 2, 3 et 5 mm d'épaisseur et sont obtenues à partir d'une pâte de sol saturée ; la technique mise au point

permet d'obtenir des croûtes homogènes et reproductibles, d'épaisseur et de teneur en eau connues (Souty *et al.*, 1992). Leur résistance à la rupture est mesurée avec un pénétromètre réalisé à l'unité de Science du Sol avec l'aide de l'unité automatique et micro-informatique pour la partie acquisition et traitement des données. C'est un pénétromètre hydraulique à mouvement ascendant qui devrait permettre de mesurer in situ la résistance de la couche superficielle tout près d'une semence, dans le même sens qu'une plantule en croissance. La croûte est maintenue entre deux anneaux de laiton pour éviter un soulèvement et simuler une croûte adhérent avec la sous-couche dans un lit de semences. Les valeurs du module de rupture F/e^2 , paramètre mécanique caractéristique d'un matériau (e : épaisseur) sont calculées à partir des valeurs de la résistance à la rupture (F) : elles décroissent si la teneur en eau (W) augmente (et si la densité sèche diminue). La relation d'ajustement de F/e^2 avec la teneur en eau permet de calculer la résistance d'une croûte dont W et e sont connues (figure 1).

Semences

Trois espèces ont été choisies : maïs (Monarque Inra 282), betterave (Vega) et carotte (Nandor). Les semences sont calibrées en taille et en masse. La germination est réalisée selon les conditions préconisées par l'*International Seed Testing Association* — Ista — (1985) et la solution nutritive utilisée est celle mise au point par Saglio et Pradet (1980). La masse des semences et l'âge des plantules sont les paramètres retenus pour les différentes expérimentations.

Mesure de la force de croissance des plantules

Le dispositif utilisé a été antérieurement mis au point au laboratoire pour la mesure des forces de croissance des racines (Souty *et al.*, 1992). Il donne la déformation relative ($\Delta a/a$) d'une lamelle d'acier sous l'action d'une charge et un étalonnage préalable avec des poids connus permet de calculer le coefficient de linéarité liant la déformation relative à la force exercée (figure 2).

Suivi expérimental de l'émergence

La croûte dont e , W et F sont connus respectivement par fabrication et par calcul est placée sur un récipient rempli de sable humide contenant la plantule ; une feuille d'aluminium, posée entre le sable et la croûte et percée en son centre, évite une modification de la teneur en eau de la croûte. Croûte et feuille sont main-

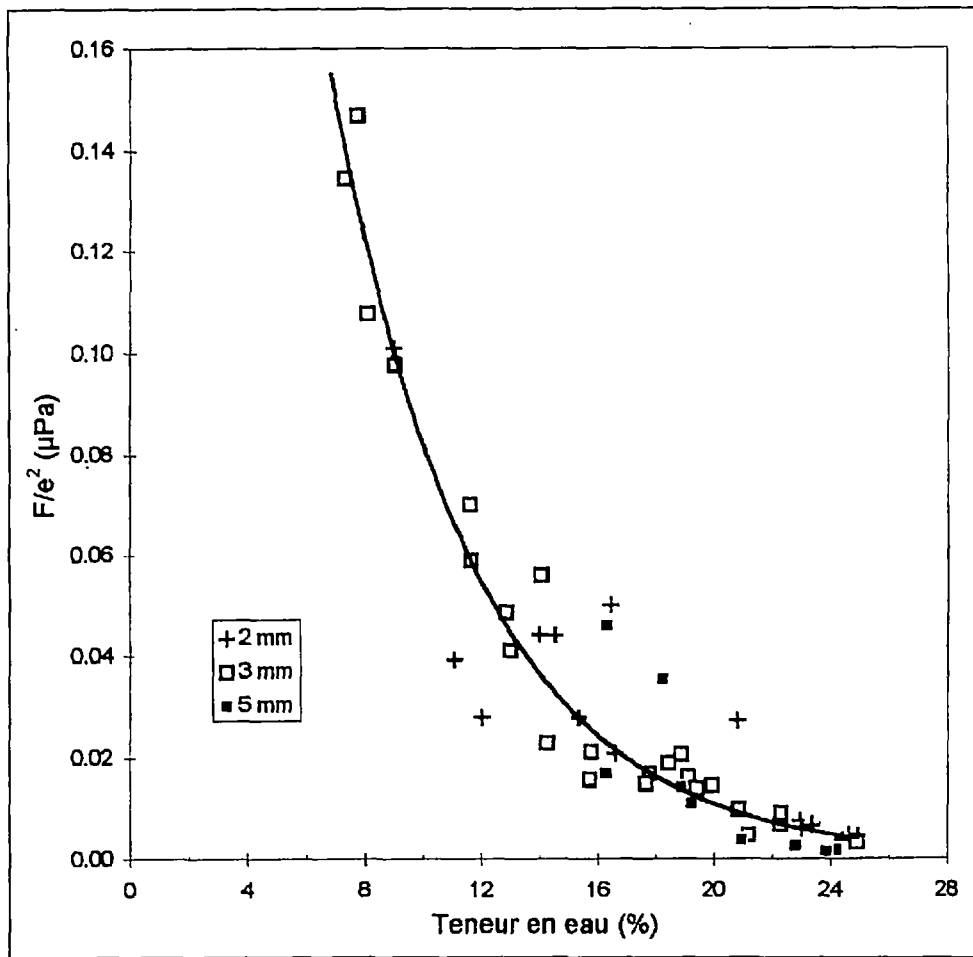


Figure 1. Variation du module de rupture en fonction de la teneur en eau, pour des croûtes de différentes épaisseurs élaborées avec un sol de la Manche : argile = 9,1 % ; limons = 53,4 % ; sables = 33,3 %.

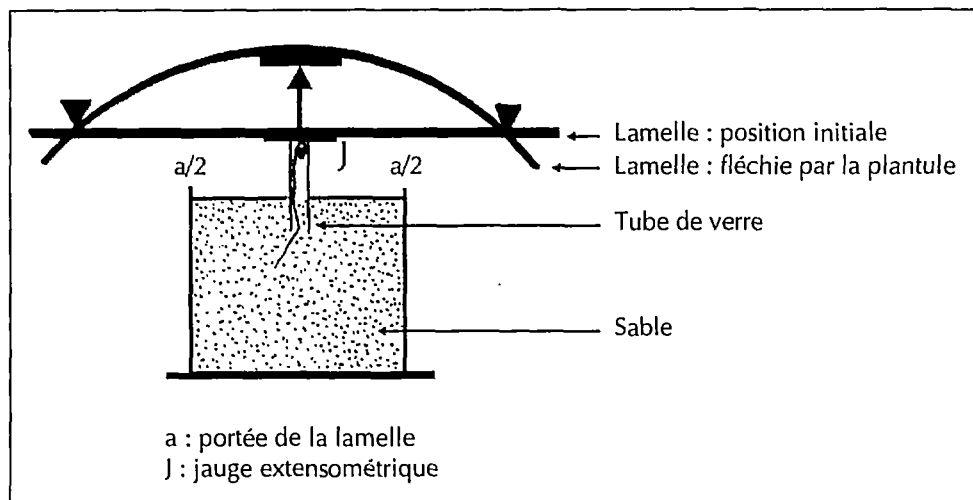
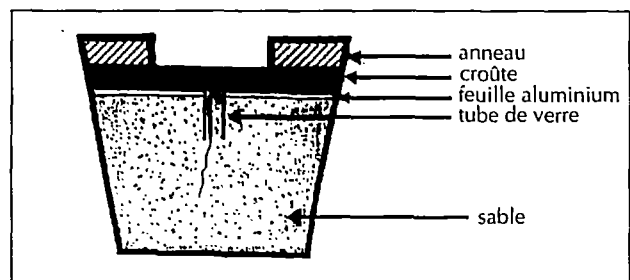


Figure 2. Dispositif de mesure de la force de croissance des plantules.

tenues par un anneau métallique pour empêcher tout mouvement (figure 3). Les croûtes sont regroupées par valeurs de résistance et, dans chaque classe de résistance, la levée des plantules est observée.

Figure 3. Montage pour l'étude expérimentale de l'émergence sous obstacle.



Résultats-discussion

Caractéristiques de croissance des plantules

Les trois espèces étudiées développent des forces maximales de croissance différentes : celles du maïs sont les plus élevées (0 à 2 N) et celles de la carotte les plus faibles (0 à 0,4 N). Une grande variabilité de cette force maximale de croissance apparaît pour chacune des trois espèces bien que les plantules choisies soient chaque fois d'un même âge physiologique et issues de semences de même masse. Cette variabilité mise en évidence sur les histogrammes, peut être aussi exprimée par la courbe de fréquence cumulée des plantules exerçant une force strictement supérieure à une valeur seuil exprimée par l'abscisse (figure 4). Cette variabilité intra espèce est responsable en grande partie des différences observées dans les taux d'émergence.

Par ailleurs pour les plantules de betterave et de carotte testées à des âges différents, nous remarquons que les forces des plantules quatre jours après la germination ont les forces les plus élevées : ce résultat est en accord avec les travaux de Dürr *et al.* (1990) relatifs aux différences phases de la vie hétérotrophe. De plus, étudié chez la carotte, l'effet masse des semences est décelé.

Emergence des plantules

Emergence théorique

La relation (2) permet, comme il a été décrit précédemment, de connaître la possibilité d'émergence d'une plantule de force connue à travers une croûte de résistance déterminée. Si le raisonnement découlant de cette relation (2) est appliqué à une population de plantules dont la distribution des forces a été préalablement établie, il est possible par une homothétie de rapport k de transformer la courbe de fréquence cumulée des forces en une courbe représentant le taux d'émergence théorique en fonction de la résistance de l'obstacle (figure 5).

Comparaison émergence théorique - émergence expérimentale

Il y a une bonne adéquation globale entre les taux d'émergence observés et les fréquences théoriques calculées à partir du module de rupture par flexion. Le taux d'émergence diminue progressivement lorsque la résistance augmente et dans le cas de plantules prises quatre jours après la germination, devient nul pour des résistances de l'ordre de 2,6 N pour le maïs, 0,8 N pour la betterave et 0,4 N pour la carotte. Les résultats rendent donc bien compte des différences de distribution statistique des forces pour ces espèces (figure 5). Les écarts observés révèlent d'une

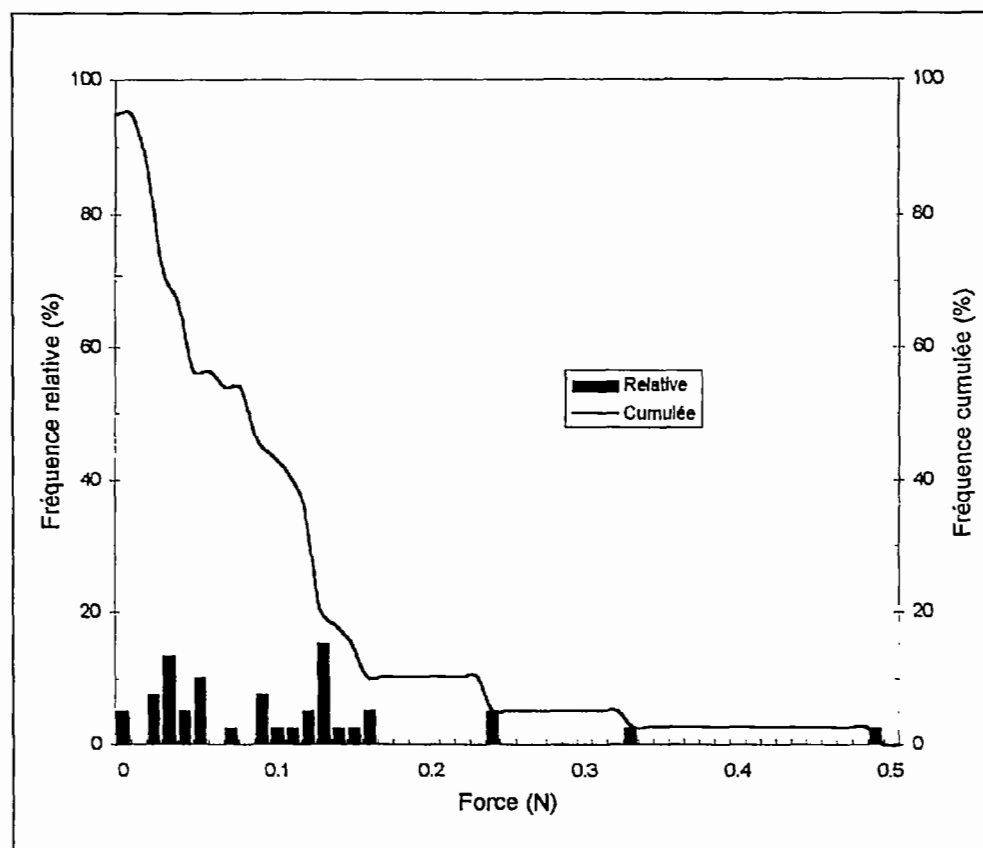


Figure 4. Force de croissance des plantules de carotte et mode d'expression (grosses semences, plantules 4 jours depuis la germination).

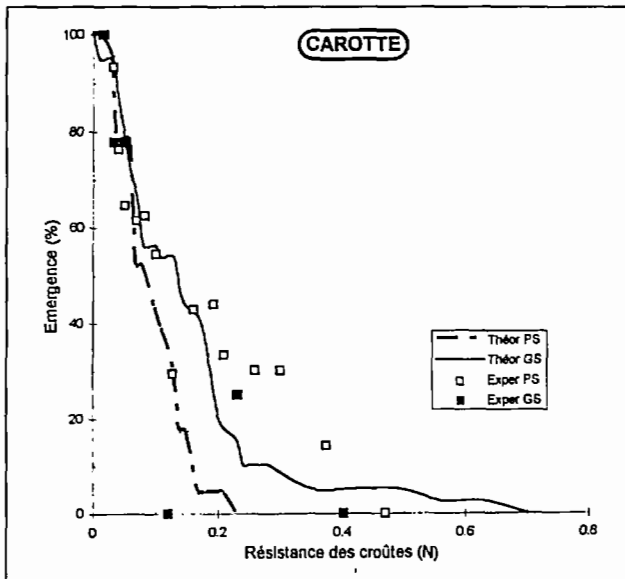
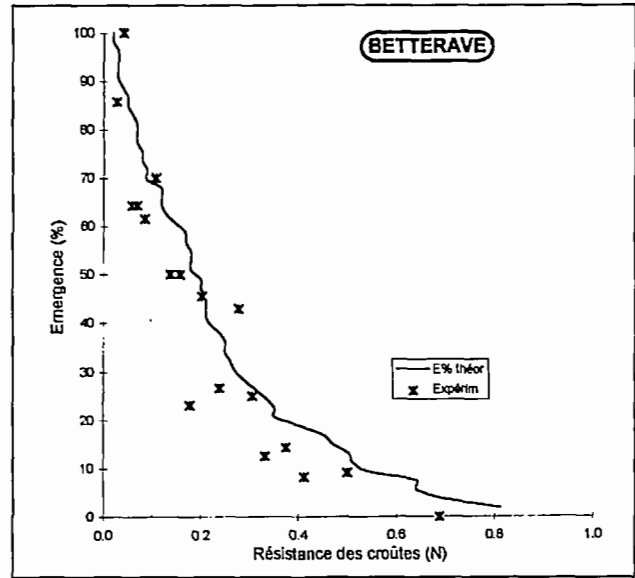
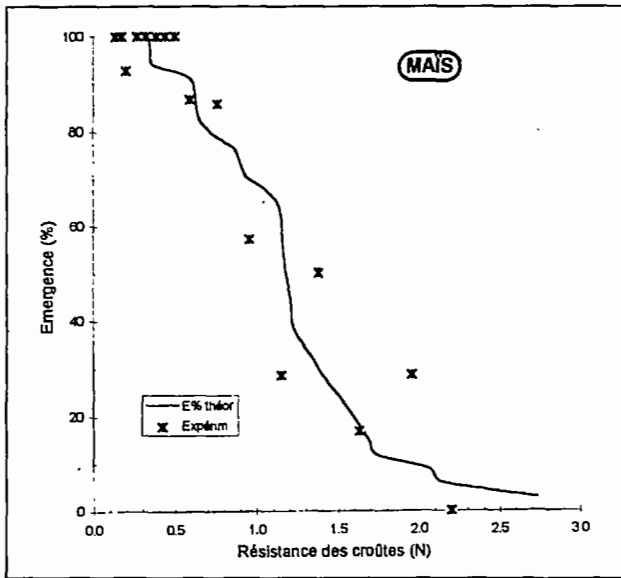


Figure 5. Courbes théoriques et points expérimentaux de l'émergence de plantules de maïs, betterave et carotte, 4 jours après la germination.

part un biais expérimental quant à la répartition des épaisseurs de croûtes dans chaque classe de résistance et d'autre part la variabilité résiduelle autour du module de rupture.

Conclusion

Un modèle de prévision du taux d'émergence des plantules a été établi dans des conditions expérimentales bien précises. Il tient compte simultanément de la distribution statistique des forces de croissance et des caractéristiques physiques et mécaniques des obstacles. Il y a une bonne adéquation globale entre

les taux d'émergence observés et les fréquences théoriques calculées à partir du modèle de rupture par flexion. Ce modèle rend compte des différences de masses des semences dont les plantules sont issues (carotte) et vraisemblablement des différences d'âge (durée de la vie souterraine des plantules). Ce travail appelle d'autres études pour compléter le modèle en introduisant par exemple une variation dans le temps de la teneur en eau des croûtes.

Références bibliographiques

- DÜRR C., TAMET V., BOIFFIN J., 1990. Redistribution of seed reserves during emergence of carrot seedlings and its influence on subsequent growth. In : Scaife, A. (Ed) Proceedings of the First Congress of the European Society of Agronomy, Colmar : E.S.A., Sect. 1, 43 p.
- GOYAL M.R., DREW L.O., CARPENTER T.G., 1982. Analytical prediction of seedling emergence force. Trans. ASAE, 25 : 38-41.
- STA, 1985. Règles internationales pour les essais de semences. Vol 13, suppl 2, Zurich.
- SAGLIO P., PRADET A., 1980. Soluble sugars, respiration and energy charge during aging of excised maize root tips. Plant Physiol 66 : 516-519.
- SOUTY N., STENGEL P., RODE C., TUTTOBENE R., 1992. A mechanistic study of maize emergence through superficial crusts. Soil and Tillage Research, 23 : 125-140.
- SOUTY N., RODE C., 1993. Emergence of sugar beet seedlings from under different obstacles. Eur. J. Agron., 2 (3) : 213-221.
- TAMET V., SOUTY N., RODE C., 1995. Emergence des plantules de carotte (*Daucus carotta* L) sous des obstacles mécaniques superficiels. Agronomie, 15 : 109-121.
- TIMOSHENKO S., WOJNOWSKI-KRIEGER S., 1961. Théorie des plaques et des coques. Librairie Polytechnique Ch. Béranger, Paris, p. 51-78.

Effet du travail du sol au sec à la dent Rs8 sur l'amélioration de la production du sorgho au Burkina Faso

Albert BARRO

Cnrst/Inera, Station de Saria, BP 10, Koudougou, Burkina Faso

Résumé : Devant les difficultés que l'on rencontre au Sahel pour la réalisation des opérations de préparation du sol, les travaux de recherche se sont orientés sur l'application du travail en sec. Les études menées en motorisation à Saria et à Di ont montré un avantage certain pour l'accroissement des rendements et des marges dès la première année. Compte tenu du coût élevé de l'investissement nécessaire au sous-solage en motorisation. Les travaux ont été menés pour adapter la technique à la traction animale. L'usage de la dent Rs8 (réversible 8 mm d'épaisseur) mise au point par le Ceemat en collaboration avec l'Inera est comparé au labour et au travail manuel au Burkina Faso. Le temps de travail est de 10-15 h/ha. La technique de travail du sol en sec en traction animale permet un enracinement profond soit 63 % de plus que le labour en début montaison. On a la même production de grain que le labour (2 057 Kg/ha contre 2 048), soit 22 % de plus que le témoin qui est le travail manuel à la daba. La technique du travail du sol en sec en traction animale peut augmenter la production agricole et contribuer à une agriculture durable dans les pays du Sahel.

Le Burkina Faso est situé en Afrique occidentale dans la boucle du fleuve Niger. C'est un pays sahélien avec une saison sèche qui peut varier d'octobre à mai dans la plupart des régions. La saison pluvieuse, caractérisée par des précipitations de forte intensité en début d'hivernage, est ponctuée par des périodes de sécheresse pouvant atteindre dix jours. Dans ces conditions climatiques les études menées sur le travail du sol avaient pour objectif essentiel de :

- diminuer, voir supprimer le ruissellement ;
- favoriser l'alimentation hydrique des plantes afin de rendre les cultures tolérantes au stress hydrique.

Cela avec un double objectif : accroître les rendements, et sécuriser la production.

Face à ces objectifs, le labour, qui est souvent cité comme la meilleure technique de préparation du sol par de nombreux auteurs, n'a pas donné satisfaction dans bien de situations pédoclimatiques. C'est ainsi

qu'en 1984, des travaux ont été menés à Gampèla sur l'effet du sous-solage en motorisation sur les rendements du sorgho par Herblot (1984). En 1987, Ducreux *et al.*, ont étudié l'effet du sous-solage et du chiselage sur l'eau, le sol et la plante, à Saria. En 1998 à Saria, nous avons évalué l'effet résiduel du sous-solage sur la production du sorgho. Cependant, en 1991, l'étude du sous-solage à Di, en sol à caractère vertique, a donné un accroissement de 10 % de la production de grain soit 524 kg. Dans ces conditions, les calculs de coût réalisés avant dévaluation permettaient de payer les charges avec une marge nette de 28 596 FCfa/ha.

Les difficultés de mise en œuvre du travail du sol en sec en motorisation (investissement et coûts élevés) ont orienté les travaux vers la recherche de moyen de réalisation du travail du sol en sec en traction animale. Le Tiech et Bordet (1989) ont réalisé des tests d'efficacité d'outils à dent dans plusieurs pays d'Afrique. Au Burkina Faso la dent Rs8 fut la meilleure à la suite des tests de mise en œuvre réalisés à Saria.

Nous présenterons ici, à travers quelques résultats obtenus sur des expérimentations menées au Burkina Faso, les effets de cet outil sur quelques paramètres de la production.

Présentation de l'outil

La dent Rs8 est constituée d'une lame d'acier de 8 mm d'épaisseur, de 50 mm de large et 500 mm de long. Elle est utilisée sur le bâti de la houe Sine à l'aide d'un étauçon en « T » et sur le bâti CH9 (au Burkina) à l'aide d'un étauçon en « I » (figure 1).

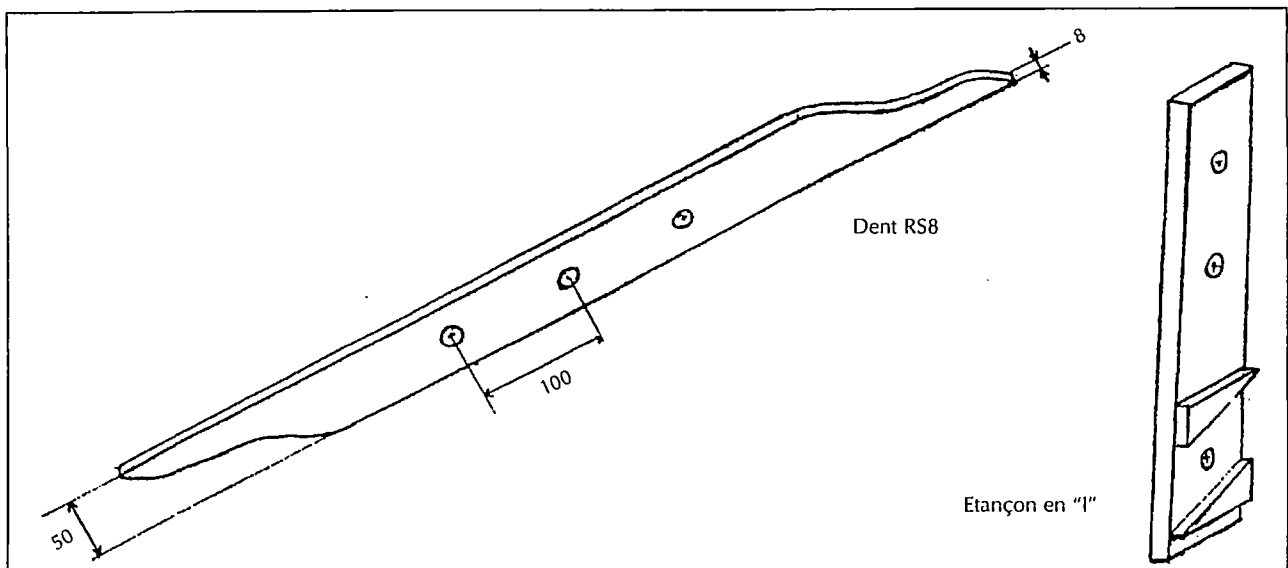


Figure 1. Schéma de la dent Rs8 et de l'étauçon en « l ».

Action de l'outil sur le sol

Les mesures réalisées sur sol sablo-argileux ont montré (figure 2) que la largeur de travail est liée à la profondeur par une fonction du $y = ax + b$ avec $y =$ largeur de travail, $b = -3,99$, $a = 2,37$ avec un coefficient de corrélation $r = 0,98$. La largeur de travail se réduirait à l'épaisseur de dent quand on est à 2 cm de profondeur. En travaillant à 10 cm de profondeur on a une largeur éclatée de 20 cm. En situation humide, l'effet serait beaucoup plus limité.

Les études de consistance et de cisaillement réalisées par Ducreux et Manière en 1984 ont montré que le

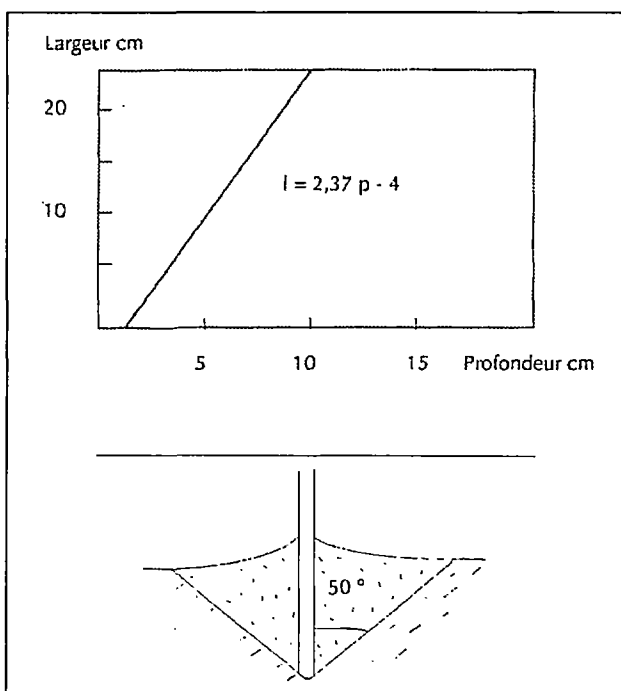


Figure 2. Lien entre la largeur éclatée et la profondeur de travail.

sol, à consistance dure, se brise sous l'action des outils en provoquant dans le sol en place des fissures qui vont au-delà de la profondeur et de la largeur mesurées. En 1987 et 1990 le suivi du front d'humectation a confirmé ce fait à Saria.

C'est ainsi qu'il semble judicieux pour une culture qui est semée à 80 cm entre ligne de faire des passages simples à 40 cm d'écartement et à 10 cm de profondeur.

Efforts de traction et temps de travaux

L'effort moyen de traction mesuré au dynamomètre à aiguille varie de 80 à 90 kgf. Le temps de travail à 80 cm entre passages et à une profondeur moyenne de 8 cm est de 10 h/ha. Quand on passe à l'écartement de 40 cm pour une profondeur de 10 cm, on a 15 h/ha.

Les mesures réalisées sur des dents fabriquées avec des lames de ressort de Peugeot 504 ont montré qu'il faut 2 à 3 dents réversibles pour 1 ha en considérant que l'on travaille sans les rebattre. Avant dévaluation, une dent ainsi fabriquée coûtait 1 000 FCfa.

Développement du système racinaire

L'étude du système racinaire a porté essentiellement sur la profondeur car ce facteur est important dans les stratégies de lutte contre la sécheresse. Le tableau I

Tableau I. Profondeur d'enracinement en début montaison et production de grain du sorgho.

Traitements	Daba (1)	Labour (2)	Rs8 + Labour	Rs8 (3)
Profondeur racinaire en cm	40	40	65	65
Rendement grain en kg/ha	1 684	2 048	2 384	2 057
Gain/témoin (%)	0	+22	+42	+22

(1) Daba : profondeur de travail (4 à 5 cm ?).

(2) Labour : profondeur de travail (12 cm ?).

(3) Rs8 : profondeur de travail 9 cm.

montre que dès le stade début montaison le système racinaire est profond : 65 cm sur les parcelles ayant subi le passage de la dent Rs8 à 9 cm de profondeur. Cela permet aux plantes d'échapper aux périodes de sécheresse. Le labour, par contre, n'a pas permis un meilleur enracinement.

La densité du système racinaire n'a pas été mentionnée dans ce document mais des observations ont montré que le labour donne la plus forte densité racinaire.

Production de grains

Le tableau I montre que le travail du sol en sec à la dent Rs8 donne le même rendement que le labour. On a un accroissement de 22 % par rapport à l'usage de la daba dont le travail reste superficiel. La combinaison du travail du sol en sec et du labour en traction animale permet le cumul des avantages des deux techniques (+42%). Il ressort que la dent Rs8 est un outil qui induit une augmentation de la production. Pour l'investissement que l'opération demande, le gain est important et cela d'autant plus que l'opération prend 15 h/ha et se réalise en saison sèche. Au-delà de cet effet que nous avons quantifié la technique à un rôle de sécurisation de la production qui constitue un atout dans les pays du Sahel.

Conclusions et perspectives

Un outil efficace a été mis au point pour soutenir une technique stratégique pour les pays du Sahel. Cet outil pourrait être une alternative au labour dans des conditions de pluviométrie faible et irrégulière en début de saison des pluies. Mais la problématique du travail du sol, dans le sens de permettre aux structures d'encadrement de mettre l'outil qu'il faut à la place qu'il faut, demeure. En effet on se rend compte que la

diffusion des outils doit tenir compte des conditions pédoclimatiques des différentes régions. Car souvent la charrue acquise sur crédit ne peut être utilisée que lorsque l'humidité nécessaire au bon fonctionnement de l'outil est atteinte après la période favorable aux semis. Dans d'autre situation la profondeur de sol arable est trop faible (20 à 30 cm sur le plateau central) pour valoriser l'usage de la charrue.

Ainsi nous pensons que, en plus du matériel et des techniques de préparation du sol, un outil de prévision et de choix de l'opération de travail du sol doit être apporté aux agriculteurs du Sahel. En outre, il serait nécessaire de trouver le meilleur compromis entre la difficulté du travail et le bénéfice que l'on peut en tirer pour trouver la profondeur optimale de travail du sol, sachant qu'il n'est pas avantageux de diluer la matière organique sur une grande profondeur.

Références bibliographiques

BARRO A., 1988. Contribution à l'étude des relations eau-sol-plante-machine. Mémoire d'ingénieur d'agronomie tropicale. ESAT Montpellier. 50 p.

BARRO A., 1991. Rapport de synthèse sur l'étude du travail du sol en traction animale. INERA/CNRST. Burkina Faso. 7p.

DUCREUX A., 1984. Caractérisation mécanique des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche d'Afrique de l'Ouest. Etude d'un prototype d'outil permettant de travailler en période sèche. Thèse USTL Montpellier.

DUCREUX A., MANIERE G. Nov. 1984. Variation de la densité des sols, diagramme représentatif. Bulletin français d'humidimétrie neutronique n° 16.

HERBLOT G., 1984. Une expérimentation « travail du sol en sec » au Burkina Faso. *Machinisme agricole tropical* n° 88.

LE THIEC G., BORDET D., 1989. Essai et mise au point d'outil de travail du sol à traction animale. *Machinisme agricole tropical* n° 102.

Adaptation des techniques culturales paysannes pour l'amélioration de l'implantation de l'arachide dans le bassin arachidier du Sénégal

Modou SÈNE
Isra-Sba, BP 199, Kaolack, Sénégal

Résumé : Au sahel, la densité de population de l'arachide est souvent affectée par la sécheresse de début de cycle. Il est donc nécessaire, par des techniques culturales adaptées, de parvenir à un aménagement du profil cultural qui favorise la conservation de l'humidité de surface. Les paysans pratiquent le sarclage de prélevée pour agir sur le lit de semences. Une technique légèrement modifiée de cette opération, le sarclage de prélevée, avec ou sans enfouissement de fumure organique a l'avantage de respecter le calendrier cultural et d'être adaptée aux équipements disponibles. Les résultats d'essais mis en place en station pour comparer le sarclage de prélevée à plat et le sarclage de prélevée, avec ou sans apport de matière organique, montrent que le sarclage de prélevée sur la ligne de semis permet de mieux conserver l'humidité du lit de semences et d'améliorer significativement la densité de population à la levée.

L'arachide occupe une place de choix dans l'économie du Sénégal. Le développement rapide de sa culture à partir de la deuxième moitié du XIX^e siècle a permis de franchir la barre des 1 million de tonnes vers la fin des années 50. Le déclin de la production qui a suivi traduit la dégradation des conditions agro-climatiques et socio-économiques : la sécheresse des trois dernières décennies, la baisse de la fertilité des sols, difficulté d'accès aux intrants, vétusté des équipements.

En considérant les trois phases phénologiques de l'arachide (germination-levée, floraison, reproduction), les composantes du rendement telles que définies par de nombreux auteurs (Cahaner et Ashri, 1974; Enyi B.A.C., 1977; Fennech *et al.*, 1977; Ketring *et al.*, 1982) sont :

- la densité de population (nombre plants/ha);
- le nombre de gousses par plant lié au rythme d'émission des gynophores et la réussite de la pénétration;
- le poids des gousses.

Si les facteurs contrôlables tels que les semences, les équipements et la fertilisation sont à l'optimum, alors l'alimentation hydrique constitue le facteur limitant principal en culture pluviale dans le Sahel. L'obtention de densité de population optimale (entre 120 000 et 160 000 plants/ha en fonction de la variété — recommandations Irho/Irat, 1963 —) dépend alors essentiellement de la date et de la hauteur de la pluie de semis mais aussi de la répartition des pluies en début de cycle. Ainsi, la phase de germination et de levée de l'arachide a fait l'objet d'importants travaux (Bouffil, 1951; Montenez, 1957), mais ces derniers n'ont pas abordé réellement la réussite de la levée en conditions sèches. Lorsque la sécheresse est intense après une pluie insuffisante, on peut observer des échecs spectaculaires du semis. Deux processus interviennent dans la germination; ils sont d'ordre physique en ce qui concerne l'imbibition de la semence (Bruckler, 1983; Bouaziz et Burckler, 1989) et biologique vis-à-vis de la reprise de la respiration de l'embryon, de sa croissance et de son développement (Montenez, 1957; Delcaux, 1987).

Sur d'autres cultures, d'importants travaux (Burckler et Bouaziz, 1991; Haddas *et al.*, 1974; Boiffin *et al.*, 1983) ont montré que pour rendre compte d'un taux et d'une cinétique de germination observés *in situ* on invoque généralement deux conditions physiques très générales :

- la qualité du contact terre-graine qui dépend essentiellement de la structure du lit de semence et de la taille de la semence;
- l'humidité du sol dans l'environnement de la semence.

Dans le cas particulier des conditions de climat et de sol qui prévalent au Sénégal pour la culture de l'arachide, on peut admettre que la température et l'aération ne sont pas limitantes.

Par conséquent, on perçoit aisément l'importance des pratiques culturales, de la pluviométrie et de l'état physique du sol qui agissent simultanément sur l'imbibition et la germination.

Les pratiques culturales permettent d'intervenir à deux niveaux :

- le travail du sol permet de jouer sur l'état structural du lit de semence, et donc des caractéristiques hydrodynamiques ;
- la technique de semis permet de contrôler, pour une structure donnée, la dose de semences et le placement de la semence, et donc l'humidité au contact de la semence.

Ainsi, les pratiques culturales doivent permettre non seulement de maîtriser la profondeur de placement de la semence, mais aussi de ralentir au maximum le dessèchement du lit de semence par effet mulch de surface.

Dans les zones où l'érosion hydrique est une contrainte majeure, la non-adoption de technologies performantes telles que labour est liée à des contraintes pluviométriques et matérielles. Par conséquent, l'orientation opérée au niveau de la recherche ces dernières années consiste à partir du calendrier de travail et des équipements disponibles pour la mise au point et/ou l'emprunt de techniques culturales adaptées et efficaces.

Ainsi, le travail en sec à la dent (coutrier) en courbe de niveau améliore l'infiltration des eaux des premières pluies. Ceci se traduit par une avancée plus rapide du front d'humectation (Sène et Garin, 1989).

Par ailleurs, le sarclobuttage de prélevée permet une meilleure conservation de l'eau dans le profil et en particulier en surface (Juncker et Sène, 1990).

En culture arachidière, l'itinéraire technique des paysans inclut un sarclage à plat de prélevée (radou). Une légère modification qui n'affecte pas leur calendrier cultural est souvent apportée à cette opération. Ainsi la création d'une butte de 5 à 6 cm sur la ligne de semis donnant lieu au sarclobuttage de prélevée (radou baligne) permet à la fois d'agir sur la profondeur de placement de la semence et de générer un effet mulch de surface (Sène, 1995).

Le radou baligne en courbes de niveau constitue aussi une option intéressante pour l'enfouissement localisé des fumures organiques (fumier, compost).

L'objectif de ce travail est de quantifier, en cas de sécheresse de début de cycle, les effets du radou baligne sur l'implantation de l'arachide et de valider son utilisation.

Matériel et méthode

Les traitements

Trois pluies de semis ont été considérées pour simuler chaque type de saison des pluies identifiées dans le Sud Bassin arachidier (Annerose, 1990). Le choix de ces hauteurs de pluie s'appuie sur des résultats d'analyse fréquentielle de la pluviométrie effectuée (Sène, 1995). Il s'agit de :

- saison de pluie tardive : pluie de semis de 15 mm (P1)
- saison de pluie intermédiaire : pluie de semis de 30 mm (P2)
- saison de pluie précoce : pluie de semis de 45 mm (P3)

Pour chaque hauteur de pluie visée, l'apport d'eau est réalisé par irrigation au Sprinkler.

La caractérisation de l'irrigation concerne :

- l'analyse de l'homogénéité de l'apport d'eau à l'aide d'un jeu de 6 pluviomètres ;
- la détermination du front moyen d'humectation et du stock hydrique à 50 cm (9 répétitions).

Le tableau I présente les caractéristiques moyennes de chaque régime pluviométrique.

Tableau I. Caractéristiques moyennes des régimes pluviométriques.

Série	Pluie visée (mm)	Pluie obtenue (mm)	Front d'humectation (cm)	Stock hydrique (mm)
P1	15	16,9 ± 0,7	13,3 ± 0,9	25,5 ± 0,3
P2	30	29,8 ± 1,1	19,5 ± 1,3	36,8 ± 1,9
P3	45	37,1 ± 0,5	23,7 ± 1,9	48,9 ± 1,4

Aménagement du lit de semence

Pour chacune des trois pluies de semis retenues, on considère trois traitements suivants (3 répétitions par traitement) :

- le témoin "paysan" : consiste en un semis mécanique en ligne en traction animale, suivi d'un sarclage à plat de prélevée, ou radou simple (RS) ;
- le semis est suivi d'un sarclobuttage de prélevée, ou radou baligne (RB) ;
- le semis est suivi d'un apport localisé sur la ligne de semis de fumier enfoui grâce à un sarclobuttage de prélevée (RBF). La dose d'apport est de cinq tonnes/ha.

Le semis de l'arachide

La variété utilisée est la 73-33 (semi-tardive de 105 jours) de type Virginia à port érigé. Le semis en ligne à un écartement de 0,5 m en humide après irrigation est effectué au semoir en traction équine. Les semences traitées au fongicide ont donné une germination de 98 % selon un test classique.

Dispositif et conduite de l'essai

Les trois séries considérées correspondent chacune à une pluie de semis et sont de dimension 46 m sur 15 m. Elles sont séparées entre elles par une allée de 3,5 m de large. Chaque série est subdivisée en 3 blocs de 15 m sur 15 m comportant chacun 3 parcelles élémentaires correspondant chacune à un des 3 traitements ci-dessus indiqués. Ces traitements sont randomisés au sein d'une série.

Les opérations culturales sont réalisées sur le dispositif comme suit :

- aussitôt après irrigation, le semis de l'arachide est réalisé en ligne au semoir et en traction équine. L'écartement entre les lignes est de 50 cm, alors que la profondeur de semis est réglée à 4 cm en moyenne; l'utilisation d'un disque de 30 crans pour la variété utilisée donne lieu à un écartement sur la ligne de 13,5 cm, soit une densité théorique de 148 000 plants/ha;
- les sarclages sont effectués aussitôt après le semis et les apports de fumures; ces derniers sont constitués par l'engrais classiquement utilisé, soit 150 kg par ha de 8-18-27 (soit 12-27-40) sur toutes les parcelles d'une part, et par le fumier sous forme de "poudrette" apporté à 5 t par ha uniquement sur RBF, d'autre part;
- un désherbage manuel est fait par la suite, à la demande, pour éviter la concurrence pour l'eau.

Contrôles et mesures réalisés à la mise en place de l'essai

Les caractéristiques de départ sont effectuées à différents niveaux. Sur le plan climatique, les relevés météorologiques ont permis de suivre l'évolution des paramètres telles la température, l'humidité relative et l'évapotranspiration potentielle. L'analyse sur les données de longue période a permis de comparer les conditions climatiques de début de saison des pluies avec celles de la contre-saison froide.

Sur le plan édaphique, il s'agit de caractéristiques physico-chimiques, structurales, hydriques et hydrodynamiques. Ces résultats sont disponibles par ailleurs (Sène, 1995).

En ce qui concerne le travail de sarclage de prélevée qui constitue le traitement étudié, la caractérisation est faite en utilisant la méthode du profilographe qui permet, en particulier, le calcul de l'indice de rugosité. Pour chacune des hauteurs de pluies testées, les caractéristiques de l'état de surface des traitements étudiés sont nettement distincts entre le sarclage à plat et les sarclobuttages. L'indice de rugosité calculé est deux fois plus important pour le sarclobuttage que pour le sarclage simple.

La profondeur de placement des semences a été observée sur un total de 60 graines, soit 20 graines pour chacune des trois pluies de semis. Ces observations révèlent une certaine hétérogénéité. En effet, environ 20 % de ces semences sont localisées à une profondeur inférieure à 3 cm. En raison de la différence de la vitesse de dessèchement du profil en fonction de la profondeur, on peut s'attendre à une variation des conditions hydriques de germination des semences.

Mesures réalisées au cours de l'essai

Le profil hydrique

Le suivi effectué concerne l'humidité volumique, le front d'humectation, le stock d'eau dans le profil jusqu'au front d'humectation. Pour ce faire, des prélèvements gravimétriques sont faits à raison d'un profil par parcelle élémentaire et par date dans une zone réservée exclusivement aux échantillonnages destructifs. Pour l'analyse des conditions de germination, six (6) dates de prélèvement au cours des deux semaines suivant le semis ont été considérées. En plus de l'état initial déterminé environ deux heures après l'irrigation, et juste avant le semis, les dates retenues sont les suivantes : 1, 3, 6, 9, et 14 jours après le semis (jas). Pour un suivi fin des conditions hydriques au voisinage de l'emplacement de la graine, mais aussi dans la zone de croissance de la racine, il a été procédé à l'aide d'un couteau de peintre au prélèvement de tranches de sol de 2 cm d'épaisseur. Mais à partir de la profondeur de 10 cm, les prélèvements gravimétriques sont réalisés tous les 5 cm jusqu'au front d'humectation. À chaque date, l'humidité volumique pour chaque couche ainsi que le stock d'eau dans le profil sont déterminés.

Entre deux dates de mesures, le volume d'eau perdu par évapotranspiration (Etr) est déterminé à partir de l'équation générale du bilan hydrique d'une culture. Dans le cas de cet essai, la pluviométrie (P), le drainage (D), et le ruissellement sont nuls, l'Etr est donc déterminée par la quantité apportée par irrigation (I) et la variation de stock (s).

La densité de population à la levée observée à 7 jours après semis

Le comptage a été effectué sur une placette de 12 m² réservée uniquement aux observations non destructives et délimitées sur chaque parcelle élémentaire.

Mesures et observations

Evolution des profils d'humidité

Le front d'humectation

Pour chaque pluie de semis, la figure 1 présente l'évolution du front d'humectation au cours du temps en relation avec le type de sarclage de prélevée. Environ trois heures après l'irrigation et juste avant le semis et la mise en œuvre des sarclages de prélevée, le front d'humectation moyen est à 15, 23 et 29 cm de profondeur respectivement pour les apports d'eau de 17, 30 et 37 mm.

Après la mise en œuvre des traitements étudiés, on observe une descente progressive du front d'humectation sur l'ensemble des parcelles. Ainsi au 6^e jour après semis (jas), il atteint respectivement et en moyenne 30, 35 et 38 cm pour les pluies de 17, 30 et 37 mm.

L'influence du sarclage de prélevée est variable, en particulier pour les 2 hauteurs de pluies les plus faibles. Le front d'humectation descend plus rapidement à la suite du sarclage de prélevée traditionnel simple (RS) qu'à la suite des sarclobuttages de prélevée (RB et RBF). Ainsi à 9 jas, pour les pluies de 17 et 30 mm, la différence de front d'humectation entre ces deux types de sarclage atteint en moyenne 7 cm.

L'humidité du sol

L'HUMIDITÉ DE SURFACE

En moyenne, les semences sont placées à une profondeur de 3 à 4 cm de la surface. Toutefois, la racine nouvellement émise à partir de cette profondeur à la suite de la germination se développera selon les conditions hydriques offertes par l'horizon immédiatement sous-jacent.

L'évolution de l'humidité volumique dans les tranches de sol de 2-4 cm est présentée en figure 2. L'apport d'eau par irrigation détermine la teneur en eau initiale. Ainsi, pour le site de Nioro, les humidités moyennes juste avant le semis sont de 0,133, 0,177 et 0,221/cm³ pour les pluies de semis de 17, 30 et 37 mm, respectivement. Pour chacune de ces pluies de semis, le dessèchement au cours du temps du profil, et plus particulièrement de l'horizon superficiel est bien mis en évidence.

Cependant, le sarclage de prélevée simple (RS) a un comportement distinct de celui des sarclobuttages de prélevée (RB et RBF). En effet, à partir de 1 jas pour la

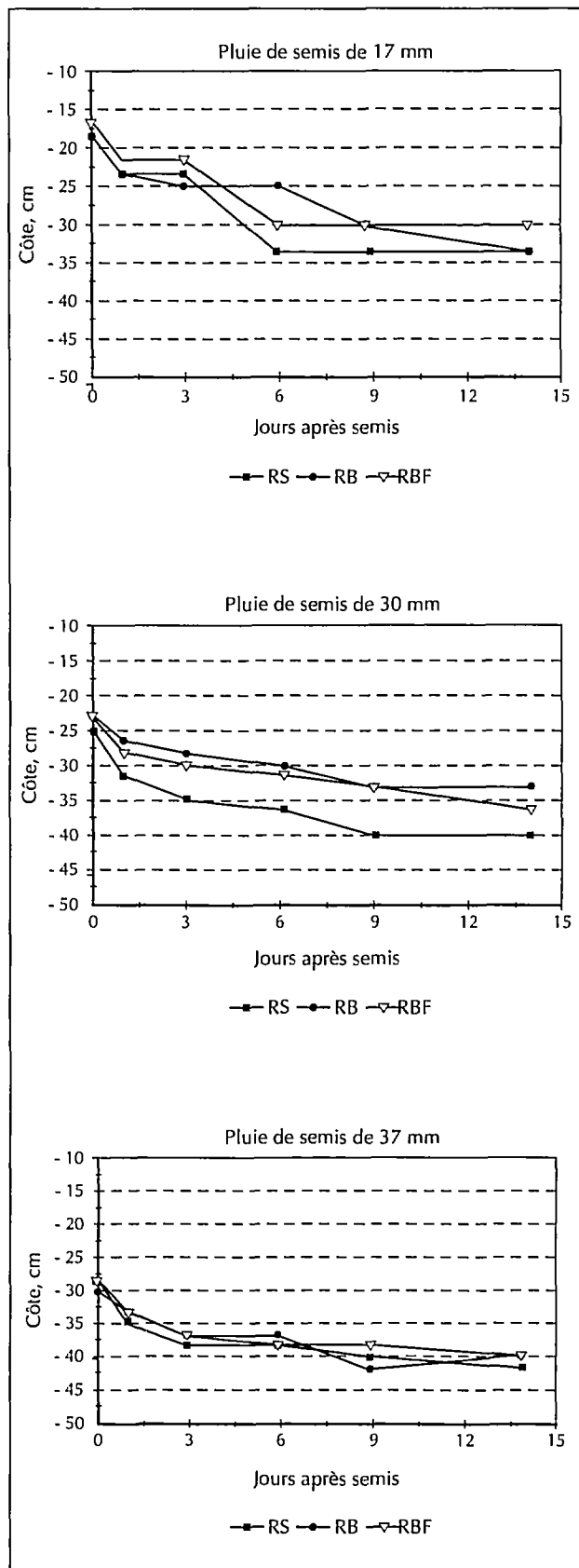


Figure 1. Evolution du front d'humectation en fonction du type de sarclage pour chacune des pluies de semis.

pluie de semis de 37 mm, et de 3 jas pour 17 et 30 mm, le dessèchement est plus accentué pour RS que pour RB ou RBF.

Pour chacune des pluies de semis, les écarts des valeurs d'humidité volumique entre les types de sarclage s'amplifient généralement au cours du temps à

partir de 1 jas pour atteindre un maximum de 0,04 à 0,05 cm^3/cm^3 entre 6 et 14 jas.

L'HUMIDITÉ DU SOL SUR L'ENSEMBLE DU PROFIL

La teneur en eau dans le profil en fonction du type de sarclage, à 1 et à 6 jas est présentée dans les figures 3a, 3b 3c pour les pluies de semis de 17, 30, et 37 mm, respectivement. Avant l'apport d'eau d'irrigation le profil contient très peu d'eau. En effet la teneur en eau varie de moins de 0,01 cm^3/cm^3 en surface à seulement 0,03 cm^3/cm^3 à 50 cm de profondeur. Après cet apport d'eau, et dès la mise en œuvre des traitements, ces figures mettent en évidence une évolution très rapide du profil d'humidité.

Tout d'abord, quelle que soit la pluie de semis considérée, il apparaît dès le lendemain du semis une très forte diminution de l'humidité des 20 premiers centimètres du sol. Cette diminution est de l'ordre de 50 %. Par la suite, il apparaît à partir de l'horizon 6-8 cm une diminution plus lente de l'humidité du profil au profit d'une redistribution en profondeur de l'eau. La descente du front d'humectation ainsi observée est d'autant plus perceptible que la pluie de semis est importante.

Au cours de cette période avant la levée, on remarque un dessèchement très rapide de la tranche 0-4 cm sur RS par rapport aux deux sarclobuttages. Ainsi sur cette épaisseur de sol à 1 jas, RS a perdu plus de 70 % de sa teneur initiale, alors que RB et RBF en conservent encore plus 50 %. A partir de 3 jas, à l'exception de l'horizon de surface 0-10 cm sur RS, les valeurs de teneur en eau sont comparables pour les différents types de sarclages pour une pluie de semis donnée.

Les stocks hydriques

La cote de 50 cm vers laquelle tend le front d'humectation pour la plus grande hauteur de pluie de semis a été retenue pour le calcul des stocks hydriques. Comme pour les humidités volumiques, les stocks diminuent très rapidement au cours des trois premiers jours qui suivent le semis. Cette diminution de stock dans cette période est d'autant plus importante en valeur absolue que l'apport d'eau est élevé (tableau II). Ce résultat met en évidence la grande influence de l'offre en eau de surface sur l'évaporation en sol nu.

Evolution de l'évapotranspiration

La phase avant la levée de l'arachide correspond à l'évaporation en sol nu, alors que la deuxième concerne l'évapotranspiration du peuplement cultivé.

Au cours des six premiers jours suivant les apports d'eau d'irrigation et précédant la levée, le sol est nu.

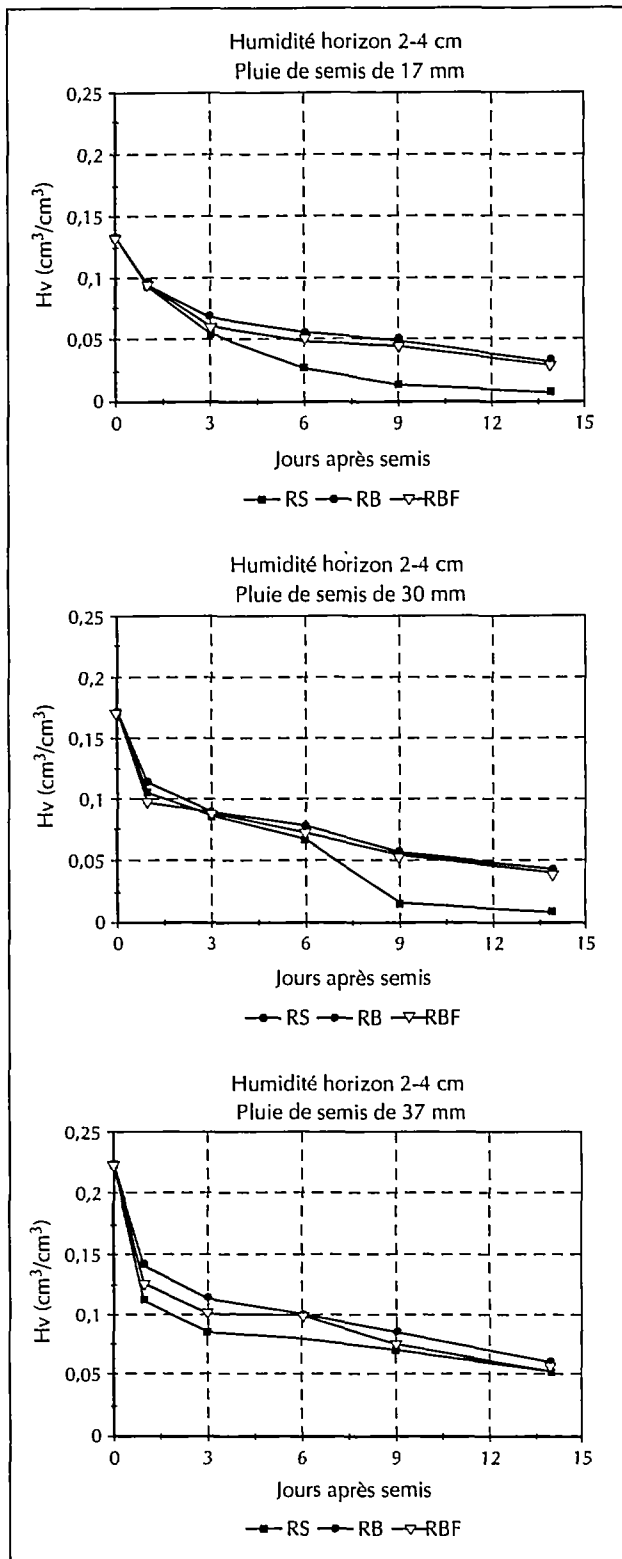


Figure 2. Evolution de l'humidité volumique de l'horizon 2-4 cm en fonction du sarclage.

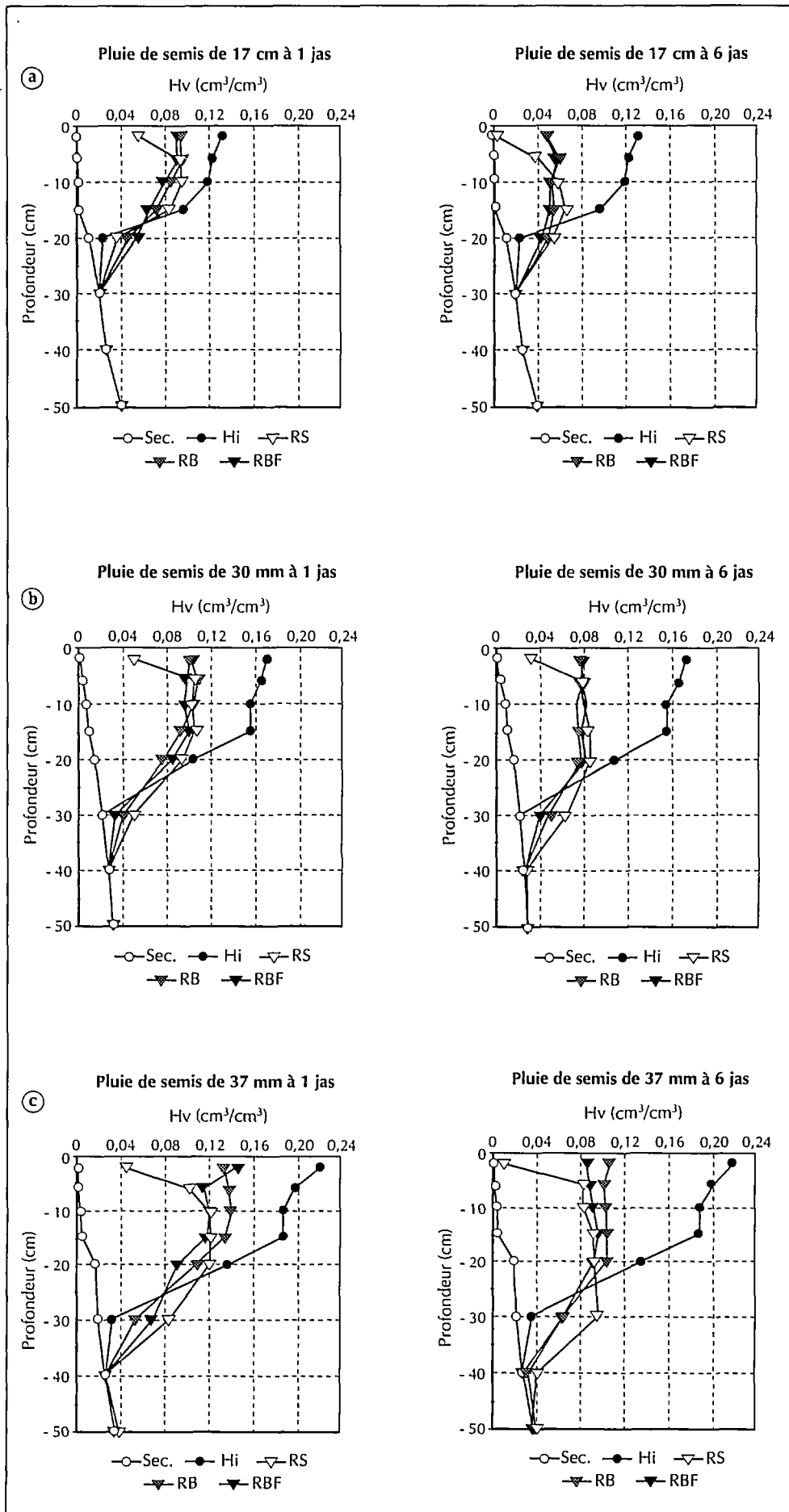


Figure 3.
 Evolution de la teneur en eau dans le profil en fonction du sarclage à 1 et 6 jours après semis.

Tableau II. Diminution du stock hydrique au cours des 3 premiers jours après semis.

Pluie de semis (mm)	Stock initial (mm)	Diminution de stock (%)	
		0 à 1 jas	0 à 3 jas
17	25,5 ± 0,3	12	22
30	36,8 ± 1,9	18	23
37	48,9 ± 1,4	21	26

L'application de l'équation du bilan hydrique aux 3 périodes respectives de 0 à 1, 1 à 3 et 3 à 6 jas permet de cerner la dynamique de l'évaporation sur l'ensemble des parcelles.

Pour chacune des pluies de semis, cette évolution, en fonction du type de sarclage de prélevée, est présentée en figure 4. En tenant compte des conditions climatiques recueillies pendant la période correspondante, il apparaît clairement une forte intensité de l'évaporation au début de cette période. Toutefois, son importance est d'autant plus grande que la hauteur de la pluie de semis est grande.

L'évaporation au bout d'une journée après l'épisode pluvieux passe en moyenne du simple (3,5 mm) au triple quand l'eau apportée augmente de 17 à 37 mm. Par la suite, elle diminue fortement. Là aussi, l'importance de la diminution enregistrée croît avec l'apport d'eau. Ainsi, par exemple pour 17 mm de pluie, la baisse sensible n'est observée qu'à la fin de la 3^e période.

Pour ces deux pluies, RB permet de mieux conserver l'eau dans le profil en début de cycle. Lors de cette période, ce traitement procure par rapport à RS une réduction de l'évaporation respectivement de 80 et 35 % pour les pluies de semis 17 et 37 mm. Le comportement observé pour RBF est en général similaire à celui de RS. L'absence d'effet du sarclage à ce stade pour la pluie de 37 mm semble traduire l'offre relativement importante d'eau en surface conditionnant l'évaporation.

Le tableau III présente le cumul de l'évaporation du sol nu, c'est-à-dire lors de la période précédant l'émergence des plantules d'arachide. En définitive, le volume d'eau mobilisé par évaporation avant la levée correspond environ à 38, 32, et 39 % pour les pluies de semis de 17, 30, et 37 mm, respectivement.

Il apparaît que RS et RBF présentent un comportement similaire quelle que soit la hauteur de la pluie de semis. Par contre, RB semble d'autant plus efficace pour préserver l'eau dans le profil que la hauteur de la pluie de semis est plus faible.

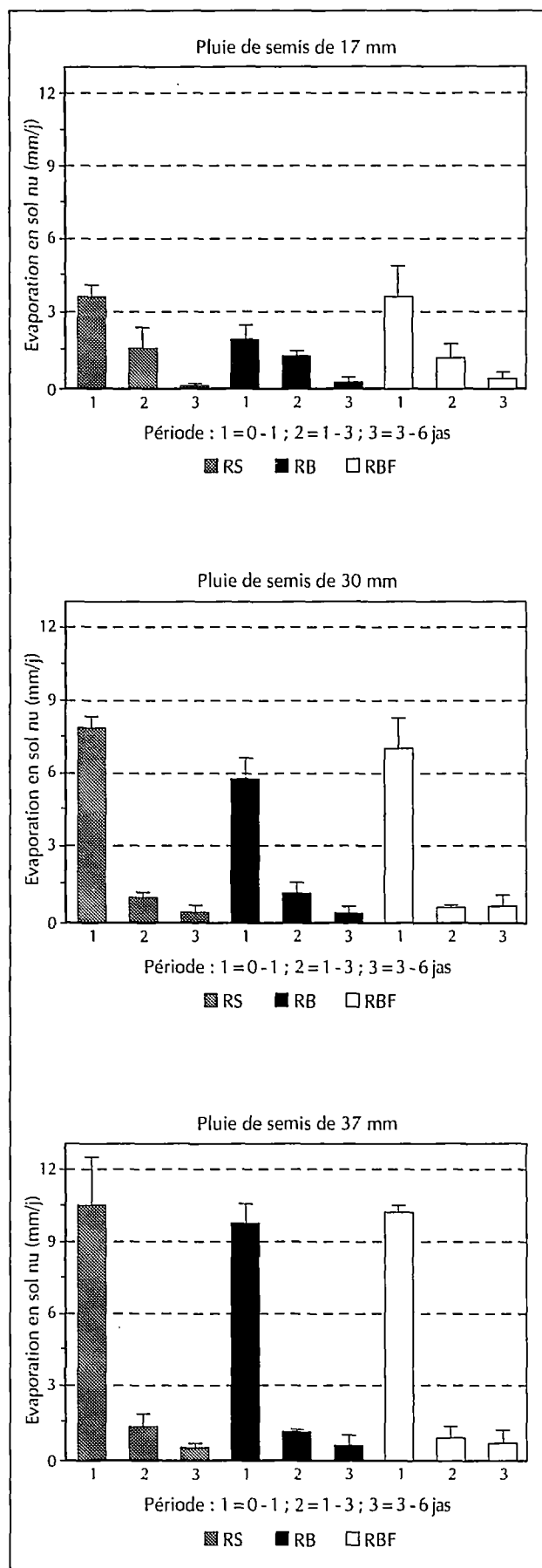


Figure 4. Evolution de l'évaporation de l'eau du profil en sol nu en fonction du sarclage lors des périodes de 0 à 1, 1 à 3 et 3 à 6 respectivement.

Tableau III. Cumul de l'évaporation en sol nu avant la levée (0-6 jas).

Pluie de semis, mm	Evaporation, mm		
	RS	RB	RBF
17	7,0 ± 2,5	5,1 ± 1,3	7,2 ± 2,4
30	10,3 ± 1,9	8,5 ± 1,4	10,1 ± 0,6
37	14,8 ± 3,8	13,9 ± 0,8	14,4 ± 2,2

Humidité de surface et évapotranspiration de la culture

Lors du fonctionnement en sol nu, on a déterminé l'évaporation moyenne journalière relative à chacune des périodes 0-1, 1-3, et 3-6 jas. Ces valeurs sont mises en relation avec l'humidité volumique de l'horizon 0-10 cm déterminée sur toutes les parcelles le jour même du semis, puis à 1 et 3 jas, respectivement.

L'évaporation moyenne journalière augmente avec l'humidité de surface (figure 5). Le sarclage de prélevée à plat, et dans une moindre mesure l'enfouissement de matière organique par le sarclobuttage de prélevée accélèrent le dessèchement par évaporation de l'horizon de surface, comparés au sarclobuttage de prélevée seul. En effet, après une intense évaporation (aussitôt après le sarclage), correspondant à une humidité de surface maximale, les résultats obtenus indiquent une évolution plus ralentie sur les sarclobuttages que sur RS. Cela est confirmé par une humidité de surface plus élevée observable dès le lendemain de la pluie pour les sarclobuttages par rapport au sarclage simple.

Résultats et discussion

Effet des traitements sur le comportement de l'arachide en début de cycle

La levée de l'arachide

Dans les conditions de l'expérimentation, l'émergence complète des plantules germées a été observée au 7^e jas. La densité observée à la levée a fait l'objet d'une analyse de la variance pour déterminer l'effet des traitements mis en œuvre. Cette analyse révèle un effet significatif du type de sarclage de prélevée.

Par rapport au sarclage simple, le sarclobuttage procure un surplus de densité à la levée pouvant atteindre 15 000 plants/ha, notamment en présence de matière organique.

L'effet du type de sarclage pour chaque hauteur de pluie de semis est analysé (tableau IV).

Jusqu'à une hauteur de pluie de semis de 30 mm, le sarclobuttage de prélevée seul ou associé à un apport de matière organique enfoui (RB ou RBF) améliore significativement la densité à la levée par rapport au sarclage de prélevée simple (RS). Ainsi les surplus de densité à la levée par rapport à RS sont respectivement de 20 000 pl/ha, et de 16 000 pl/ha pour les semis après les pluies de 17 et 30 mm.

Sachant que la densité à la levée optimale recommandée pour la variété utilisée est de 120 000 plant/ha, si on dispose de semences de qualité et d'un matériel

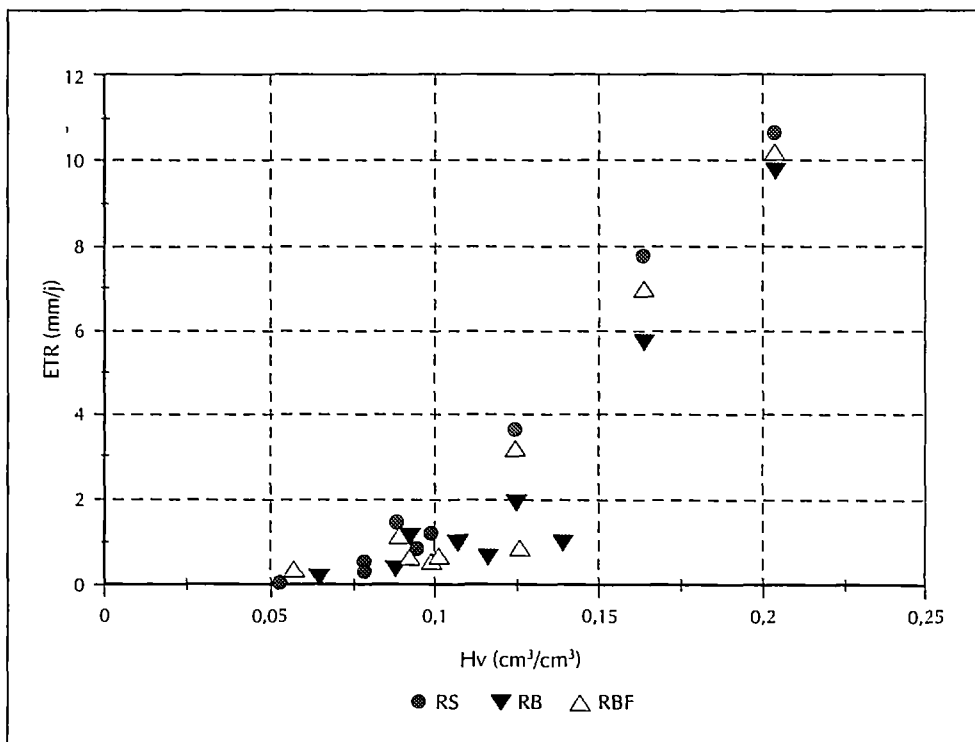


Figure 5. Relation entre la teneur en eau de l'horizon 0-10 cm et l'évaporation de l'eau du profil avant la levée.

adéquats, on perçoit à partir de ces résultats l'intérêt de semer après une pluie importante en cas de sécheresse de début de cycle. La hauteur de pluie de 30 mm semble bien correspondre à un optimum pour la levée.

Tableau IV. Densité de peuplement à la levée en fonction du type de sarclage de prélevée. Les lettres différentes indiquent des moyennes significativement différentes.

Pluie de semis (mm)	Sarclage de prélevée	Densité à la levée (*1 000 Pl/ha)	
17	RS	77,5 ± 6,9	a
	RB	97,3 ± 1,8	b
	RBF	90,3 ± 1,5	ab
30	RS	96,0 ± 3,8	a
	RB	101,7 ± 3,8	ab
	RBF	112,3 ± 0,5	b
37	RS	100,0 ± 7,5	a
	RB	99,0 ± 3,5	a
	RBF	110,3 ± 5,1	a

Quand le semis de l'arachide intervient après une forte pluie (>30 mm), les phases de germination et de levée se déroulant dans un contexte de sécheresse de début de cycle ne semblent pas affectées de manière significative par les types de sarclage de prélevée.

Les deux sarclages de prélevée présentant un buttage sur la ligne de semis ont un effet statistiquement équivalent sur la densité à la levée. Toutefois, l'évolution de cette densité sur RB est différente de celle sur RS ou RBF. En fait, quand la pluie de semis augmente, la densité moyenne de population à la levée reste constante pour RB (soit 80 % de l'optimum); alors qu'elle augmente pour RS et RBF en particulier (tableau V).

Tableau V. Pourcentage de levée par rapport à l'optimum en fonction du sarclage de prélevée.

Pluie de semis (mm)	Sarclage de prélevée		
	RS	RB	RBF
17	64	80	74
30	80	83	93
37	83	80	92

L'apport de fumier enfoui sur la ligne de semis à l'aide du sarclage, par le biais de son action éventuelle sur l'alimentation minérale de début de cycle est d'autant plus positif sur la réussite de la levée que la

pluie de semis est importante. Les indices d'une décomposition précoce de la matière organique dès sa mise en contact avec l'humidité sont fournis par l'accroissement rapide et importante de la température dans la zone de son emplacement.

Relation entre l'état du sol et l'implantation de l'arachide

Implantation de la culture et humidité de surface du sol

On a montré l'importance du type de sarclage sur l'implantation de la culture. Pour l'interprétation de ces résultats, l'analyse effectuée s'appuie sur l'évolution de l'humidité de la zone d'emplacement des semences.

PROFONDEUR DE SEMIS

La distribution de la profondeur de semis indique une valeur moyenne comparable quelle que soit la hauteur de pluie. Une certaine variation est décelable pour cette profondeur. On trouve environ 8 % des semences dans la couche 0-20 mm, 10 % dans la tranche 20-30 mm et le reste dans l'horizon 30-40 mm.

Par conséquent, il apparaît qu'en plus de l'horizon moyen de placement des semences de 2-4 cm, il est nécessaire de tenir compte de la couche la plus superficielle, soit 0-2 cm pour l'analyse de l'implantation de l'arachide en relation avec l'humidité de surface. Par ailleurs, l'état hydrique de l'horizon 4-10 cm joue un rôle capital pour le développement et la croissance de la racine avant l'émergence.

ANALYSE DE LA LEVÉE

Les deux phases distinguées sont :

- la germination qui se déroule au cours des trois premiers jours suivant le semis;
- l'émergence complète des graines germées observée à 7 jas.

La démarche ascendante utilisée pour cette analyse consiste à aller de la couche 4-10 cm des racines à celle de placement des semences.

Densité de levée et état hydrique dans la zone de croissance de la racine

A la levée observée à 7 jas, les conditions hydriques de la couche 4-10 cm concernée par la croissance de la racine sont étroitement liées à l'apport pluviométrique au semis.

L'évolution de la densité à la levée en fonction de l'humidité volumique moyenne de cette couche de sol est présentée (figure 6a). En y distinguant les traitements pluie et sarclage, on remarque qu'il y a une augmentation régulière de la densité avec la teneur

en eau, ceci jusqu'à un pallier qui semble se dessiner quand l'humidité atteint $0,06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Les teneurs en eau les plus faibles observées pour la pluie de semis la plus faible correspondent à des potentiels hydriques compris entre 1 et 1,5 bar. Par conséquent, on peut conclure que l'offre en eau dans la zone racinaire de début de cycle ne constitue probablement pas la contrainte majeure pour la levée des graines de semences germées.

Pour chaque pluie de semis, la relation entre la teneur en eau et le potentiel hydrique de l'horizon 0-10 cm, à 3 et 6 jas est présentée pour RS et RB; RB ET RBF ont des comportements semblables (tableau VI).

Densité à la levée et état hydrique dans la zone d'emplacement des semences

A la date d'observation de la levée (7 jas)

Les relations pour chacun des deux horizons sont présentées aux figures 6b et 6c.

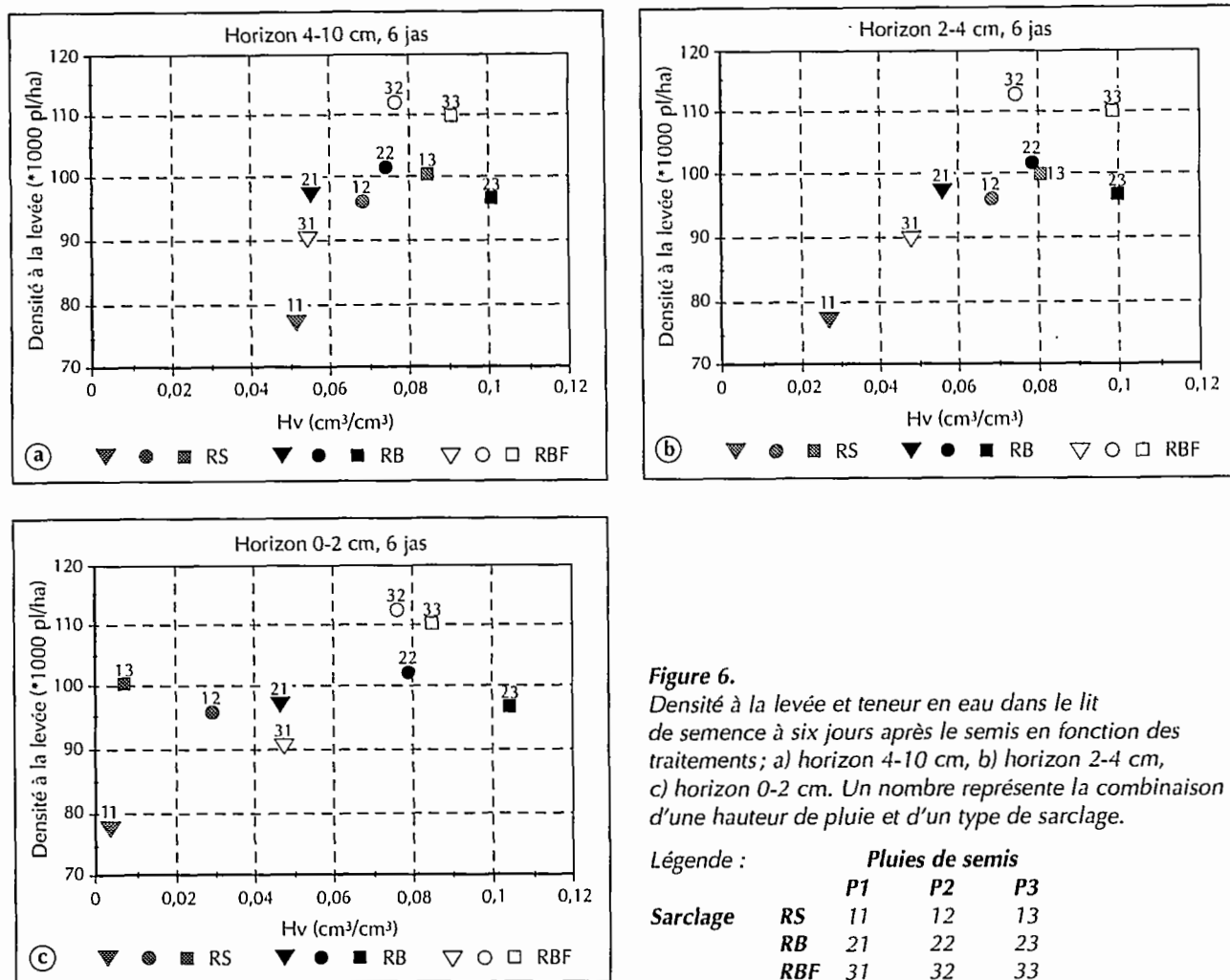


Figure 6. Densité à la levée et teneur en eau dans le lit de semence à six jours après le semis en fonction des traitements; a) horizon 4-10 cm, b) horizon 2-4 cm, c) horizon 0-2 cm. Un nombre représente la combinaison d'une hauteur de pluie et d'un type de sarclage.

Tableau VI. Variation des valeurs moyennes de la teneur en eau (Hv en cm^3/cm^3) et du potentiel hydrique (h en hPa) en surface lors de la germination et la levée.

Pluie semis	Horizon		0-2 cm				2-4 cm			
	Date	Sarcl.	3 jas		6 jas		3 jas		6 jas	
			Hv	h (hPa)	Hv	h (hPa)	Hv	h (hPa)	Hv	h (hPa)
17 mm	RS		0.010	>15849	0.003	>15849	0.056	1670	0.026	>15849
	RB		0.06	1057	0.046	4205	0.067	528	0.055	1881
30 mm	RS		0.039	6657	0.029	15849	0.087	338	0.068	5280
	RB		0.086	338	0.079	338	0.090	296	0.078	475
37 mm	RS		0.020	>15849	0.007	>15849	0.086	338	0.081	338
	RB		0.121	106	10.4	211	11.4	137	10.4	169

Pour l'horizon 2-4 cm où se retrouvent 92 % des semences, l'évolution de la densité en fonction de l'humidité est en fait comparable à celle obtenue au niveau de l'horizon 4-10 cm. Toutefois, les teneurs en eau sont plus faibles pour la pluie la faible.

Si la pluie de semis est supérieure ou égale à 30 mm, l'humidité indépendamment du type de sarclage est supérieure à $0,06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, soit un potentiel hydrique équivalent de 1 057 hPa (ou 1 bar). Dans ce cas, la densité à la levée varie entre 95 000 et 110 000 plants/ha.

Par contre pour la plus faible pluie de semis, l'obtention d'une densité de semis voisine de ce pallier dépend du type de sarclage. Le sarclage simple correspond au meilleur cas avec un potentiel hydrique de l'ordre de 1 bar. A l'opposé se retrouve le sarclage à plat où le potentiel hydrique à 6 jas est supérieur à 15 849 hPa (ou 15 bar).

En ce qui concerne l'horizon plus superficiel 0-2 cm, la relation entre la densité à la levée et la teneur en eau (figure 7c) est différente des deux relations précédentes. La faible liaison entre la densité à la levée et la teneur en eau dans cette couche traduirait le nombre limité de semences ainsi concernées. Pour les sarclages, l'état hydrique, qui correspond à des potentiels en eau inférieurs à 8 bars à cette date, peut être considéré comme étant non limitant pour la germination et la levée quelle que soit la pluie. Par contre pour RS, les potentiels hydriques atteints à 6 jas indépendamment de la pluie de semis sont indicatifs de possibles contraintes pour la germination des semences situées dans cette zone.

De ce qui précède, il ressort qu'à défaut de pouvoir expliquer la variabilité observée pour la densité à la levée, l'état hydrique de l'horizon 0-10 cm de surface correspondant permet tout au moins d'émettre l'hypothèse d'une germination déficiente pour le traitement RS, indépendamment de la hauteur de la pluie de semis.

A la date supposée de la fin de la germination (3 jas)

Pour analyser cette éventualité, on considère la relation entre la densité à la levée et l'état hydrique des deux couches de sol à 3 jas (figures 7a et 7b).

Pour les semences situées dans l'horizon 2-4 cm (figure 7a), l'humidité volumique varie de $0,06$ à $0,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ est significativement affectée aussi bien par la pluie de semis que par le type de sarclage. Dans cette gamme d'humidité moyenne, dont le minimum correspond à un potentiel hydrique inférieur à 1 bar, il est logique de considérer que les conditions de germination sont satisfaisantes. Cependant, pour la pluie de semis de 17 mm, la variation autour de cette moyenne peut occasionner des conditions moins favorables pour quelques semences.

Pour les semences localisées dans l'horizon 0-2 cm (figure 7b), quelle que soit la pluie de semis, les valeurs moyennes de teneur en eau les plus faibles concernent les traitements RS avec des potentiels hydriques correspondants sont supérieurs à 16 bars. Pour les sarclages, par contre, l'état hydrique se caractérise par un potentiel inférieur à 1 bar.

On peut donc admettre que pour le traitement RS, toutes les semences situées dans cette zone n'ont pas pu germer. Mais dans ce cas, on n'explique qu'en partie la plus faible densité relative à ce type de sarclage sur la pluie de 17 mm. Pour la partie restante, on peut seulement évoquer une possible déficience pour les graines situées dans la tranche 2-3 cm où l'état hydrique pourrait être limitant pour la germination.

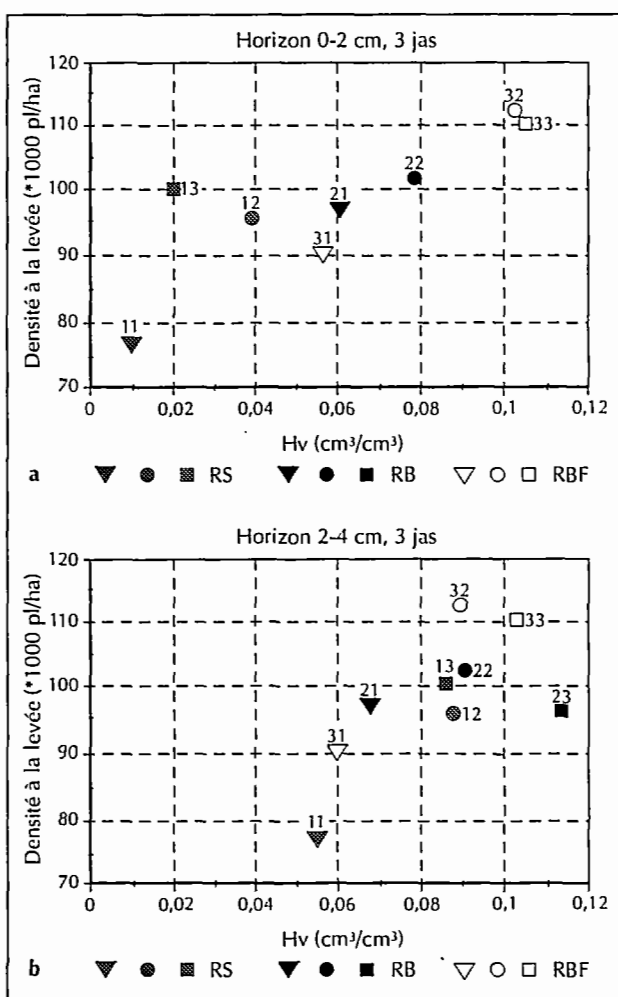


Figure 7. Densité à la levée et teneur en eau dans le lit de semence à trois jours après le semis en fonction des traitements; a) horizon 0-2 cm, b) horizon 2-4 cm.

Par ailleurs, en partant d'une teneur en eau minimale après le semis, comme dans le cas de la pluie de 17 mm, une prolongation de la durée d'imbibition, et donc de la germination est probable. Cela augmente les risques d'une germination incomplète qui pourrait être observable pour RS, en particulier.

Variabilité de la densité à la levée pour les sarclobuttages.

Pour une même gamme de teneur en eau, les densités à la levée pour RB et RBF sont statistiquement équivalentes. Mais quand la pluie de semis augmente, l'évolution de la densité de semis n'est pas la même. En effet, alors que la densité à la levée est pratiquement constante pour RB, elle augmente par contre sensiblement pour RBF. L'hypothèse d'un effet précoce du fumier pourrait ainsi être avancée. L'accroissement important de la température dans les horizons de surface sur RBF par rapport RB conforte l'idée d'une décomposition de la matière organique.

La densité à la levée relativement faible observée pour RBF à 17 mm pourrait s'expliquer par l'existence d'une forte pression osmotique liée à une concentration des produits de la décomposition de la matière organique (Gautreau, 1978). Par contre, quand la pluie de semis est supérieure ou égale à 30 mm, la teneur en eau importante qui en résulte favorise un effet de dilution de la solution de sol. Dans ce cas, on peut évoquer la possibilité de l'effet starter de l'azote favorable à la levée (Andrews et al., 1991). En fait, les hypothèses émises concernant les effets de la matière organique méritent d'être testés au cours d'une expérimentation spécifique où les paramètres chimiques ou même physiques seront suivis de plus près.

Conclusion

La densité de population à la levée est une composante principale du rendement en gousses de l'arachide. Mais, dans le bassin arachidier, des conditions sèches marquent la phase de l'implantation de la culture. Du fait de la dynamique de la couche de sol humectée, une meilleure maîtrise de l'implantation nécessite la mise en œuvre de techniques culturales permettant de limiter les pertes d'eau par évaporation du lit de semences. L'expérimentation de contre-saison mise en place dans cette perspective compare, pour différentes hauteurs de pluie, l'impact du sarclobuttage de prélevée (avec ou sans apport de matière organique) avec le sarclage traditionnel de prélevée.

L'analyse des conditions hydriques de la germination-levée de l'arachide a permis de confirmer la possibilité des techniques culturales adaptées et peu exigeantes sur le plan technique pour parvenir à une bonne conservation de l'humidité du lit de semences. En effet, par rapport au sarclage de prélevée simple (RS), le sarclobuttage (RB ou RBF) améliore les conditions d'imbibition, et partant la germination des semences. Sur la densité de population qui en résulte, cet effet sera d'autant plus significativement positif

que le semis de l'arachide sera effectué après une pluie minimale.

La comparaison des deux sarclobuttages de prélevée (avec et sans enfouissement de fumier) montre l'intérêt de la présence de la matière organique quand la pluie de semis est importante (30 mm environ). Mais à ce niveau, un effort complémentaire d'analyse des relations entre l'eau et la matière organique est nécessaire pour expliciter les résultats ainsi observés.

Toutefois, sur le plan de la réalisation de ce sarclobuttage en traction animale, les moyens plutôt rudimentaires utilisés ne respectent pas des normes établies. En conséquence l'efficacité de la pratique peut être variable d'un agriculteur à un autre, mais surtout dépend du niveau de technicité de ce dernier. C'est à ce niveau que le machinisme agricole est interpellé pour la mise au point d'outil approprié.

Références bibliographiques

- ANDREWS M., SCOTT W.R., MCKENZIE B.A., 1991. Nitrate effects on pre-emergence growth and emergence percentage of wheat (*Triticum aestivum* L.) from different sowing depths. J. Exp. Bot., 42 : 1449-1454.
- ANNEROSE D.J.M., 1990. Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) cultivée au Sénégal. Thèse de doctorat sci. nat., Paris VII, 200 p.
- BOUAZIZ A., BRUCKLER L., 1989. Modeling of wheat imbibition and germination as influenced by soil physical properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 53 : 219-227.
- BOIFFIN J., BRUCKLER L., AUBRY C., 1983. Rôle des propriétés physiques du lit de semence sur l'imbibition et la germination. III. Valeur prévisionnelle d'un modèle d'imbibition au champ et caractérisation des lits de semence. Agronomie 3 (4) : 291-302.
- BOUFFIL F., 1951. Biologie, écologie et sélection de l'arachide au Sénégal. Bull. scient. Minist. Colon. Fr. Outre Mer Sect. tech. Agric. trop., 111 p.
- BRUCKLER L., BOUAZIZ A., 1991. La germination des semences en conditions sèches. Sécheresse, 2 : 239-249.
- BRUCKLER L., 1983. Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination. I. Elaboration d'un modèle du système terre-graine. Agronomie 3 (3) : 213-222.
- CAHANER A., ASHRI A., 1974. Vegetative and reproductive development of virginia-type peanut varieties under different stand densities. Crop Sci. 14 : 412-416.
- DELECAUX D., 1987. Effets des températures fraîches sur la germination des graines de quatre cultivars d'*Arachis hypogaea* L. Oléagineux, 42 (5) : 197-205.
- ENYI B.A.C., 1977. Physiology of grain yield in groundnuts (*Arachis hypogaea*). Expl. Agric., 13 : 101-110.
- FENNECH J., PAPY F., 1977. Conditions de réussite de la levée en climat méditerranéen. Cas des cultures de céréales en sec au Nord du Maroc. Ann. Agron., 28 (6) : 599-635.

HADAS A, RUSSO D., 1974. Water uptake by seeds as affected by water stress, capillarity conductivity and seed-soil water contact. I. Experimental study. *Agron. J.*, vol. 66, 643-647.

JUNCKER E., SENE M., 1990. Comparaison de plusieurs dents pour le travail du sol en sec en traction bovine. *Isra, Kaolack, Sénégal*, 27 p.

KETRING D.L., BROWN R.H., SULLIVAN G.A., JOHNSON B.B., 1982b. Growth physiology. *In* : "Peant Science and Technology", Pattee H.E. et Young C.T. (eds). *Am. Peanut Res. & Ed. Soc., Yoakum, Texas*, 411-457.

MONTENEZ J., 1957. Recherches expérimentales sur l'écologie de la germination chez l'arachide. *Bruxelles, Ministère des colonies*, 124 p.

SENE M., 1995. Influence de l'état hydrique et du comportement mécanique du sol sur l'implantation de l'arachide. *Thèse de doctorat, ENSA, Montpellier*, 127 p.

SENE M., GARIN P., 1990. Le travail à la dent sur sol gravillonnaire au Sénégal. *In* : Starkey P.H. and Faye A. (Eds.). *Animal traction for agriculture development. Proceedings of the third workshop of the WAATN, July 7-12 1988, Saly, Sénégal* : 218-223.

Indices de rugosité du sol régionalisés

Serge GUILLOBEZ

Cirad-Ca, BP 5035, 34032 Montpellier cedex 1, France

Résumé : La rugosité de la surface du sol, sur une parcelle, est une notion qui est visuellement bien perceptible, mais qui est difficile à quantifier. Une chaîne de mesure a été développée comprenant un profilographe 3D (LASER) et un ordinateur portable. Les distances verticales entre la cellule laser et le sol sont mesurées sur une grille carrée (1 m²), ce sont des variables régionalisées qui ont été traitées par des méthodes géostatistiques. Dans une direction donnée, la forme du semi-variogramme (en fonction de la distance) est comparable avec le modelé du sol. Elle reflète, d'une façon positive, les variations du modelé. De nouveaux indices quantitatifs sont proposés. Ils dérivent du semi-variogramme et caractérisent une rugosité à la fois verticale et latérale.

teurs mesurées sans transformation logarithmique : indice de déviation standard (SE).

Linden et Van Doren (1986) ont proposé deux indices spatiaux qui dérivent de l'étude du variogramme d'ordre 1, (différence d'élévation limite LD, et pente limitative LS).

Des travaux conduits au Burkina Faso ont conduit Guillobez et Zougmore (1991) à préférer l'indice SE, l'évolution de celui-ci sur une même parcelle suit celle de la pluviosité ; mais il ne permet pas une description du modelé de la surface du sol.

La rugosité du sol

Une surface rugueuse présente des aspérités, elle est rude au toucher. Pour Casenave et Valentin (1988), la rugosité est due aux petits accidents de terrain, (naturels, techniques culturaux) susceptibles de diminuer le ruissellement et d'augmenter le stockage superficiel de l'eau.

Les divers paramètres proposés à ce jour pour caractériser la rugosité du sol sont :

- le modelé du sol ;
- la dénivellation du micro-relief ;
- le degré d'obstruction.

Kuipers (1957) a mis au point le profilomètre à aiguille et a proposé comme indice de rugosité cent fois la valeur du logarithme décimal de l'écart-type des mesures (degré de déviation standard). Actuellement, la plupart des auteurs prennent l'écart-type des hau-

Matériel et méthodes

Le profilographe 3D

L'ensemble du système a été mis au point par le Cirad-Sar. Il comprend le profilographe (figure 1) et un ordinateur portable qui pilote les déplacements de la cellule laser et enregistre les données.

La cellule laser se déplace dans un carré d'environ un mètre de côté. Elle est située à environ 70 cm du sol (surface plane).

Le pas de mesure est réglable (4 à 32 mm). Les données sont enregistrées en format Texte.

Le profilographe permet d'étudier une surface de 1x1 m. On peut traiter les valeurs obtenues dans plusieurs directions et calculer pour chaque direction de l'indice SE ; pour ce faire, il faut ramener les mesures à la ligne du sol parallèle à la pente de la direction considérée.

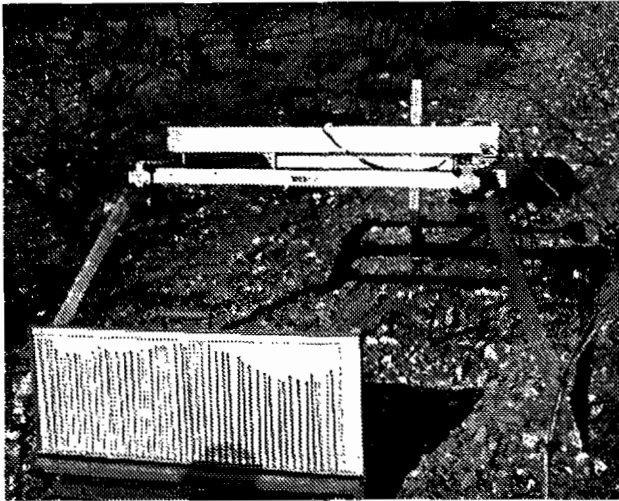


Figure 1. Profilomètre et profilographe LASER. Au premier plan, le profilomètre à aiguille, à l'arrière plan le profilographe LASER. Sol caillouteux en pente entre deux rangées de vigne.

Les principaux états de surface

Les mesures ont été effectuées dans le bassin du Réart (Pyrénées orientales) sur des parcelles cultivées en vigne entre les rangées selon différents types de travail du sol :

- travail du sol récent sans orientation ;
- travail du sol récent avec orientation, modelé en billons ;
- travail du sol ancien avec orientation, modelé en billons moyennement développé ;
- travail du sol très ancien avec orientation, modelé en billons peu développé ;
- absence de travail du sol visible, utilisation d'herbicides, sol battant plus ou moins caillouteux ;
- sol enherbé.

Les rangées de vigne sont établies sur un petit billon.

Variables régionalisées et géostatistique

La géostatistique ou théorie des variables régionalisées (Matheron, 1955 ; Krige, 1966) a été utilisée pour trouver un nouvel indice de rugosité adapté aux mesures effectuées.

Le semi-variogramme montre la dépendance spatiale des données. Selon une direction particulière, les distances Z_i de la cellule laser au sol caractérisent des points au sol de coordonnées X_i, Y_i ; elles sont connues pour tout i . La variance de la différence entre toutes les paires (de points) situées à des intervalles h , est notée :

$$\text{variance}[z_i - z_{i+h}]$$

La semi-variance est la moitié de cette variance :

$$\Gamma_h = 1/2\text{var}[z_i - z_{i+h}]$$

que l'on peut écrire :

$$\Gamma_h = 1/2n_h \cdot \sum [z_i - z_{i+h}]^2$$

n_h = nombre de couples situés à la distance h .

La variation de Γ_h en fonction de h est le semi-variogramme dont la courbe est en général croissante et monotone. Elle peut atteindre un maximum (palier ou seuil). Plus rarement la courbe peut avoir une allure ondulatoire avec maxima et minima (effet de creux). La valeur à l'origine de la courbe quand elle n'est pas nulle est l'effet pépité. Cet effet pépité représente les fluctuations qui intéressent des distances inférieures au pas d'incrémement. La distance h entre l'origine et le début du palier est la portée.

Les indices proposés par Linden et Van Doren (1986) s'inspirent de la géostatistique. Ils sont liés à la moyenne des différences en valeur absolue des dénivellations :

$$\Delta z_h = \sum |z_i - z_{i+h}| / N_h$$

Analyse des données

L'étude géostatistique a été réalisée dans plusieurs directions en fonction de la pente principale et de l'anisotropie. Les directions 0° et 90° ont été le plus souvent utilisées. Le logiciel *VarioWin* (Y. Pannatier, Université de Lausanne, Suisse) a été utilisé pour établir les semi-variogrammes.

Sol battant sans travail du sol

Cette parcelle présente une pente d'environ 6 % selon la première bissectrice des axes. Selon les axes X et Y du cadre de mesure (figures 2a et 2b), les semi-variogrammes présentent une dérive, leur croissance est monotone, sans palier ; en prolongeant visuellement les courbes on constate qu'elles ne passent pas par l'origine il y a un effet de pépité dont la valeur est la même quelle que soit la direction. La courbe (figure 2c) représentative de la direction 150° , pratiquement une ligne de niveau, est une droite plus ou moins parallèle à l'axe des distances.

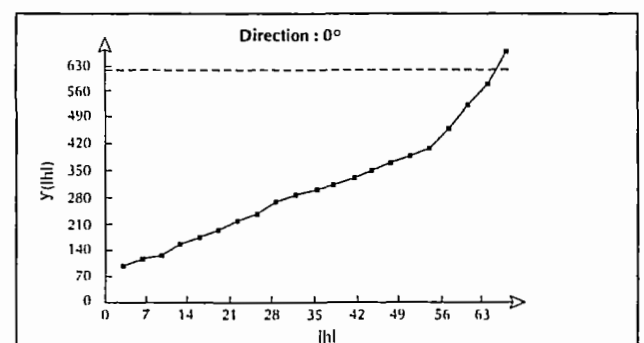


Figure 2a. Semi-variogramme, sol battant sans travail du sol, dans la direction 0° .

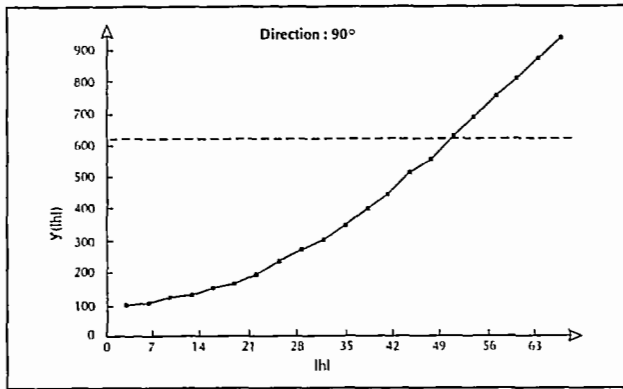


Figure 2b. Semi-variogramme, sol battant sans travail du sol, dans la direction 90°.

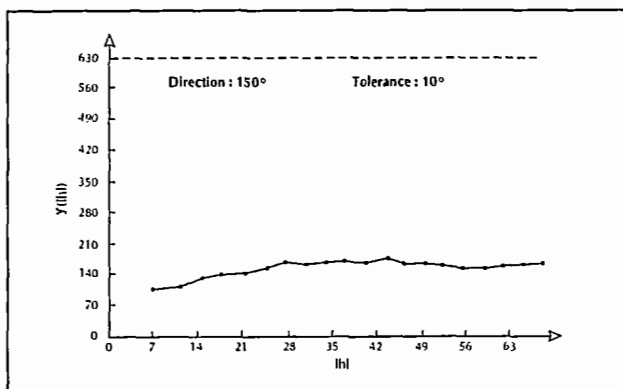


Figure 2c. Semi-variogramme, sol battant sans travail du sol, dans la direction 150°.

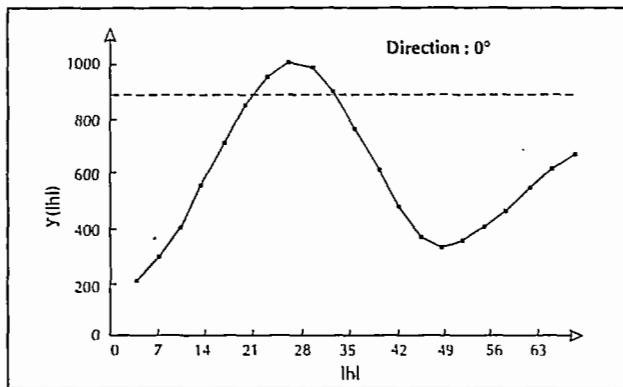


Figure 3a. Semi-variogramme, modelé en bourrelet, direction perpendiculaire au bourrelet.

Bourrelet le long d'une rangée de vigne

Les mesures ont été effectuées sur une rangée de vigne entre deux pieds. Les deux courbes principales ont été représentées. La courbe représentant le transect perpendiculaire au bourrelet (figure 3a) a un maximum ($h = 22$ cm) puis un effet de creux ; La courbe selon la plus grande pente (figure 3b) est croissante et monotone ; l'effet pépité est inférieur à 200. Les deux courbes simulent le modelé du sol.

Travail du sol récent, orienté

Selon l'axe perpendiculaire aux rangées de vigne la courbe (figure 4a) est bimodale, elle présente deux maxima et un effet de creux. La courbe (figure 4b) dont l'axe est parallèle aux rangées de vigne a une forme monotone et croissante. Les deux courbes présentent un effet pépité commun. La forme des courbes comme pour les cas précédents est calquée sur le modelé du sol.

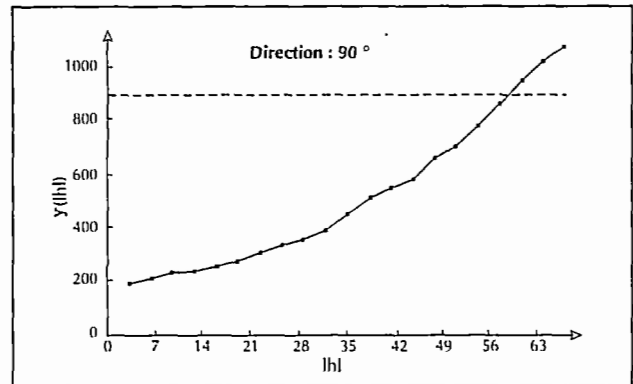


Figure 3b. Semi-variogramme, modelé en bourrelet, direction perpendiculaire au bourrelet.

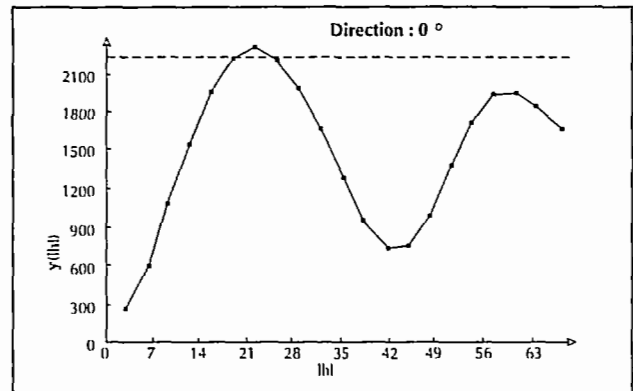


Figure 4a. Semi-variogramme, travail du sol récent, axe perpendiculaire aux rangées de vigne.

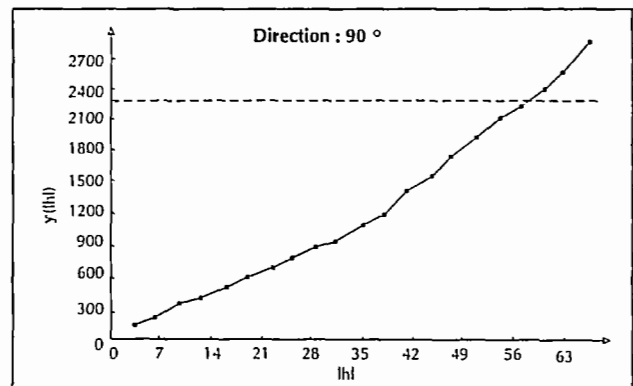


Figure 4b. Semi-variogramme, travail du sol récent, axe parallèle aux rangées de vigne.

Discussion

Semi-variogramme

La forme des courbes des trois parcelles précédentes (semi-variogramme en fonction de la distance) reflète le modelé du sol, dans la même direction. D'autres exemples sur d'autres types de modelé ont confirmé ces résultats. Cette forme est voisine d'une parabole pour un plan incliné, en cloche pour un bourrelet ou une rigole et présentant des ondulations pour des billons. Le semi-variogramme peut être utilisé pour décrire le modelé et estimer la rugosité du sol.

Quand la courbe atteint un maximum (courbe en cloche), le modelé est décrit à la fois par le maximum ou *palier* (Γ_m) qui correspond à la macro-rugosité (d'ordre décimétrique) et par la portée qui représente la dimension latérale (taille). Ces notions de palier et de portée décrivent des rugosités respectivement verticale et horizontale.

L'effet pépité (Γ_0) existe pour la plupart des enregistrements. Il doit être interprété comme une rugosité fine ou micro-rugosité de l'ordre du centimètre qui est due soit aux cailloux soit à la végétation herbacée.

Indices de rugosité régionalisés

Par analogie avec l'indice de déviation standard (se), la racine carrée des valeurs de Γ est proposée comme indice de rugosité.

La micro-rugosité R_0 est la racine carrée de la valeur Γ_0 , elle est déterminée en prolongeant les courbes obtenues dans les quatre directions au voisinage de l'origine. C'est une donnée en général isotrope, liée aux cailloux du sol, à l'enherbement.

La macro-rugosité R_m est la racine carrée de la valeur de Γ_m qui correspond à un palier quand il existe (première bosse dans le cas d'un modelé en billon). Cette donnée est le plus souvent liée à une direction. Dans les champs cultivés, un travail du sol réalisé dans une direction privilégiée construit un modelé anisotrope.

La taille ou portée T_m est la distance de l'origine du semi-variogramme au palier ou au premier sommet. Cette distance permet en général de caractériser la taille latérale de la macro-rugosité.

La méso-rugosité R_m^0 est la différence entre macro et micro rugosité.

Pour la détermination de la rugosité d'un champ dans une direction donnée on retient la macro-rugosité si elle existe (labour, billons), autrement c'est la micro-rugosité qui est prise en considération (cas de sols non travaillés et battants). On appellera R_d cette rugosité.

Ces nouveaux indices sont appelés : indices de rugosité régionalisés

Comparaison à l'indice de déviation standard (se)

Pour les deux directions principales (X et Y), les valeurs des maxima des courbes (le premier maximum dans le cas d'une courbe bimodale) ont été comparées à l'écart-type moyen des différents transects concernés de même direction (cette valeur étant déterminée à partir des altitudes corrigées de l'effet de pente). La figure 5 montre que le maximum du semi-variogramme suit le même sens de variation que l'écart-type. La courbe d'ajustement est une droite.

La liaison entre l'indice de rugosité directionnel R_d et l'écart-type moyen (indice de Kuipers modifié, se) dans la même direction (après correction de la pente) est très significative.

Ces résultats ne sont pas surprenants car la plupart des semi-variogrammes cessent de croître au-delà d'une certaine distance : la portée. Le palier du modèle de transition est a priori la variance de toutes les données (Journel et Huijbregts, 1978). En effet, la relation entre la fonction représentative du semi-variogramme $\Gamma(h)$, la fonction d'autocorrélation $\rho(h)$ et la variance σ^2 est :

$$\Gamma(h) = \sigma^2[1 - \rho(h)]$$

Quand la fonction d'autocorrélation tend vers zéro, $\Gamma(h) = \sigma^2$; cette condition est réalisée quand il y a un palier. Si le modelé du sol ne présente pas de pente, σ est directement l'index se .

Quand il y a un effet pépité, on a en fait des structures emboîtées (gigognes) et Γ_0 est le palier d'un semi-variogramme dont la portée est inférieure au pas de mesure. Dans ce cas le semi-variogramme est inconnu. Le palier est le même dans toutes les directions, il est indépendant de la pente du terrain. La racine carrée de ce palier est l'écart-type. Si la fonc-

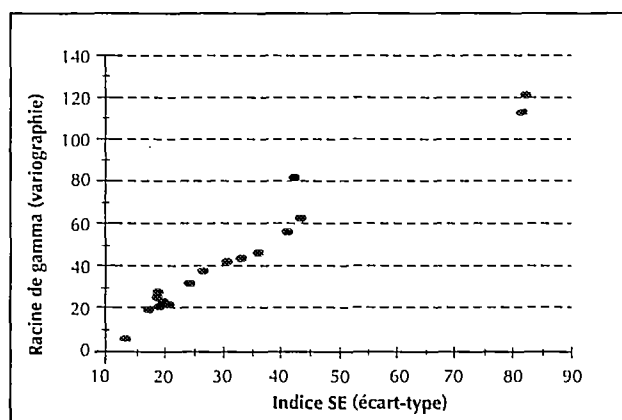


Figure 5. Comparaison à l'indice de déviation standard se .

tion d'autocorrélation est périodique : $\Gamma(h) = \sigma^2[1 - \cos(h)]$, il n'y a pas de palier, mais le premier maximum est égal à σ^2 lorsque $\cos(h) = 0$, ($h = T_m$). Le premier maximum représente le contraste, (la rugosité) entre le sommet et le creux des deux faces des billons présents dans le champ de la mesure.

La racine carrée de Γ_0 ou de Γ_h est un indice de la rugosité du sol ; cet indice est comparable à l'indice σ_ϵ , dérivé de celui établi par Kuipers.

Conclusion

La géostatistique est applicable à toutes les variables géoréférencées y compris les données altimétriques. Au niveau d'une parcelle (pas métrique), cette méthode permet de décrire le modelé et de proposer plusieurs indices d'évaluation de la rugosité du sol :

- une micro-rugosité (pas centimétrique) qui correspond à la présence de cailloux ou d'herbes fines, évaluée par l'effet pépite ;
- une macro-rugosité (pas décimétrique) qui est déterminée par le palier ou la bosse du semi-variogramme quand il y a un seuil ou un maximum.

Si le premier indice est isotrope le second est souvent anisotrope et dépend du travail du sol. Ces deux nouveaux indices sont donc peu différents de l'indice σ_ϵ . Ils sont certes plus difficiles à calculer, mais ils ont l'avantage d'être établis à partir d'un graphique qui représente le modelé du sol. En l'absence de macro-porosité, une seule porosité est déterminée, c'est la micro-porosité (cailloux, micro-mottes). Seule cette

méthode permet de déterminer la micro-rugosité en présence de macro-rugosité. Un troisième indice de rugosité latérale, la portée, est de plus proposé. La portée fournit des indications sur l'extension latérale des mottes et des billons.

Références bibliographiques

CASENAVE A., VALENTIN C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Editions de l'ORSTOM. Paris, 229 p.

GUILLOBEZ S., ZOUGMORE R., 1991. Etude du ruissellement et de ses principaux paramètres, à la parcelle, (Saria, Burkina Faso). in Sem. In. Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Séminaire international, Bamako 9-13 déc. 1991; AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext : 319-329.

JOURNEL A.G., HUIJBREGTS CH.J., 1978. Mining Geostatistics, Academic Press, London, New York, San Francisco, 600 p.

KRIGE D.G., 1966. Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for or evaluation. In Proceedings of the Symposium on Mathematics Statistics and Computer Applications in One Valuation, Johannesburg. Journal of the South African Institution of Mining and Metallurgy, 66 : 13-38.

KUIPERS, H. 1957. A reliefmeter for soil cultivation studies. Neth. J. Agric. Sci., 5 : 255-262.

LINDEN D.R., D.M. VAN DOREN Jr., 1986. Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. Soil. Sci. Soc. Am. J., 50 : 1560-1565.

MATHERON G., 1955. Application des Méthodes statistiques à l'estimation des gisements. Annales des Mines, déc., 50-75.

MATHERON G., 1965. Les variables régionalisées et leur estimation. Masson, Paris. 305 p.

THÈME 3

Les effets des itinéraires techniques sur l'évolution du profil cultural

Traficabilité et gestion des opérations mécanisées : études expérimentales, modèles et formes d'aide à la décision en culture de canne à sucre

Sylvain PERRET

Cirad-Sar, 73 rue J. F. Breton, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

Résumé : Dans les conditions tropicales humides de la culture mécanisée de canne à sucre à la Réunion, la traficabilité du sol est déterminante au moment de la récolte annuelle, caractérisée par le passage d'engins lourds et par des problèmes de compaction. Dans un premier temps, on examine la traficabilité sous l'angle de la sensibilité au tassement. Un seuil de teneur en eau critique (38g. cm^{-3}) est mis en évidence par le test Proctor modifié, correspondant aux conditions de culture (140kj. m^{-3}). Les performances d'un tracteur au labour sont mesurées au champ, selon différentes conditions de teneur en eau initiale dans la couche superficielle. On définit ainsi une teneur en eau critique, identique à la précédente, déterminante sur les états structuraux résultants, et sur le fonctionnement de la cellule motrice. Ce seuil semble déterminer à la fois la traficabilité, au sens restreint de la sensibilité au tassement du sol, et l'aptitude au labour, au sens de l'efficacité d'intervention des matériels. Dans un second temps, un modèle d'évolution climatique de la teneur en eau dans la couche superficielle (0-20 cm) est élaboré. Il est calibré lors d'expérimentations et prend en compte des caractéristiques culturales de la canne à sucre. A partir du seuil de teneur en eau critique déterminé, le modèle peut constituer un outil d'aide à la décision (i) en temps réel sur des données climatiques récentes, (ii) prospectif, sur des scénarios virtuels, (iii) ou pour la planification annuelle, à partir d'analyse fréquentielle de l'occurrence de jours traficables.

dégradation du sol (compaction, dégradation des structures) et de dysfonctionnement du matériel (patinage, enfoncement des roues, déperdition énergétique). Les jours praticables « *field work-days* » des anglophones ; Rounsevell et Jones, 1993 ; Simalenga et Have, 1994 ; désignent les jours où les conditions édaphiques et météorologiques permettent la circulation et le travail des machines sur les parcelles *i.e.*, les parcelles sont traficables et/ou aptes au labour.

Dans les conditions tropicales humides de la culture mécanisée de canne à sucre à la Réunion, la traficabilité du sol est déterminante au moment de la récolte annuelle, caractérisée par le passage d'engins lourds (Siegmund *et al.*, 1989). L'aptitude au labour intéresse les opérations moins fréquentes (5 à 8 ans) de replantation et les travaux du sol qui y sont associés.

Ces travaux sont conduits essentiellement en prestation de service chez les petits producteurs, ou de façon autonome dans les grandes plantations. Dans les deux cas, les problèmes de planification des chantiers de récolte sont prédominants puisque cette opération est soumise (i) à des contraintes de calendrier (période d'ouverture des usines, délais maximum de transferts champs-usine, cycle cultural annuel de la canne en repousse), (ii) à des contraintes d'organisation (quotas de livraison attribués aux planteurs), et (iii) à des aléas (feux de parcelles, pannes, météorologie...).

Les producteurs évoquent les risques de dégradation du sol sous récolte mécanisée, et les baisses de rendement qui peuvent en découler par trituration / écrasement des souches et tassement du sol. Certains planteurs se sont équipés d'outils de décompactage, qu'ils passent systématiquement entre les rangs après

Introduction

Position du problème

Les notions de traficabilité et d'aptitude au labour « *workability* » des anglophones expriment respectivement la capacité d'un sol à supporter le passage d'engins et à être travaillé correctement, *i.e.* à atteindre un état structural attendu et satisfaisant (Rounsevell, 1993). Elles supposent l'absence de

chaque récolte. D'une manière générale, Torres et Rodriguez (1996) soulignent l'importance du compactage lié aux passages d'engins en conditions humides en culture de canne à sucre.

Problématique et hypothèses

Par rapport au compactage, deux types de questions se posent aux opérateurs :

- quel risque sera pris, que sera le résultat probable de l'intervention réalisée à une période donnée et comment et quand remédier aux éventuels problèmes de tassement (décompactage après récolte) ;
- de façon complémentaire, dans un objectif de planification, quelle est la période, ou les jours probablement les plus adaptés à l'intervention dans une zone donnée ?

La finalité de la démarche est d'apporter des informations aux opérateurs, sous la forme d'une aide à la planification des opérations de récolte, de décompactage post-récolte, et de travail du sol. Nous proposons (i) d'évaluer les risques associés à certaines condi-

tions initiales, et (ii) d'établir un modèle d'évolution de ces risques.

La combinaison de ces deux types d'information apparaît essentielle, car la seule définition de jours praticables n'a pas toujours de sens pour l'opérateur (exploitant ou prestataire de service). Celui-ci doit souvent travailler de toute façon à une période donnée, contraint par un calendrier cultural, des engagements prévus sur d'autres exploitations, des concurrences entre activités, le partage du matériel sur un territoire... (Nezet, 1995). Il apparaît donc indispensable de pouvoir évaluer la qualité probable des travaux et les risques encourus en conditions peu favorables.

Le domaine de l'étude intéresse une zone d'environ 1 200 ha, sur laquelle la récolte mécanique représente plus de 50 % des surfaces récoltées, en raison des faibles pentes, de la pierrosité limitée et de la taille des parcelles (le ratio coupe mécanique-coupe manuelle est de 11 % sur l'ensemble de la surface en canne de l'île). Le sol est un sol brun ferrallitique faiblement désaturé, soumis à un climat tropical humide (1 500 à 1 800 mm par an) (Raunet, 1991). La figure 1 représente le domaine géographique de validité des résultats obtenus.

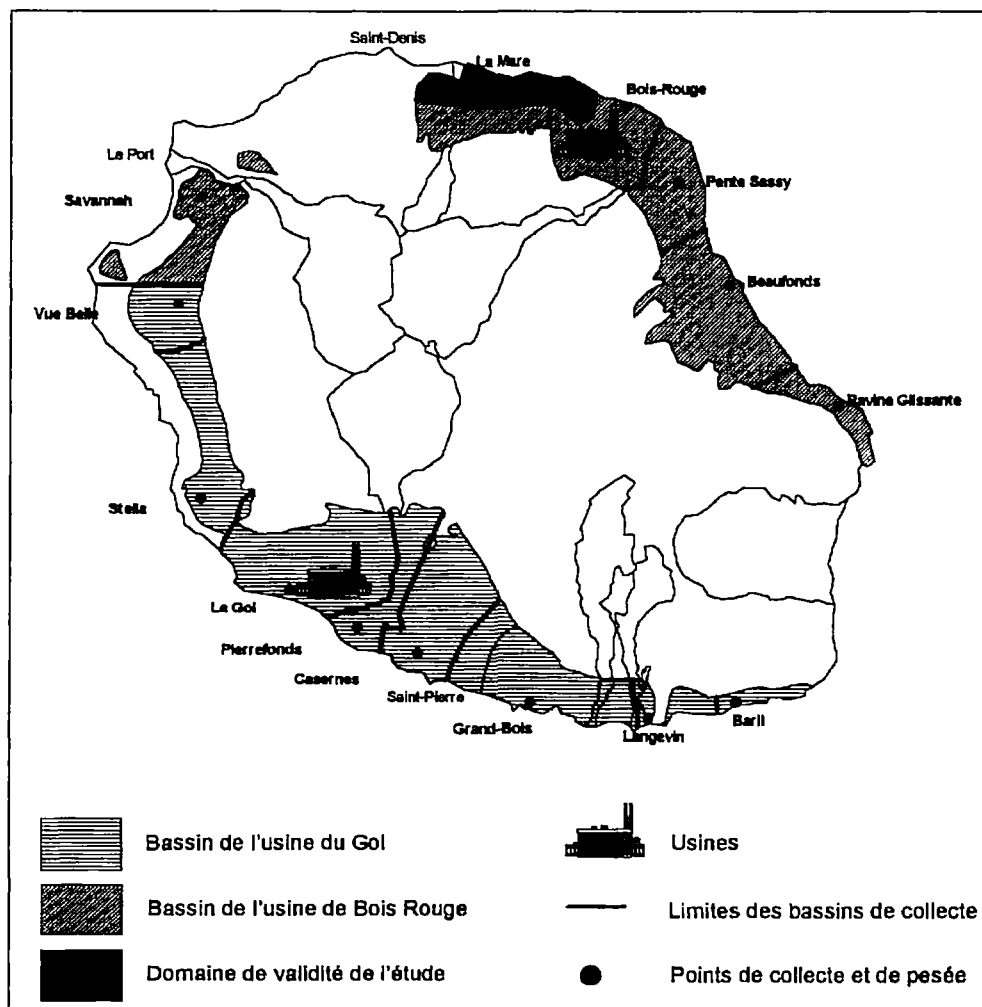


Figure 1. Bassins canniers et usines à la Réunion en 1996 ; zone d'étude : 1 200 ha sur sol brun ferrallitique faiblement désaturé ; pluviométrie : 1 500-1 800 mm.

Notions de traficabilité et de jours praticables : revue bibliographique

La traficabilité et l'aptitude au labour d'un sol sont déterminées par la cohérence mécanique (soil strength des anglophones), qui résulte de forces interactives entre particules de la matrice du sol : la cohésion et la friction. La cohérence du sol peut être évaluée directement au champ par pénétrométrie à cône (Collas, 1987 ; Godwin *et al.*, 1991). Des relations existent également entre cohérence et succion matricielle, mesurée au champ par tensiométrie (Earl, 1996). Une évaluation immédiate de la traficabilité est possible par ces deux variables. Cependant, aucune de ces solutions ne permet la formulation d'un conseil prévisionnel en terme de calendrier cultural.

L'état hydrique, principal déterminant de la cohésion d'un sol donné (Godwin et Spoor, 1977), peut s'exprimer sous forme de teneur en eau. Dépendante du climat, la teneur en eau dans les couches superficielles du sol influence fortement les conditions de réalisation des opérations mécanisées. Elle constitue en effet le principal facteur de patinage des engins (Rounsevell, 1993), d'évolution du sol après travail (Papy, 1987 ; Braunack et McPhee, 1991), mais aussi de décision d'intervention pour les opérateurs (Reboul, 1982).

Des modèles bioclimatiques de l'évolution de l'état hydrique ont été élaborés dans différentes conditions et permettent d'estimer les jours praticables à partir de données météorologiques historiques (Reboul, 1982 ; Oskoui, 1988 ; Rounsevell et Jones, 1993 ; Simalenga et Have, 1994). On notera toutefois que les seuils retenus dans ces modèles font référence empiriquement soit à la capacité au champ ou à la limite de plasticité, soit à des perceptions d'experts. De plus, ils ne font explicitement référence ni au risque de dégradation physique encouru, ni au fonctionnement du matériel.

D'une manière générale, l'usage des modèles de bilan hydrique nécessite des données expérimentales déterminant des seuils critiques. Rounsevell (1993) évoque la nécessité de travaux complémentaires sur le rôle combiné du sol et du climat sur la traficabilité. Il convient en même temps d'accepter le caractère localisé des données obtenues, relatives à des conditions agricoles, pédologiques et climatiques données.

Dans la première partie de ce travail, l'objectif est de définir précisément les relations entre état hydrique du sol, traficabilité (risque de compactage) et aptitude au labour (état structural résultant) dans une situation donnée. En combinant des tests de laboratoire et des essais au champ, on cherche à valider une méthode simple et facilement reproductible pour définir les seuils critiques.

Teneurs en eau critiques et performances des matériels agricoles

Matériels et méthodes

L'appareillage métrologique embarqué

Les recherches pratiques sur les performances des tracteurs et des équipements en conditions réelles nécessitent un équipement portable. De nombreuses études ont été menées sur le sujet durant les années 80, et passées en revue par Mc Laughlin *et al.* (1993).

Les mesures au champ des performances des équipements de travail du sol sont à présent possibles par l'utilisation de capteurs peu coûteux et performants, issus de l'industrie, et associés à une centrale d'acquisition d'utilisation aisée (Pilot et Vaitilingom, 1987 ; Smith, 1990 ; Glancey et Upadhyaya, 1995). Une chaîne d'acquisition embarquable et modulable a ainsi été développée par le Cirad (Pilot, 1992 ; Perret *et al.*, 1994b).

Ce matériel permet de mesurer les paramètres caractéristiques d'intervention des tracteurs et de leur équipement associés ; par exemple, la consommation de carburant, la vitesse de rotation du moteur, la vitesse réelle de déplacement, la profondeur de travail, la pente, l'effort de traction. La combinaison de certains paramètres avec les caractéristiques spécifiques au tracteur conduit à d'autres paramètres tels que le glissement et la puissance à la prise de force (Pto). L'horloge interne de la centrale d'acquisition permet de calculer aisément les temps de travaux. De tels équipements offrent des possibilités nouvelles dans l'étude des performances des matériels en conditions réelles (Smith, 1993 ; Perret *et al.*, 1994a ; Perfect *et al.*, 1997).

Les mesures sur le sol et l'analyse des données sol-machine

Il est apparu intéressant d'associer ces mesures de performances avec certaines caractéristiques du sol au moment du travail. L'état du sol constitue en effet la principale cause de variation de ces performances au cours d'un chantier. Celles-ci peuvent alors être très différentes des références fournies par les constructeurs, obtenues sur banc ou en conditions standard.

L'objectif des expérimentations engagées était de cerner les relations entre certaines caractéristiques de fonctionnement du matériel au labour et la teneur en eau du sol au moment du travail.

Pour associer des données relatives au fonctionnement du matériel, et des données relatives au sol, il

faut convenir d'espaces élémentaires dans le champ travaillé, qui constitueront les mailles de base, auquel il est possible d'attribuer ces données.

Ainsi, chaque passage de charrue est découpé en segments virtuels, rectangulaire — appelés blocs —, dont la longueur dépend de la vitesse de déplacement et du temps de scrutation de la centrale d'acquisition. La largeur de ces blocs est la largeur de travail.

La démarche consiste à attribuer à ces blocs des variables caractérisant le sol au moment du travail. Or, on ne peut connaître à priori ni leur position dans la parcelle, ni leur taille avant la réalisation du chantier. Il faut donc adopter une méthode qui permette d'attribuer, à posteriori, à tout point ou à toute surface de la parcelle (les blocs) des données liées au sol, obtenues à partir d'un échantillonnage initial.

Un maillage régulier a donc été construit (2 m x 2 m), sur lequel ont été mesurées les teneurs en eau avant labour. Ces mesures ont été effectuées avec une sonde mixte gamma-neutrons (Campbell pacific nuclear 1501B), dans la souche 0-15 cm de profondeur. De la même façon, les mesures de masses volumiques sèches et humides ont été relevées. Enfin, l'utilisation d'un pénétromètre à cône à chaque nœud du maillage a permis de mesurer la résistance à la pénétration (cône index, surface du cône utilisé : 2 cm²).

La méthode retenue est l'interpolation géostatistique par krigeage, pouvant être utilisée pour les propriétés du sol (Burgess et Webster, 1980a). C'est une forme de moyenne locale pondérée. Il est optimal dans le sens où il donne des estimations de valeurs en des points non relevés, en prenant en compte la variabilité spatiale du paramètre sur l'ensemble du dispositif. Par rapport à d'autres méthodes, il est non biaisé, il permet l'estimation de l'erreur d'interpolation, en minimisant cette erreur (variance minimum). Le logiciel Geo-Eas, développé par United States environmental protection agency, a été utilisé (Englund et Spark, 1991).

Le krigeage par point a permis de dresser une carte isovaleur de la teneur en eau superficielle. En utilisant le krigeage par bloc (Burgess et Webster, 1980b), il a été possible d'attribuer à chaque bloc une valeur de teneur en eau lors de l'expérimentation.

La parcelle expérimentale à labourer couvre 2 000 m², la zone d'étude cartographiée grâce au maillage initial puis labourée couvre 450 m² (45 m x 10 m). De façon pratique, la moitié de la parcelle a été irriguée pendant les deux jours précédant l'essai (maximum 30 mm dans la zone la plus arrosée), de façon à créer des conditions contrastées en teneur en eau. Les mesures de teneur en eau ont été effectuées quelques heures avant l'essai (mesures 6 à 8 heures

avant la réalisation du labour, selon la position des blocs).

Le labour a été réalisé avec un tracteur Massey Ferguson 294 à 4 roues motrices, de 2 850 kg (dont 60 % sur les roues arrière), et une charrue Huard bisoc réversible, à versoirs hélicoïdaux de 14 pouces. Ce travail a été réalisé sous contrôle d'effort, des zones sèches vers les zones humides. Les versoirs ont été nettoyés avant chaque passage.

Enfin, quatre fosses ont été creusées après la réalisation des chantiers, dans des zones d'états hydriques initiaux différents. Les états structuraux obtenus dans la couche labourée ont été décrits.

Le test de sensibilité au tassement

Cette manipulation vise à étudier au laboratoire l'influence de l'énergie de compactage et de la teneur en eau initiale du matériau θ sur sa masse volumique apparente sèche γ_d (*bulk density*). C'est, parfois appelé test Proctor, était initialement utilisé par le génie civil et routier américain (*American society for testing and materials*, 1979, cité par Bradford et Gupta, 1986). Il met en œuvre des énergies élevées (entre 530 et 2 710 kJ/m³).

Les couples θ/γ_d obtenus permettent d'établir une courbe caractéristique de la sensibilité au compactage d'un matériau pour une énergie donnée (figure 2). L'adaptation de ce test à des sols et à des énergies agricoles est assez récente (Faure et Fiès, 1972). Le moule Proctor original de 950 cm³ est généralement conservé, mais la gamme de teneur en eau est étendue et l'énergie utilisée est réduite.

Si l'on peut proposer des plages de consistance liées à l'énergie de compactage développée, il devient très pertinent de définir les énergies mises en jeu par différentes machines ou niveaux de mécanisation.

Siegmund (1982) a mesuré *in-situ* des couples θ/γ_d obtenus sous chantier de récolte de canne à sucre intégralement mécanisée à la Réunion. Un calage graphique avec des courbes de sensibilité au compactage établies en laboratoire a permis de déterminer expérimentalement l'énergie de compactage mise en jeu au champ : 140 kJ/m³, soit un compactage réalisé en 3 couches, dans le moule, avec une dame de 1 105 g, tombant de 18,6 cm en 22 coups par couches. Compte tenu du niveau de mécanisation agricole atteint à la Réunion, cette énergie représente virtuellement le risque maximum de compactage possible. de plus, elle correspond à une énergie de 100 kWh.ha⁻¹ pour un travail réalisé à 25 cm, avec un tracteur de 2 850 kg et 6 kW de puissance moteur. C'est le niveau d'énergie qui sera mis en œuvre lors des tests de compactage réalisés sur nos échantillons.

Résultats : mise en évidence de teneurs en eau critiques

Sensibilité au tassement et rétention de l'eau

Les résultats des tests sont relatés en figure 2. Aux faibles teneurs en eau θ le matériau est peu sensible aux effets du compactage : la masse volumique apparente sèche n'augmente pas en fonction de l'augmentation d'humidité initiale (elle diminue même en présence d'argiles gonflantes). A partir de 35 % de teneur en eau, le matériau se déforme, sa porosité diminue sous la contrainte appliquée, la masse volumique apparente γ_d sèche augmente jusqu'à un maximum, correspondant à une teneur en eau optimale. Faure (1978) considère que le matériau est à la consistance plastique dans cette plage de teneur en eau.

Au-delà, on se trouve en présence d'un fluide incompressible (boue biphasee, consistance liquide), la masse volumique décroît en fonction de la quantité d'eau introduite, la courbe devient tangente asymptotiquement à une droite d'équation :

$$\gamma_d = (1 - \theta) * \gamma_s$$

γ_s étant la densité de la phase solide (2,7)

θ étant la teneur en eau volumique ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Cette droite délimite la saturation en eau, elle coupe l'axe des ordonnées à la volumique du solide ($\gamma_d = \gamma_s$), étant représentant le matériau hypothétiquement monophasé (porosité nulle).

Le sol dépasse la densité de 1,2 à partir de 38 %. Cette densité est celle habituellement mesurée au champ dans des systèmes faiblement motorisés, *i.e.* sans compaction. La compaction maximale est atteinte au-delà de 45 %, pour une densité de 1,32. La teneur en eau à la capacité au champ (évaluée sous pression d'air à 6,3 kPa, soit pF1.8) est de 41 % dans des mottes de densité 1,2. La teneur en eau à saturation est de 48 % dans des mottes de densité 1,2. On constate que ces teneurs en eau caractéristiques sont cohérentes avec celles observées sur les éprouvettes Proctor, en terme de couple densité/humidité.

Performances des matériels et teneur en eau initiale

Compte tenu de la gamme de variation des teneurs en eau obtenues sur le terrain et des seuils mis en évi-

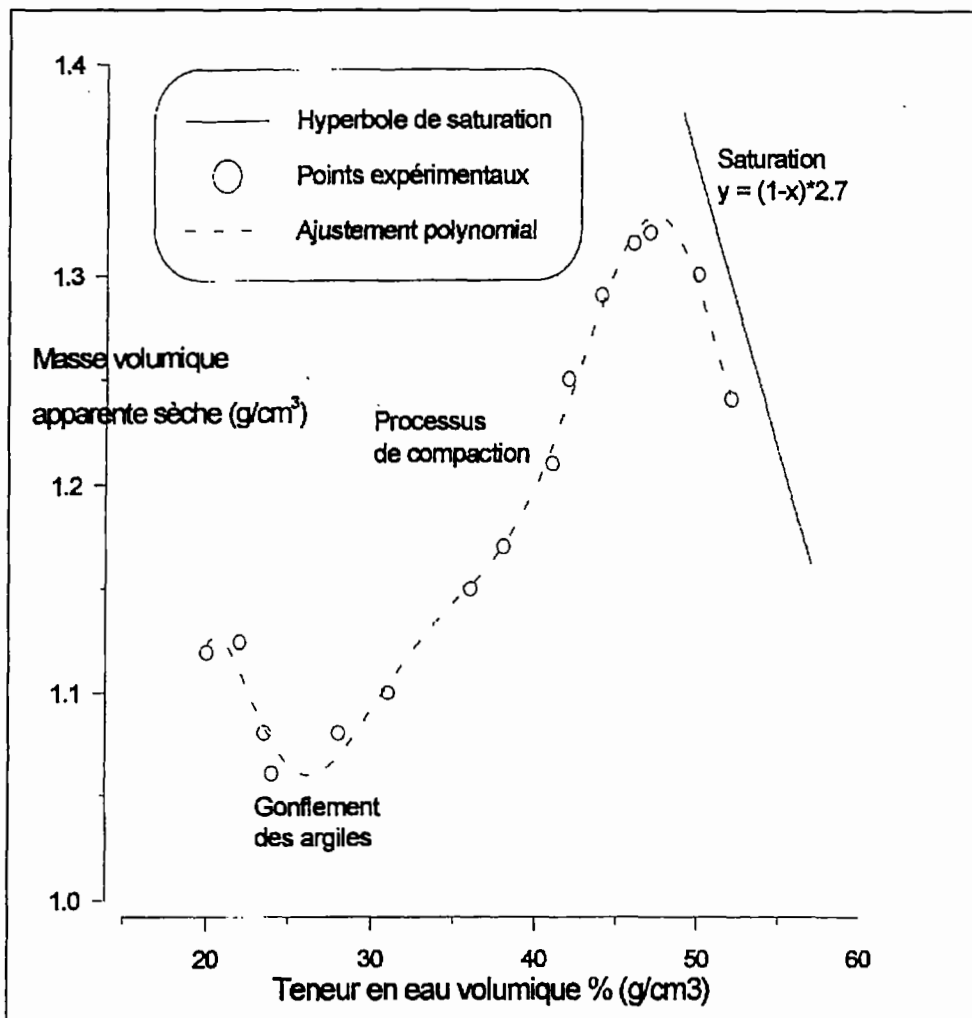


Figure 2. Test de sensibilité au compactage dynamique (Proctor modifié) sous contrainte dynamique de $140 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$.

dence, les données relative aux blocs labourés ont été classées par teneur en eau et évoquées au tableau I.

Ces résultats sont cohérents avec le mode de travail en contrôle d'effort automatique : pour maintenir l'effort à la barre constant, l'action du relevage automatique a occasionné un travail moins profond lorsque le sol était plus sec et plus cohérent. Au contraire, la profondeur travaillée a été plus importante lorsque le sol était plus humide.

On observe que la dépense énergétique globale a tendance à diminuer avec l'augmentation de la teneur en eau du sol, puis elle augmente à nouveau au-delà de 40 % en raison des pertes dues au glissement. Les différences de consommation entre classes de teneur en eau ne sont toutefois pas significatives en raison de la grande variabilité des données obtenues (capteur fuel-pet peu précis dans la gamme de consommation).

En termes de traficabilité, le glissement est limité jusqu'aux teneurs en eau inférieures à 40 %, puis augmente de façon significative. Ce processus est cohérent avec les données obtenues en laboratoire avec les tests de compactage dynamique.

Etats résultant du sol et teneur en eau initiale

Après travail, l'observation des fosses indique des états structuraux différents. Dans les zones à teneurs en eau inférieure à 30 %, les mottes préexistantes ne sont pas émiettées mais brisées en mottes plus petites, le travail a engendré peu de terre fine. Aux teneurs en eau comprise entre 30 et 40 %, le travail a été plus efficace. Le

retournement est bien réalisé, seules quelques mottes tassées décimétriques préexistantes subsistent, la couche travaillée est constituée d'un mélange de terre fine et de petites mottes. Dans les zones à teneurs en eau supérieures à 40 %, le retournement s'est mal réalisé, notamment en raison du collage de la terre au versoir. On observe par endroit des figures de tassement et de lissage dans le profil (terre comprimée par le versoir ou par les pneumatiques en surface, passage de pneumatiques en fond d'enrayure).

Discussion

Le tableau II propose une synthèse des résultats. Ils soulignent le caractère relatif de la notion de performance des matériels. Les conditions initiales influencent nettement ces performances et sans doute les coûts qui en peuvent en découler, mais aussi les produits des travaux réalisés. Dans la situation étudiée, on met en évidence une plage de teneur en eau plus favorable au passage d'engins, en terme de traficabilité et d'aptitude au labour. Les risques les plus importants apparaissent au-delà de 40 %. Le compactage devient significatif au-delà de 38 %. C'est le seuil de traficabilité qui est retenu. Cette valeur est cohérente avec celles habituellement utilisées, situées entre 90 % et 95 % de la capacité au champ (Rounsevell, 1993 ; Simalenga et Have, 1994). On peut ajouter qu'en dessous de 30 %, l'aptitude au labour est atténuée si l'on considère les structures résultantes motteuses et la dépense énergétique plus forte (forte résistance à la pénétration).

Tableau I. Performances moyennes obtenues par classes de teneur en eau superficielle (tracteur MF 292, 4 RM, charrue bisoc réversible 14 pouces).

Teneur en eau	Cone index MPa	Régime moteur (rpm)	Vitesse réelle (m.s ⁻¹)	Consommation (l.h ⁻¹)	Glissement %	Profondeur de travail (cm)	Puissance à la barre (kW)
25-29 %	7.3 ^a	2042 ^a	0.65 ^a	6.7 ^a	7.6 ^a	24.7 ^a	7.8 ^a
30-34 %	6.2 ^{ab}	1911 ^{bc}	0.60 ^b	6.5 ^a	8.8 ^a	28 ^a	7.7 ^a
35-40 %	5.7 ^{bc}	1964 ^{bc}	0.63 ^{ab}	6.5 ^a	8.7 ^a	26.7 ^a	8.2 ^a
40-45 %	4.6 ^c	1897 ^{bc}	0.60 ^{ab}	7.0 ^a	15.5 ^b	29.6 ^a	7.8 ^a

Des lettres différentes attribuées en exposant aux chiffres indiquent une différence significative à P < 0,01 (Test student bilatéral).

Tableau II. Relations entre état hydrique initial, propriétés du sol, performances et états résultants.

Etat initial	Teneur en eau superficielle	< 35 %.	35-40 %.	> 40 %.
	Résistance à la pénétration	forte	modérée	faible
Etat résultant	Risque de compaction Structures	nul	modéré	fort
		persistence de mottes compactes, peu de terre fine	mottes centimétriques et terre fine	mottes collantes et mal retournées, zones compactées
Performances	Glissement	faible	faible	fort
	Dépense énergétique globale	forte	modérée	forte

Cette convergence des résultats permet d'envisager l'extension de la démarche vers d'autres situations pédo-climatiques sans avoir recours aux expérimentations lourdes qui ont été conduites ici. En effet, il apparaît que la combinaison de test de sensibilité à la compaction et de déterminations de teneurs en eau caractéristiques peut suffire à déterminer une teneur en eau critique pour l'intervention des matériels. Ces différentes valeurs vont être retenues pour construire les modèles de prédiction des jours traficables.

Modélisation et élaboration d'un conseil

Justification, domaine de validité du conseil

Les opérateurs n'ont souvent accès à la variable « teneur en eau » que de façon empirique, en mobilisant une expertise personnelle et des indicateurs visuels (état et couleur du sol en surface, climatologie récente...). Pour valoriser les résultats obtenus, c'est-à-dire compléter le système d'information dont disposent les opérateurs et répondre aux questions posées, il s'agit d'estimer la teneur en eau probable sur une période à venir (prévoir les risques) et/ou proposer un calendrier probabilisé associant un niveau de risque à une période.

Pour cela, il faut appréhender (i) l'évolution de la teneur en eau superficielle en fonction du climat par la modélisation du bilan hydrique, puis (ii) l'analyse des jours ou périodes traficables.

On notera que la démarche se focalise sur la détermination de jours agronomiquement traficables. Comme évoqué plus haut, cette information n'est opératoire, sur le calendrier de l'exploitation ou du parc de matériel, qu'une fois combinée avec les autres composantes des systèmes d'information et de décision de l'entreprise.

Le modèle de bilan hydrique

Principes et limites

La démarche consiste en l'élaboration d'un modèle bioclimatique de bilan hydrique quotidien, appliqué sur les couches superficielles et en relation avec les seuils mis en évidence plus haut. Maraux (1994) évoque l'intérêt comparé des modèles fonctionnels les plus couramment cités par la littérature. Celui qui est construit ici est parmi les plus simples car seules la couche supérieure du sol est prise en compte, considérée comme uniforme. Il s'agit d'un réservoir qui se remplit avec les pluies, qui déborde à satura-

tion, qui se vide par drainage rapide entre la saturation et la capacité au champ ; par évapotranspiration seule entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Enfin, la validité du modèle est restreinte à la canne à sucre, en tant que système extracteur d'eau et couvert évaporant.

Les précipitations P et le rayonnement solaire global R_g quotidiens sont fournis par une station météorologique automatique. L'évapotranspiration potentielle E_{tp} -Penman est calculée à partir du rayonnement global selon un ajustement validé localement (Génére, 1990). L'évapotranspiration réelle E_{tr} est évaluée à partir de E_{tp} et en fonction de l'enracinement, de l'état du couvert aérien (Indice foliaire, converti en coefficient cultural K_c ; Martiné, 1996) et de l'état hydrique du sol (Vaksman, 1986).

On cherche à estimer quotidiennement le stock moyen sur 20 cm, S_j mm, en début de journée j , à 7 h 00, *i.e.* heure théorique de début de chantier. Cette estimation est régionalisée, relative à des conditions agro-pédo-climatiques données (une station météorologique, une micro-région de culture et de collecte de canne, un type de sol, soit environ 1 200 ha dans la situation étudiée, voir figure 1).

L'hypothèse majeure préalable à ce modèle est la suivante : la couche 0-20 cm est considérée comme indépendante et objet unique d'interactions avec les opérations mécanisées. On néglige en effet les interactions possibles entre couches plus profondes, fonctionnement hydrique superficiel, et fonctionnement du matériel.

A l'échelle de la prévision journalière, les problèmes de calage sont de deux ordres (Rounsevell, 1993). Tout d'abord, la contribution des processus bioclimatiques est considérée comme chronologique durant le jour météorologique (7 h-7 h) pour faciliter le calcul. Considérant toutefois que la pluie peut être répartie sur l'ensemble des 24 h, alors que l'évapotranspiration concerne essentiellement les heures à fort ensoleillement (10 h-17 h), on propose la répartition suivante : $1/2 P$ et processus associés éventuels (ruissellement et drainage) ; évapotranspiration, puis $1/2 P$ et processus associés éventuels. Sous fortes précipitations, ce principe permet à la fois d'étaler pluies et processus associés et de ne pas atténuer le stock sous l'effet de la demande climatique.

Le deuxième problème est la dynamique hydrique entre la saturation et la capacité au champ, *i.e.* le drainage dans la couche superficielle qui détermine le retour à la traficabilité. Ce point nécessite une instrumentation et des références spécifiques par type de sol pour caler le modèle.

Etablissement du modèle

Les données de base du modèle ont été obtenues soit en laboratoire (rétention d'eau dans des mottes sous

pression d'air -pF-), soit au champ par humidimétrie Tdr. La teneur en eau critique représente la limite de disponibilité totale (Réserve facilement utilisable) de l'eau du sol par la plante, soit 2/3 de la réserve utile (Cc-Pfp) (Hillel, 1975).

Rappelons que le seuil de traficabilité retenu se situe à un stock de 76 mm (0,38 cm⁻³. cm⁻³ sur 20 cm). Les risques maximum de dégradation et de tassement interviennent au-delà de 80 mm.

Le texte qui suit pose les principes de calcul du modèle. les hypothèses et les différents paramètres retenus ont été ajustés lors de phase de calage décrites par la suite.

ALGORITHME GÉNÉRAL

S_j est la teneur en eau moyenne sur 20 cm (stock) au jour j à 7 h 00.

$$S_j \text{ mm} = \theta \text{ cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3} * 200 \text{ mm}$$

Pour calculer S_j, l'algorithme considère de façon chronologique :

$$S_j = S_{j-1} + (1/2 P_j - 1 - (R + D)) - E_{trj} - 1 + (1/2 P_j - 1 - (R + D))$$

S_{j-1} mm, teneur en eau au jour j - 1 à 7 h 00.

CALCULS RELATIFS AUX APPORTS D'EAU

P_{j-1} mm, précipitations en j - 1 (7 h 00 à 7 h 00)

R mm, ruissellement associé aux précipitations P, si P > 20 mm :

si P < 20, alors R = 0 ; sinon, R = 0,3*(P - 20) (Perret, 1993)

D mm, drainage associé aux précipitations P, chaque fois que le stock dépasse la capacité au champ, i.e. 82 mm.

si S_{j-1} + (1/2 P_j - 1 - R_j - 1) > 82 mm, S_j - 1 = 82 mm (alors 1/2 p_j - 1)

sinon, pas de drainage.

CALCULS RELATIFS À LA DEMANDE ÉVAPORATIVE

E_{tp} Evapo-Transpiration Potentielle en j - 1, son expression effective E_{tr} (E_t réelle), liée à l'état du couvert végétal (indice foliaire et coefficient cultural K_c), lié à l'extraction racinaire dans la couche considérée (coefficient d'extraction K_z, 0-20 cm) et lié à l'état hydrique du sol (coefficient de disponibilité en eau K_w).

$$E_{tr} = E_{tp} * K_c * K_w * K_z$$

K_c est estimé d'après Fauconnier (1991), adapté aux conditions locales et à la dynamique du couvert végétal (Indice foliaire) déterminé à partir de sommes de températures moyennes journalières (Martinié, 1996). K_c augmente à partir de la date de coupe (récolte), plus 10 jours. K_c est alors égal à 0,3, et atteint un maximum de 1,2 après un nombre de jours N₁ qui dépend de la somme des températures journalières. On modélise ainsi l'accroissement de K_c en relation avec la date de coupe dh. Celle ci est

exprimée comme le nombre de jours N₂ séparant dh et le début de campagne (1^{er} juillet). La validité du modèle couvre la durée hypothétique de la campagne (1^{er} juillet-31 décembre).

$$N_1 = -0,275251 * N_2 + 140,409$$

K_c évolue de la façon suivante, par jour n (nombre de jour après coupe) :

si n est compris entre N₂ et [N₂ + 10], K_c = 0,3

si n est compris entre [N₂+11]

et [N₂ + (N₁-N₂-11)/2], K_c s'accroît de 0,3 à 0,6

si n est compris entre [N₂ + (N₁-N₂-11)/2]

et N₁, K_c s'accroît de 0,6 à 1,2

K_w est évalué ainsi : on suppose que la fourniture d'eau par le sol n'est pas limitante entre la capacité au champ C_c et les deux tiers de la réserve utile R_u (soit la réserve facilement utilisable R_{fu}). A partir de ce point, on considère une atténuation linéaire de K_w jusqu'à une valeur nulle au Point de flétrissement permanent (P_{fp}) (Vaksman, 1986).

$$R_{fu} = C_c - 2/3 * (C_c - P_{fp}),$$

ainsi, quand S > R_{fu} alors K_w = 1;

quand S < R_{fu}, alors K_w = 0,0714*S - 2,857

On considère qu'une partie importante de l'enracinement fonctionnel en tant que capteur d'eau de la canne se situe dans la couche superficielle (0-20 cm). K_z a été estimé expérimentalement à 0,5.

Résultats

Calage et fonctionnement du modèle

L'intérêt du modèle réside dans son aptitude à estimer correctement des teneurs en eau superficielles sur de longues séries. Un exemple de simulation sur un mois est fourni en figure 3 sur l'hypothèse d'une parcelle récoltée début décembre. L'utilisation d'un humidimètre par réflectométrie temporelle facilite le calage du modèle (Cassel et al., 1994 ; Lorré et Perret, 1996). Ce matériel a été mis en œuvre sur différentes parcelles de canne à sucre, à différentes périodes. Les simulations ont été conduites simultanément, et les paramètres du modèle ont ainsi pu être ajustés (K_z notamment) ou validés (K_c). L'hypothèse d'atténuation linéaire de E_{tr} entre l'humidité critique R_{fu} et le point de flétrissement permanent a ainsi été validée (K_w).

Mais, au regard des objectifs assignés, le modèle doit également présenter une grande sensibilité aux phases de drainage rapide après de fortes précipitations. Ces phases de passage de la saturation à la capacité au champ sont déterminantes dans le retour à la praticabilité. Des suivis ont été conduits dans ces conditions avec le matériel Tdr (1502b Campbell

effet que 6 à 8 heures sont nécessaires pour passer de la saturation à la capacité au champ dès le jour suivant de fortes précipitations ayant saturé le sol.

En outre, ces suivis soulignent les performances de l'appareillage utilisé : homogénéité des séries (fidélité), sensibilité à de faibles variations de stock.

Le modèle peut être utilisé sur un calendrier. Il permet alors de mettre en évidence les périodes à risques, de façon rétrospective. Son utilisation en temps réel à partir de données météorologiques enregistrées est illustrée en figure 5. Il peut être enfin exploité de façon prospective, sur des scénarios climatiques ou organisationnels (dates de coupe).

Analyses fréquentielles et jours traficables

A partir de données météorologiques historiques, on peut exploiter le modèle en déterminant l'occurrence des jours agronomiquement praticables (Jap), par décades.

Les deux critères retenus pour juger de l'opportunité d'intervenir le jour J sont : (i) une teneur en eau dans l'horizon superficiel inférieure à 38 % (76 mm) au matin du jour J, (ii) des précipitations totales inférieures à 10 mm durant le jour J (critère évoqué par certains opérateurs).

Dans les exemples fournis en tableaux III et IV, on propose un dénombrement des JAP par décades : moyenne, minima absolus observés sur la série climatique, minima observés 7 années sur 10. L'effet de la date de coupe y est particulièrement notable.

Ce référentiel constitue une forme de conseil en terme de planification annuelle. On distingue en effet nettement (i) les décades à haut risque, et (ii) celles

qui présentent de fortes probabilités de praticabilité. Les premières sont identifiées par des moyennes de Jap et des minima absolus observés faibles (ex : les trois décades de février ou de décembre). Les secondes se distinguent par des minima, observés 7 années sur 10, et des minima absolus élevés (ex : les trois décades d'octobre).

En relation avec la campagne de récolte de la canne à sucre, la dernière décade de septembre, le mois d'octobre et les deux premières décades de novembre apparaissent particulièrement favorables dans la zone. En revanche, le mois de décembre apparaît extrêmement risqué.

Considérant les travaux post-récolte (traitements, replantation), il apparaît qu'une récolte tardive est plus risquée, puisque les mois de décembre, janvier et février sont peu traficables.

On relève ici des problèmes habituels de ce type d'analyse, d'autres inhérents à la démarche de conseil :

- la nécessité de séries climatiques longues et complètes (précipitations, Etp ou Rg) ;
- le caractère peu opératoire de la décade, par rapport à la semaine (jours ouvrés), qui caractérise un calendrier de gestion d'un parc de matériel ;
- le modèle fonctionne sur la base d'une hypothèse de récolte un mois donné (établissement de Kc) ; il convient donc d'effectuer différentes analyses, sur plusieurs hypothèses de date de récolte pour formuler un conseil plus cohérent. Il est intéressant notamment d'évaluer les risques inhérents à des reports de coupe, fréquents et d'origine diverses (pannes, quotas, disponibilité en matériel...).

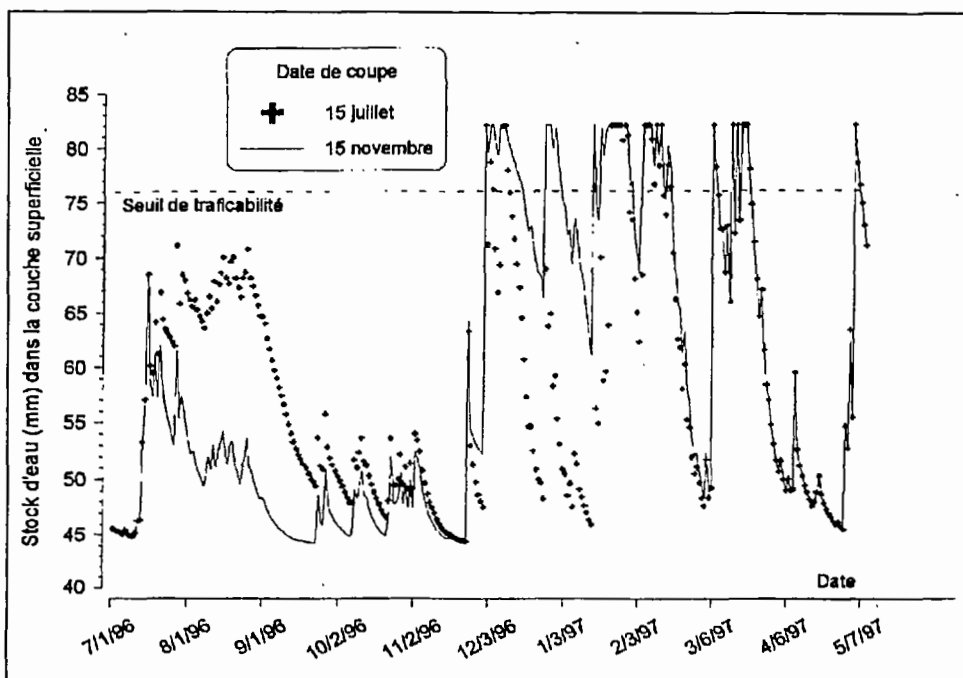


Figure 5. Modélisation du stock d'eau dans la couche superficielle selon deux dates de coupe.

On peut également imaginer d'autres modes de valorisation du modèle, pour un conseil en temps réel, à partir de scénarios climatiques probables. L'estimation de stock ne se fait alors sur ces données virtuelles.

Conclusion

Discussion des hypothèses

L'étude des relations entre climat, sol et matériels est focalisée sur la variable « teneur en eau ». Au regard des caractères anisotrope et complexe du sol, cette approche peut apparaître réductrice. Il semble indispensable de compléter la connaissance des relations entre les états structuraux initiaux et résultants afin d'améliorer la pertinence du diagnostic porté sur les successions d'itinéraires.

Pour autant, le critère « teneur en eau superficielle » est intéressant car il s'inscrit, avec le climat, dans le système d'information généralement mobilisé par les opérateurs au moment des chantiers (Nezet, 1995 ; Saintin, 1996). De plus, poser comme hypothèse qu'il détermine la traficabilité permet de répondre aux questions initialement posées : l'occurrence du risque de tassement et son intensité, le résultat probable du travail, ainsi que les performances des matériels peuvent être évaluées assez aisément.

Il convient toutefois de se donner un cadre micro-régional circonscrit, relatif à des conditions agropédologiques et climatiques locales.

Parmi les hypothèses fondatrices du modèle, l'indépendance de la couche considérée est a priori la plus discutable. Il est apparu toutefois possible de simuler son évolution en ignorant les échanges avec les couches sous-jacentes. On n'a pas pris en compte en revanche les effets de tassements profonds, possibles lors de passages répétés en conditions humides.

Formulation de conseils et perspectives

Quant à l'hypothèse d'un conseil possible aux opérateurs, deux niveaux sont possibles : la planification et la prévision à court terme.

On peut supposer que l'analyse par décade peut constituer une aide à la planification des récoltes, voire aux travaux de replantation, en pointant les périodes à risque de tassement, de dégradation des sols, de fort patinage... De même, le recours au décompactage post-récolte pourrait être raisonné, en le réservant aux parcelles récoltées en période à risque.

Dès lors qu'une étude similaire aura été conduite sur plusieurs zones incluses dans le périmètres d'intervention d'un opérateur (Sica...), il deviendra très intéressant d'en comparer les possibilités, les risques et les contraintes. Les résultats de telles approches ne constitueront toutefois qu'une composante d'un système d'aide à la décision prenant en compte les aspects organisationnels et culturels évoqués en introduction (Papy *et al.*, 1990).

En faisant abstraction de ces contingences, il serait déjà très intéressant de confronter le jugement quoti-

Tableau III. Dénombrement et analyse fréquentielle des jours agronomiquement praticables (Jap) par décade, dans le cas d'une récolte au 15 juillet (moyenne, minima absolu, minima observé 7 années sur 10, données calculées sur 11 années climatiques).

Mois :	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Moyenne	6/8/8	7/6/6	8/8/9	9/7/6	8/9/10	9/9/9	9/10/10	9/8/8	8/8/9	10/9/11	10/10/10	7/8/8
abs. Min.	3/4/3	0/2/0	3/3/2	6/2/1	2/6/6	6/7/7	4/7/5	0/0/0	0/0/5	9/6/10	9/10/8	2/4/3
min 7/10	5/8/7	6/5/5	8/8/8	9/4/4	5/9/10	9/9/9	9/9/11	10/8/6	9/9/9	10/10/11	9/10/9	7/8/7

Tableau IV. Dénombrement et analyse fréquentielle des jours agronomiquement praticables (Jap) par décade, dans le cas d'une récolte au 15 novembre (moyenne, minima absolu, minima observé 7 années sur 10, données calculées sur 11 années climatiques).

Mois :	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Moyenne	4/6/7	6/5/6	8/8/9	9/7/6	8/9/10	9/9/9	9/10/11	10/9/10	10/9/10	10/10/11	10/10/10	5/4/5
abs. Min	0/0/0	0/1/0	3/3/2	6/2/1	2/6/6	6/7/7	4/8/10	9/7/7	6/8/8	9/7/10	9/10/8	0/0/0
min 7/10	1/6/7	4/4/5	8/8/8	9/4/4	5/9/10	9/9/9	9/9/11	10/9/10	10/9/10	10/10/11	9/10/9	1/1/2

Exemple de lecture pour les tableaux III et IV :

Durant la dernière décade de décembre (21-30/12) on observe :

- au moins 2 Jap 7 années sur 10 et un minima absolu de 0, dans le cas d'une récolte au 15 novembre ;
- au moins 7 Jap 7 années sur 10 et un minima absolu de 3, dans le cas d'une récolte au 15 juillet.

dien porté par le modèle sur la traficabilité avec le jugement et les décisions prises par les experts (agriculteurs, opérateurs des Sica...).

L'influence de la date de coupe est notable sur les conditions d'intervention post-récolte des matériels (plusieurs applications de fertilisants, pesticides se succèdent sur 2-3 mois, parfois travaux de replantation), notamment en fin de campagne où des reports de chantier de coupe peuvent avoir des effets néfastes.

Dans un second niveau de conseil, le modèle peut fournir une indication sur les risques encourus, en temps réel, voire de façon prospective sur des données virtuelles (climatologie probable, scénario...). On peut ainsi notamment tester des hypothèses de report de chantier de coupe, auquel les opérateurs ont souvent recours pour réguler les flux de canne entre champs, points de collecte et usines).

Références bibliographiques

- BRADFORD J.M., GUPTA S.C. 1986. Compressibility. In : Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. A. Klute, edit., ASA-SSSA publ., USA, 1986, p. 479-492.
- BRAUNACK M.V., McPHEE J.E. 1991. The effect of initial soil water content and tillage implement on seedbed formation. *Soil and Tillage Research*, 20 (1991) : 5-17.
- BURGESS T.M., WEBSTER R. 1980a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science* 31 : 315-331.
- BURGESS T.M., WEBSTER R. 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. Block kriging. *Journal of Soil Science*, 31 : 333-341.
- CASSEL D.K., KACHANOSKI R.G., TOPP G.C., 1994. Practical considerations for using a TDR cable tester. *Soil Technology*, 7 : 113-126.
- COLLAS P., 1987. A cône penetrometer method for studying trafficability for farming operations. In : Proceedings from the 5th National Drainage Symposium, Chicago, 14-15 sept. 1987.
- EARL R., 1996. Prediction of trafficability and workability using tensiometers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63 (1) : 27-34.
- ENGLUND E., SPARKS A. 1991. Geostatistical environmental assessment software. GEO-EAS 1.2.1. User's guide. US EPA, 600/8-91/008, avril 1991.
- FAUCONNIER R., 1991. La canne à sucre. Maisonneuve et Larose., Paris, 165 p.
- FAURE A., FIES J.C., 1972. Etude expérimentale de la sensibilité au compactage de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Annales Agronomiques*, 23 (3) : 317-323.
- FAURE A., 1978. Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse Doctorat Sciences, USM Grenoble, num. 205142, 179 p.
- GENERE B., 1990. Etude de l'évapotranspiration potentielle (ETP Penman) à la Réunion. *L'Agronomie Tropicale*, 1990, 45 (2) : 115-123.
- GLANCEY J.L., UPADHYAYA S.K., 1995. An improved technique for agricultural implement draught analysis. *Soil and Tillage Research*, 35 (1995) : 175-182.
- GODWIN R., WARNER N.L., SMITH D.L.O., 1991. The development of a dynamic drop-cone device for the assessment of soil strength and the effects of machinery traffic. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 48 (2) : 123-131.
- GODWIN R.J., SPOOR G., 1977. Soil factors influencing work-days. *Agricultural Engineer*, 32 (1977) : 87-90.
- LORRE M., PERRET S., 1996. Mesure de teneur en eau du sol par réflectométrie temporelle (TDR). Modalités pratiques de mise en œuvre d'un appareillage Campbell Scientifique. CIRAD Sar, num. 30/96. 17 p.
- MARAUX F., 1994. Modélisation mécaniste et fonctionnelle du bilan hydrique des cultures. Le cas des sols volcaniques du Nicaragua. Thèse de Doctorat, INA-PG, France, 228 p.
- MARTINE J.F., 1996. mosicas, Modèle de fonctionnement et d'élaboration du rendement canne. Paramétrage de la variété R570. Rapport CIRAD-Ca Réunion, Saint Denis, juillet 1996, 40 p.
- McLAUGHLIN N.B., HESLOP L.C. et al., 1993. A general purpose tractor instrumentation and data logging system. *Transactions of the ASAE*, 36 (2) : 265-273.
- NEZET B., 1995. Elaboration d'une typologie pour l'amélioration des systèmes de culture à base canne à sucre. Rapport de DAA, INA-PG/CIRAD, 52 p.
- OSKOUI E.K., 1988. Prediction of time constraints for machinery selection purposes - Field workdays for tillage and harvesting operations. In : Tillage and traffic in crop production. Proceedings of the 11th International Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Edinburgh, Scotland, p. 385-390.
- PAPY F., AUBRY C., MOUSSET J., 1990. Eléments pour le choix des équipements et chantiers d'implantation des cultures en liaison avec l'organisation du travail. In : La structure du sol et son évolution, INRA, Paris, Colloques de l'INRA n°53, p. 157-182.
- PAPY F., 1987. Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural. *Agronomie*, 1987, 7 (2) : 111-121.
- PERFECT E., McLAUGHLIN N.B., KAY B.D., 1997. Energy requirements for conventional tillage following different crop rotations. *Transactions of the ASAE*, 40 (1) : 45-49.
- PERRET S., 1993. Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France, 278 p.
- PERRET S., GALLO J.Y., DUCREUX A., 1994a. Comparaison d'itinéraires techniques d'installation d'une culture d'oignons : critères techniques, économiques et agronomiques. CIRAD-SAR, 33 p.
- PERRET S., PIROT R., BARRET D., GALLET P., DEURVEILHER D., 1994b. Etude et définition d'un appareillage électronique d'acquisition de données embarqué sur tracteur. CIRAD-SAR, 35 p.
- PIROT R., VAILINGOM G., 1987. Etude, réalisation et mise au point d'une chaîne de mesure embarquée pour machines agricoles. Conception des protocoles d'acqui-

- tion, de transfert et d'exploitation des données. *Machinisme Agricole Tropical*, 97 : 33-36.
- PIROT R., 1992. Automation of in-field data recording : recent research work at CIRAD-SAR. In : *Proc. Ag'Eng Congress*, Upsala, Sweden, 1-4 June 1990, 3 p.
- RAUNET M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD / Région Réunion, 438p.
- REBOUL C., 1982. Les jours disponibles pour les façons culturales. Données de base pour le choix des équipements. *Science du Sol*, 3 : 221-225.
- ROUNSEVELL M.D.A., JONES R.J.A., 1993. A soil and agroclimatic model for estimating machinery work-days : the basic model and climatic sensitivity. *Soil and Tillage Research*, 26 : 179-191.
- ROUNSEVELL M.D.A., 1993. A review of soil workability models and their limitations in temperate regions. *Soil Use and Management*, 9 (1) : 15-21.
- SAINTIN P., 1996. Analyse des modalités de récolte et d'évacuation de la canne à sucre chez les petits planteurs de la Réunion. Mémoire Université Paris XII / CIRAD-SAR, 59, p.
- SIEGMUND B., DUCREUX A., 1982. Utilisation du test Proctor pour l'étude des phénomènes de compactage apparaissant en culture de canne à sucre sur parcelles récoltées mécaniquement. In : *Rapport annuel CEEMAT Réunion*, 1982, pp. 177-191.
- SIEGMUND B., PERRET S., DUCREUX A., CLARIOND A., BECLIN C., 1989. Mécanisation de la canne à sucre : recherche et expérimentation en travail du sol à l'île de la Réunion. *Rapport CIRAD- CEEMAT*, 65 p.
- SIMALENGA T.E., HAVE H., 1994. Predicting soil moisture status and suitable field workdays under tropical conditions. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 1994, 25 (3) : 9-12.
- SMITH L.A., 1990. Calibrations techniques for instrumented tractors. ASAE Paper num. 90-1010. ASAE, St. Joseph, MI 49085, 22 p.
- SMITH L.A., 1993. Energy requirements for selected crop production implements. *Soil and Tillage Research*, 25 : 281-299.
- TORRES J.S., RODRIGUEZ L.A., 1996. Soil compaction management for sugarcane. In : *Proceedings of the XXIIth ISSCT Congress*, 11-15 sept. 1995, Cartagena, Colombia ; Cock J.H. and Brekelbaum T. editors ; Technicana, Cali, Colombia, publisher, p. 222-230.
- VAKSMAN M., 1986. Etude du fonctionnement hydrique des andosols et des sols andiques de l'île de la Réunion. Thèse de doctorat de spécialité, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France, 170 p.

T travail du sol, état structural et enracinement de végétaux cultivés sur sols ferrallitiques allitiques des Îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie)

E. BOURDON¹, C. DUWIGI¹, T. BECQUER¹, F. LETOURNEL², D. BLAVET³

¹Orstom, Laboratoire d'agropédologie, BP A5, 98848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie

²Cirad, BP 73, Païta, Nouvelle-Calédonie

³Orstom, Laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France

Résumé : Le développement de l'agriculture sur les îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie) conduit à l'utilisation plus intensive de matériel agricole qui est susceptible de modifier les caractéristiques physiques et structurales des sols et d'avoir une incidence sur l'enracinement des cultures. Quatre situations ont été étudiées : une jachère, une graminée pérenne, deux cultures de maïs, l'une soumise à un travail classique, l'autre à un travail minimum. Dans chaque cas, une description morphologique, des mesures pénétrométriques et des comptages racinaires ont été réalisés sur un profil de sol. Les caractérisations des profils culturaux réalisés dans ces différentes conditions culturales montrent : i) une modification importante de l'état structural, notamment dans l'horizon de surface, à la suite de la mise en culture ; ii) que le type de travail du sol n'a toutefois pas eu une incidence majeure sur la compacité du sol et l'enracinement des plantes cultivées ; iii) que la diminution de la densité racinaire avec la profondeur ne semble pas liée à l'existence d'horizons compacts ou de zones compactées par le travail du sol. Toutefois, l'effet négatif du travail « léger » sur la croissance du maïs reste à expliquer.

Comme pour beaucoup d'autres îles du Pacifique Sud, l'accroissement de la production agricole est nécessaire sur les îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie) du fait de l'augmentation démographique et du développement d'un secteur de production commercial. Bien que les techniques de production traditionnelles soient encore largement dominantes, le développement de l'agriculture conduit à l'utilisation plus intensive de matériel agricole, d'engrais et de produits phytosanitaires. Des recherches, financées par la Province des Îles, sont menées par le Cirad et l'Orstom afin d'analyser l'intérêt de différents systèmes d'intensification des cultures et de déterminer leurs effets sur la fertilité du sol et sur les ressources en eau.

Les sols ferrallitiques allitiques développés sur ces îles ont une structure relativement fragile, susceptible d'être modifiée à la suite de passages successifs d'outils. Les objectifs de ce travail sont : i) d'observer les modifications structurales occasionnées par la mise en culture, ii) d'analyser l'importance de ces modifications sur la compacité du sol et iii) de relier cette dernière avec l'enracinement des cultures.

Matériel et méthodes

Le site d'étude

L'étude a été réalisée sur l'île de Maré, l'île la plus au sud de l'archipel des Loyauté (figure 1). Maré est un atoll corallien surélevé reposant sur un sous-

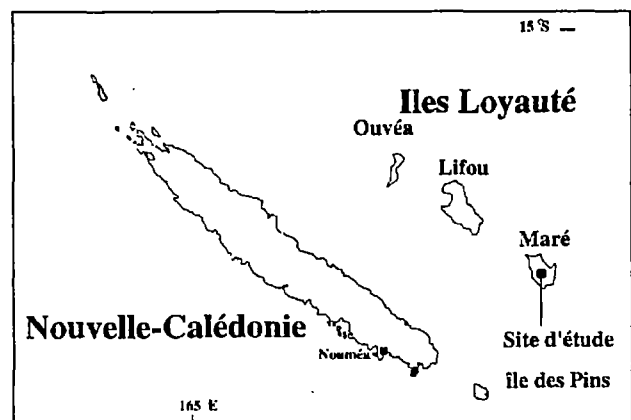


Figure 1. Carte de situation et localisation du site d'étude.

sement basaltique. L'ancien lagon, qui représente la plus grande superficie de l'île, est couvert par des sols oxydiques (Latham et Mercky, 1983). Les sols ferrallitiques oxydiques, qui couvrent 19 % de la surface totale de l'île, constituent la principale ressource en terres arables. Ces sols sont essentiellement composés d'oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, avec des teneurs très faibles en silicates.

Le champ d'expérimentation

Trois parcelles d'un « essai système » et une parcelle maintenue en jachère ont été étudiées. La première parcelle est une prairie de graminées (Rhode grass, *Chloris gayana* cv. Callide) de deux ans, labourée avant l'installation de la culture. Les deux autres sont des parcelles de maïs (*Zea mays* cv. Hycorn 90) cultivées depuis deux ans. La première subit un travail « lourd », avec un labour annuel avant le semis du maïs, effectué à la roue planteuse à la densité de 50 000 pieds/ha. La seconde est soumise à un travail « léger », sans labour, avec uniquement passage de disques, et semis à la canne planteuse en poquets de deux graines, à la même densité que précédemment. La jachère est une jachère de longue durée à recrû arbutif.

Les méthodes d'étude

L'étude du profil cultural (Hénin *et al.*, 1969 ; de Blic, 1990 ; Bourdon *et al.*, 1994) dans les 40 premiers centimètres du sol permet de caractériser les différents volumes structuraux qui le composent à partir, notamment, de la description de la structure, de la texture et de la couleur de chaque volume. La compacité du sol est mesurée par un pénétromètre de poche à aiguille cônica de type Yamanaka (Moreau et Nagumo, 1995) sur l'ensemble du profil en suivant une maille de 10 x 5 cm. Une représentation cartographique des données est réalisée à l'aide du logiciel Spyglass V3.0. L'enracinement a été évalué et cartographié à partir du relevé des impacts racinaires observés sur une face du profil (Tardieu et Manichon, 1986).

Résultats

Caractérisation morphologique des volumes structuraux

Une cartographie des volumes structuraux observés dans les différents profils étudiés est présentée à la figure 2. La jachère est constituée de deux types

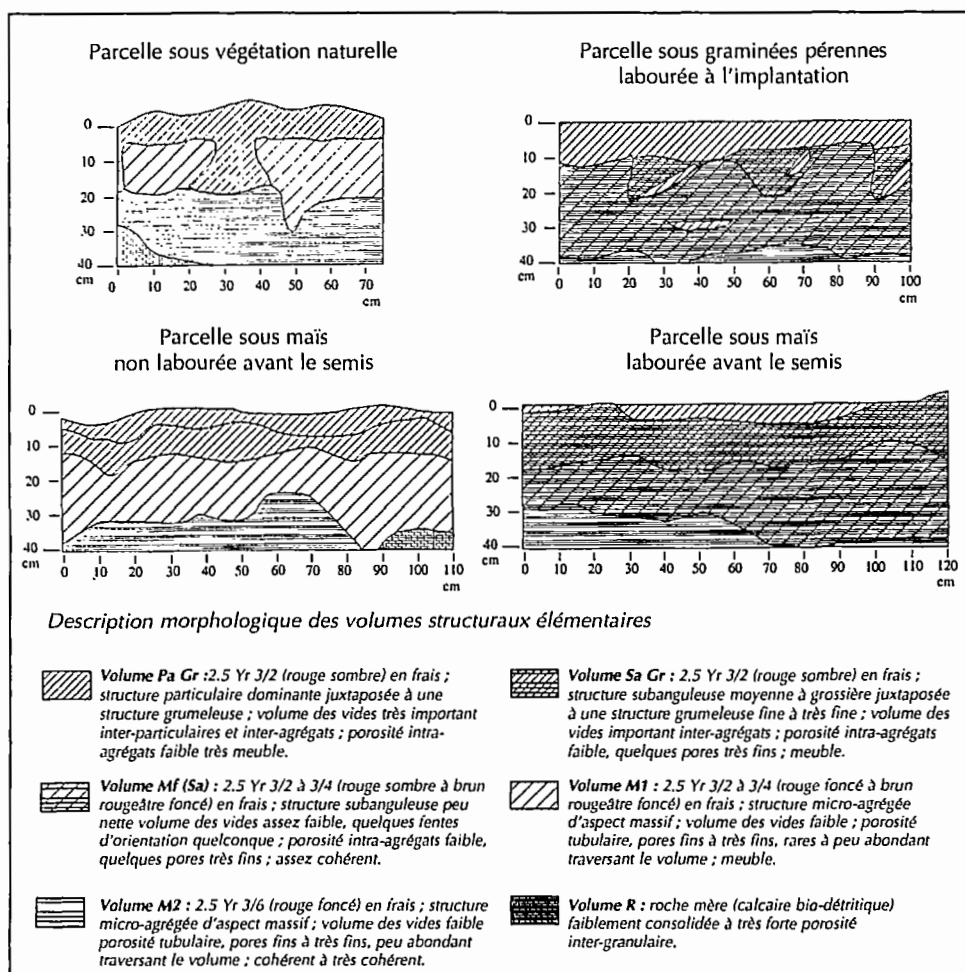


Figure 2. Description morphologique et cartographie des volumes structuraux.

d'horizons à structure très contrastée : un horizon de surface (0-12 cm), très humifère, à structures juxtaposées résultant de la coexistence d'agrégats grumeleux et d'éléments particuliers (Gr/Pa) ; des horizons sous-jacents, moins humifères, d'aspect massif (M), qui peuvent être distingués en deux volumes structuraux, M1, le moins profond est assez humifère et meuble, M2, situé sous M1, est peu humifère et assez cohérent ; l'ensemble repose sur du calcaire corallien bio-détritique (volume R). Sous culture, au niveau de l'horizon de surface (0-10 cm), on observe un accroissement de la fraction articulaire par rapport à la fraction grumeleuse ou sub-anguleuse. En profondeur, le profil correspondant au « travail léger » est assez comparable au précédent. Par contre, le travail du sol « lourd » provoque une légère fragmentation du volume M1 (10-30 cm), où une structure subanguleuse à grumeleuse (Sa-Gr) peu nette se développe (volume Mf (Sa)), l'horizon massif non modifié (M1 ou M2) se trouvant à plus de 30 cm de profondeur.

Cartographie des profils pénétrométriques et racinaires

Les cartes des profils pénétrométriques et racinaires sont présentées à la figure 3. Ces cartes donnent une représentation de la variation de la répartition, dans le profil, des zones plus ou moins compactes et de la densité des racines. A partir de ces données, des profils moyens, pénétrométriques et de densité racinaire, ont été calculés (figure 4). L'augmentation progressive de la compacité depuis les horizons de surface jusqu'à ceux de profondeur s'accompagne d'une diminution de la densité racinaire qui est presque nulle au-delà de 40 cm. Le nombre de racines dans les horizons de profondeur ainsi que la profondeur d'enracinement sont légèrement supérieurs pour le système sous graminées. Ils sont toutefois similaires sous maïs (pas de différence significative pour $p = 0,05$) pour les deux types de travaux du sol, hormis en surface où le nombre de racines est nettement plus élevé pour le travail minimum et correspond à un envahissement de la culture par les adventices.

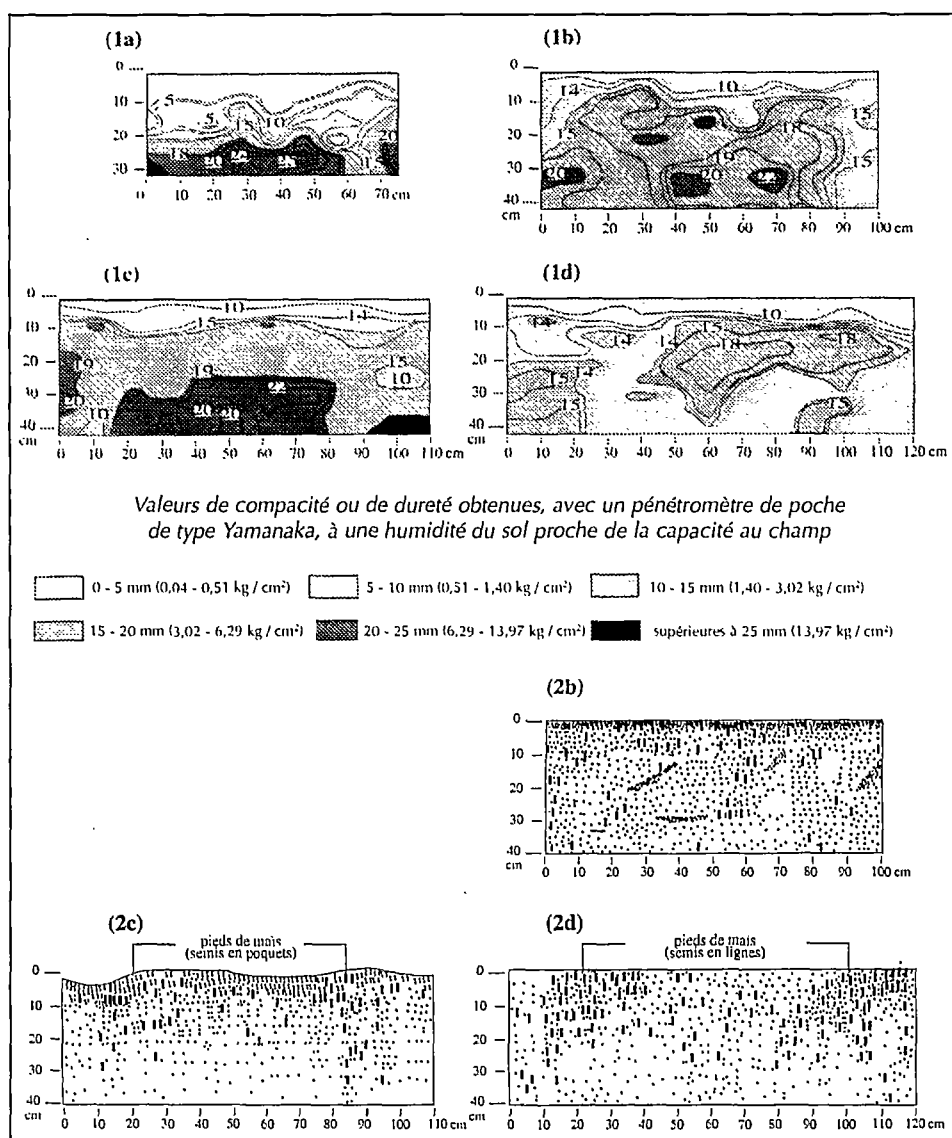
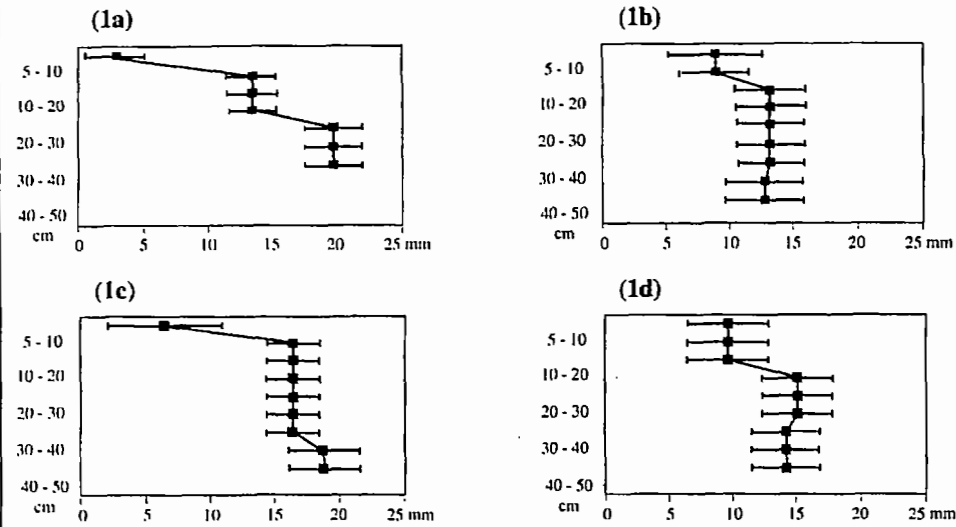


Figure 3.
Cartographie de la compacité des volumes structuraux (1) et des profils racinaires (2) sous végétation naturelle (a), sous graminées pérennes labourées à l'implantation (b), sous maïs non labouré (c) et labouré (d).

Profil pénétrométrique (valeurs moyennes exprimées en mm d'enfoncement)



Profil racinaire (exprimé en nombre moyen de points d'impact par dm²)

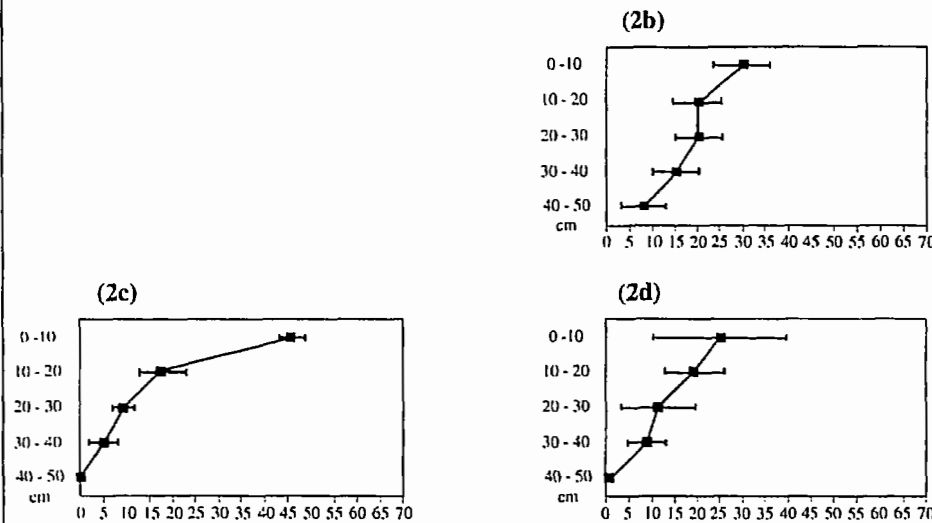


Figure 4. Comparaison entre la compacité moyenne (1) mesurée au pénétromètre Yamanaka et la densité racinaire (2) sous végétation naturelle (a), graminées pérennes (b), sous maïs non labouré (c) et maïs labouré à l'implantation (d).

Discussion

Le travail du sol induit des modifications importantes de l'état structural du sol par rapport à l'état initial. En surface, quel que soit le type de travail du sol, il y a une déstructuration qui se traduit par un accroissement important de la fraction particulaire par rapport à la fraction grumeleuse et une importante déstructuration des structures biologiques. En profondeur, le labour se traduit par une légère fragmentation de l'horizon massif et l'apparition d'une structure sub-angleuse, qui reste cependant peu développée. L'incorporation en profondeur de matière organique issue de l'horizon de surface peut également avoir un effet bénéfique sur la structuration. Cependant, cette incorporation par une charrue à disque reste généralement très localisée.

Malgré des variations non négligeables, dues à la variabilité de la compacité de chaque volume structural et aux imprécisions des interpolations déterminées à partir d'une maille 10 x 5 cm, une bonne concordance est obtenue entre la cartographie pénétrométrique et la cartographie des volumes structuraux. La cartographie pénétrométrique ne montre pas de modification importante de la compacité du sol entre les différents systèmes de culture, labourés ou non, par rapport à l'état initial. La compacité, qui dépasse parfois 6,29 kg/cm² (ou 20 mm) vers 35-40 cm de profondeur, est susceptible d'avoir un effet néfaste sur l'enracinement de diverses plantes cultivées (Moreau et Nagumo, 1995). Cependant, les comptages racinaires montrent une décroissance progressive de l'enracinement avec la profondeur, sans diminution brutale imputable à un horizon compact

ou une zone compactée par le travail du sol. La compacité des sols ferrallitiques allitiques ne semble donc pas induire de problèmes importants sur l'enracinement des cultures.

Le nombre de racines dans les horizons de profondeur ainsi que la profondeur d'enracinement sont légèrement supérieurs pour le système sous graminées. Ce meilleur enracinement peut s'expliquer d'une part par l'ancienneté de la mise en place de la culture (culture pérenne de deux ans pour la graminée, culture annuelle de trois mois pour le maïs), d'autre part par une colonisation moins importante de l'inter-rang sous maïs. Pour les deux systèmes sous maïs, la densité des racines est similaire hormis en surface où, pour le système avec travail minimum, l'inter-rang est colonisé par de nombreuses adventices. Dans ce dernier cas, il faut également souligner que la densité racinaire moyenne correspond à deux pieds de maïs par ligne de semis (poquet). Le nombre de racine par pied et la colonisation du milieu est donc, en fait, deux fois plus faible. Toutefois, la croissance du maïs sur la parcelle avec travail minimum est nettement plus faible que celle observée sur parcelle labourée. Les mesures de poids de matière verte par plante au stade pâteux (Létournel et Corniaux, 1996) montrent des différences très significatives entre les deux types de travail du sol. Les poids moyens (pour deux parcelles x 3 niveaux de fertilisation pour chaque type de travail du sol) sont respectivement de 1 102 g et 429 g par plante pour les travaux du sol « lourd » et « léger », l'effet de la fertilisation n'étant pas significatif. Comme nos résultats ne permettent pas de penser que les caractéristiques physiques du sol puissent expliquer cette différence, celle-ci serait donc, plus probablement, à rechercher au niveau de la disponibilité chimique des éléments minéraux dans le sol et d'une compétition entre les deux pieds de maïs d'un poquet.

Conclusion

La caractérisation des profils culturaux sous jachère et sous différents modes de mise en culture des sols ferrallitiques allitiques des îles Loyauté met en évidence une modification importante de l'état structural, notamment dans l'horizon de surface. Toutefois, le type de travail du sol ne semble pas avoir une incidence majeure sur la compacité du sol et l'enracinement des cultures. En effet, la diminution de la densité racinaire avec la profondeur ne semble pas liée à l'existence d'horizons compacts ou de zones compactées par le travail du sol. Cependant, la croissance du maïs sur la parcelle avec « travail léger » est nettement plus faible

que celle observée sur parcelle labourée. Les caractéristiques physiques du sol ne permettent pas d'expliquer cette différence, qui est donc, plus probablement, liée aux caractéristiques chimiques du sol ou à des phénomènes de compétition entre plantes.

L'évolution à moyen terme des caractéristiques structurales, leur incidence sur les propriétés physiques et hydrodynamiques du sol ainsi que sur la production végétale restent à préciser.

Remerciements

Cette recherche a été financée par le « Contrat de Développement entre la Province des Îles et l'Orstom pour l'étude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce » et par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche pour l'opération n° 6DEF. Les auteurs remercient le Cirad pour sa collaboration dans la conduite des expérimentations au champ.

Références bibliographiques

- BOURDON E., BECQUER T., EDIGHOFFER S., BONZON B., 1994. Évaluation de la compacité des sols ferrallitiques ferritiques (ferrallisol) de Nouvelle-Calédonie (relation avec l'enracinement). Nouméa, ORSTOM, Conv. Sci. Vie, Agropédol., 26 : 35 p.
- de BLIC P., 1990. L'examen du profil cultural : un outil pour mieux comprendre le comportement du sol soumis à des travaux aratoires. In Organic matter management and tillage in humid and subhumid Africa. IBSRAM Proceedings, n° 10, Bangkok, p. 385-399.
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. Le profil cultural. Masson, Paris, 332 p.
- LATHAM M., MERCKY P., 1983. Étude des sols des îles Loyauté. Carte pédologique et carte d'aptitude culturale et forestière à 1:200 000. ORSTOM, Paris, Notice explicative n° 99.
- LETOURNEL F., CORNIAUX C., 1996. Essai intensification et mécanisation de l'agriculture et protection de l'environnement sur île corallienne. Propositions de protocole de récolte de données et d'analyse de ces données. Analyse des données pour la saison 1995-1996. Rapport CIRAD, Nouvelle-Calédonie.
- MOREAU R., NAGUMO F., 1995. Le pénétromètre Yamana et son utilisation pour l'évaluation des possibilités d'enracinement dans les horizons des sols cultivés. In 2^e Réunion du Groupe thématique « Structure et fertilité des sols tropicaux ». Montpellier, ORSTOM, p. 85-91.
- TARDIEU F., 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 (5) : 415-425.

Action des machines de travail du sol et structure du sol

M.-F. DESTAIN

Faculté universitaire des sciences agronomiques, 2 Passage des Déportés, 5030 Gembloux, Belgique

Résumé : Pour analyser l'action des machines de travail du sol, il est indispensable de disposer de techniques permettant de quantifier la structure du sol et le microrelief. Dans cet article, la porosité structurale est mesurée en imprégnant d'un mélange résine-colorant des échantillons de sol prélevés de manière non destructive. Une fois les échantillons séchés, la répartition de la porosité est étudiée par analyse d'images et il apparaît que la distribution de fréquence des pores en taille et en forme est caractéristique des façons culturales. Par ailleurs, le microrelief du sol est mesuré à l'aide d'un capteur laser et les données "hauteur" sont interprétées par analyse de Fourier. La densité spectrale énergétique et la fonction d'autocorrélation rendent très bien compte de l'évolution différenciée du microrelief créé par différents travaux culturaux.

La structure se définit comme l'agencement spatial des composants du sol qui donne lieu à diverses propriétés intrinsèques de ce dernier, telles la résistance mécanique, la capacité de rétention en eau, la sensibilité à l'érosion, etc. Les éléments constituant la structure sont représentés par des particules élémentaires (argile, limon et sable), par des assemblages de particules, parmi lesquels on distingue les micro-agrégats (20-250 μm), les agrégats (0,25-25 μm) et les mottes (> 25 μm), enfin par des résidus de culture.

De manière très synthétique, on peut dire que les machines de travail du sol ont pour but de créer la structure du sol qui sera la plus favorable à la croissance des plantes, tout en tenant compte d'impératifs économiques et environnementaux. Les modifications de structure induites par les machines sont liées au mode d'action des pièces travaillantes (mouvement de translation pure ou combinaison de translation et rotation, action de sectionnement ou chocs...), aux paramètres fonctionnels (vitesse d'avancement, vitesse de rotation de rotors...) mais aussi à la texture du sol, à sa teneur en eau et à « l'histoire » du site.

L'état structural du sol résultant de l'action des machines est souvent analysé à partir de l'observation du profil cultural, le long d'une tranchée, selon les modalités décrites par Hénin *et al.*, (1969). Se basant essentiellement sur cette méthode, Dalleine (1977) a compilé de nombreuses observations relatives aux façons de travail du sol et en a tiré des indications précieuses permettant de mieux comprendre les modes d'action des machines. Cette approche qualitative de base gagne néanmoins à être complétée par des méthodes plus quantitatives si l'on veut préciser l'incidence des machines de travail du sol sur la structure.

Dans le cadre de cet exposé, des techniques permettant de quantifier d'une part la distribution de la porosité structurale et d'autre part le microrelief d'un sol sont présentées. L'application retenue concerne des travaux du sol très contrastés, qui font souvent l'objet de comparaisons, à savoir un travail du sol conventionnel et un travail minimum.

Taille des agrégats, porosité

De nombreux chercheurs ont tenté d'exprimer à l'aide de lois mathématiques la distribution en taille des agrégats en vue de quantifier l'action des machines de travail du sol. Très vite, il apparaît que des indices simples tels le diamètre pondéral moyen (Van Bavel, 1949) ou le diamètre géométrique moyen (Gardner, 1956) sont insuffisants. Des expressions empiriques, reflétant mieux la distribution en taille

d'un ensemble d'agrégats sont développées, parmi lesquelles la loi de Gaudin, rappelée par Addiscott et Dexter (1994), qui s'écrit :

$$Y = 100 (x/R)^m$$

avec Y le nombre cumulé d'agrégats de taille inférieure à x (exprimé en pourcentage) ; R et m sont des paramètres à ajuster. Parmi les développements mathématiques les plus récents, il faut signaler l'application de la théorie des fractales basée sur les études théoriques de Turcotte (1992) et présentée par Addiscott et Dexter (1994) comme très prometteuse.

La porosité d'un sol est liée à la taille des agrégats et il est bien admis que, pour un sol donné, la porosité décroît si la taille des agrégats se réduit. Dans la mesure où la taille des pores conditionne les phénomènes d'échanges chimiques et biologiques entre l'eau et les agrégats, il est important de pouvoir apprécier non seulement la porosité totale mais aussi la répartition des pores en taille et en forme.

En 1976, Dexter présente une méthode qui a été souvent utilisée par la suite et qui consiste à imprégner de résine des échantillons de sol qui, une fois durcis, sont scannés et analysés. La structure est décrite en recherchant le long de transects horizontaux la probabilité pour qu'un pore ou un agrégat suive un autre pore ou agrégat. La technique que nous utilisons (Destain et Lejeune, 1985 ; Destain et Houmy, 1990) s'apparente à celle-là. Elle consiste à prélever de manière non destructive des échantillons de sol dans des tubes en PVC. Ceux-ci sont séchés à une température de 40°C, puis imprégnés d'un mélange résine - durcisseur, sous vide. Un colorant blanc est ajouté au mélange pour obtenir un bon contraste entre le sol et les vides. En ajustant correctement la proportion de résine et de durcisseur, on peut obtenir un bon compromis entre la viscosité du produit d'imprégnation (une faible proportion de durcisseur donne lieu à une faible viscosité, qui permet d'obtenir un bon remplissage des vides) et le temps de durcissement. Ce dernier varie de 3 à 4 semaines. Une fois les échantillons durcis, ils peuvent être sectionnés et la distribution des pores apparaît nettement. L'étude par analyse d'images de ces sections permet non seulement de quantifier la porosité totale mais autorise également la détermination de l'évolution de la distribution des pores, en nombre et en forme (figure 1).

Mesure du microrelief

Le microrelief du sol, qui constitue l'une des manifestations les plus apparentes de la structure, est lui aussi conditionné par l'action des machines de travail du sol. Il est généralement exprimé par la rugosité qui est égale à 100 fois le logarithme décimal de l'écart-type des hauteurs mesurées (Kuipers, 1957).

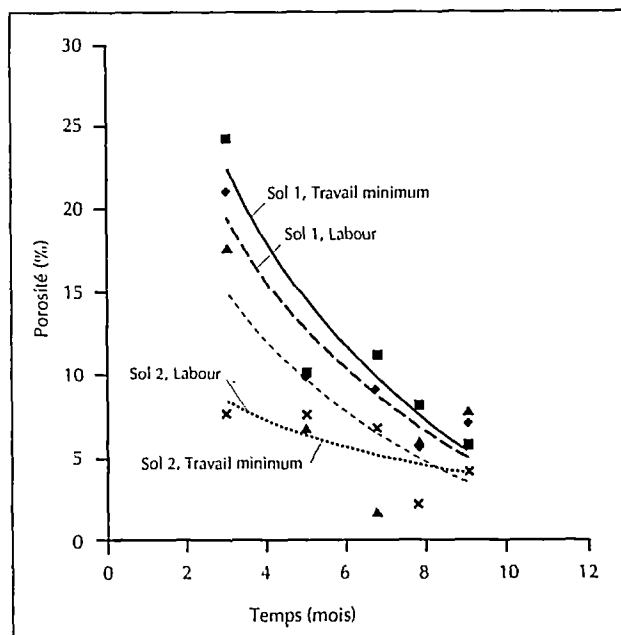


Figure 1. Evolution de la porosité totale.

Pour mesurer le microrelief, on recourt souvent à un profilomètre à aiguilles. L'utilisation d'un capteur optoélectronique permet d'obtenir une réponse précise, rapide et non destructive (Destain *et al.*, 1989). Le dispositif que nous avons utilisé est de marque Selcom, il comporte une source lumineuse constituée d'une diode laser, de longueur d'onde égale à 850 nm, dont la puissance est 4 mW. Le laser crée un spot lumineux au niveau du sol qui renvoie la lumière directe et diffuse. Une partie de cette lumière diffuse est projetée sur des éléments photosensibles situés à l'intérieur d'une caméra. Un microprocesseur transforme les signaux reçus par les éléments photosensibles en données "hauteur", sous forme digitale. Pour la gamme de mesure allant de 0 à 64 mm, les caractéristiques générales de l'appareil sont les suivantes :

- imprécision : 0,032 mm ;
- résolution : 0,016 mm ;
- non linéarité : 0,032 mm ;
- bande passante : jusqu'à 2 kHz.

Dans la version que nous avons utilisée, le profilomètre peut se déplacer le long d'un bâti, grâce à un moteur électrique pas à pas, sur une distance de 553 mm, ce qui correspond à 512 mesures. Cet ensemble de mesures est désigné ultérieurement comme "profil". La transformation du profil dans le domaine fréquentiel (analyse de Fourier) donne lieu à une interprétation plus large que celle de la rugosité. L'annexe rappelle les bases mathématiques des deux fonctions utilisées, à savoir la densité spectrale et la fonction d'autocorrélation.

La densité spectrale ou densité spectrale énergétique est la puissance du signal contenue dans une bande de fréquence lorsque celle-ci tend vers zéro. La fonc-

tion d'autocorrélation compare une fonction $x(t)$ avec elle-même, décalée de t . Pour le cas qui nous intéresse, la fonction $x(t)$ est la cote mesurée du profil par rapport à un niveau de référence et la variable indépendante t est une longueur, à savoir la position sur le transect de 553 mm. On conçoit aisément que la fonction d'autocorrélation permet de voir dans quelle mesure la fonction à un endroit précis est influencée par ce qui existe avant. Si, par exemple, $x(t)$ comporte une périodicité, chaque fois que le décalage t sera égal à un nombre entier de fois la période de cette périodicité, on aura un maximum de la fonction d'autocorrélation. Cette méthode permet donc de mettre en évidence des périodicités difficiles à percevoir sur le signal de base. En outre, la valeur maximale de la fonction d'autocorrélation (obtenue pour $t = 0$) correspond à la variance du signal et permet donc de calculer la rugosité telle que définie par Kuipers.

Structure, travail du sol conventionnel et travail minimum

Les techniques présentées ci-dessus sont bien adaptées à la quantification de la structure créée par des techniques de simplification de travail du sol. Nous donnerons quelques exemples relatifs à un travail conventionnel comportant un labour à 20 cm, suivi de préparations secondaires et un travail minimum impliquant un simple hersage avant le semis. Les essais ont été menés sur des sols 1 et 2 dont la texture globale est limoneuse mais qui se différencient par leur teneur en argile et limon : les sols de type 1 comportent 18 % d'argile, 70 % de limon, tandis que les sols de type 2 présentent 10 % d'argile et 85 % de limon. La rotation était betterave sucrière, blé, escourgeon.

Evolution de la porosité

L'évolution de la porosité est mesurée au cours de cinq périodes : 1) au sortir de l'hiver, avant les travaux du sol, 2) au printemps, après le semis, 3) en juin en cours de développement de la plante (betterave), 4) en fin juillet, 5) en septembre, avant la récolte (Dridi, 1989). Pour les périodes 3, 4, 5, les mesures se font entre les plantes.

La porosité totale décroît globalement au cours de la saison culturale. C'est à la sortie de l'hiver qu'elle est la plus importante, ce qui indique une action importante des agents climatiques sur l'ameublissement du sol (alternances gel dégel). A ce moment, la porosité globale est fortement influencée par la texture du sol

(figure 1). Ce sont les sols de type 1 qui présentent la porosité la plus élevée, quel que soit le mode de travail du sol. Pour les sols de type 2, la porosité est favorablement influencée par le travail du sol conventionnel. Les macropores des parcelles labourées en sols 2 présentent une certaine continuité dans la direction verticale permettant d'assurer un drainage rapide de l'eau et l'aération du sol. Dans les parcelles caractérisées par un travail minimum, la distribution de la porosité est peu homogène et la continuité des pores n'est pas bien assurée.

Au cours de la saison culturale, la structure se modifie de manière significative et la porosité se présente de manière moins différenciée, quels que soient le type de sol et le mode de travail du sol. Néanmoins, c'est pour les sols de type 1 ayant subi un travail minimum que la porosité globale reste la plus élevée. La figure 2 donne à titre d'exemple la situation observée après le semis en labour et travail minimum. On peut observer que la porosité est plus homogène en labour qu'en travail minimum : les pores de plus petite taille y sont plus nombreux. Si les graines semées sont de petite taille (ex. betteraves), il est vraisemblable que dans les parcelles labourées une meilleure continuité sera assurée entre les graines et l'environnement, facilitant les transferts d'humidité indispensables à la germination. Par contre, la structure du travail minimum est sans doute plus favorable en termes d'économie en eau : la pénétration de l'eau et des éléments nutritifs, la convection des flux d'air sont facilitées.

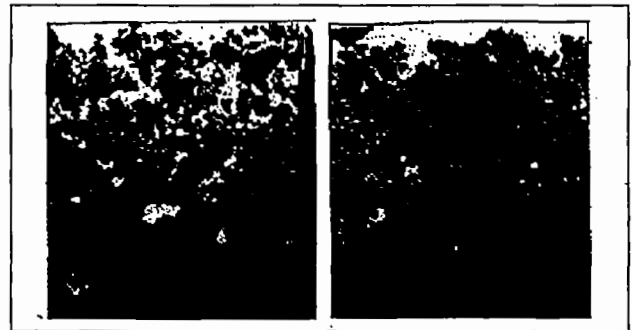


Figure 2. Structure du sol après semis : à droite, labour ; à gauche, travail minimum.

Evolution du microrelief

Les résultats concernent le sol de type 2. Les mesures ont été effectuées à trois périodes différentes : en septembre après un semis d'escourgeon, en mars, en mai.

Densités spectrales

Au début des mesures, les densités spectrales (figure 3) sont relativement semblables, quel que soit le traitement et ceci tout particulièrement pour les faibles longueurs d'onde. De plus, la courbe relative au labour présente une valeur maximum à une longueur d'onde

de 40 mm, ce qui semble être une caractéristique de ce genre de traitement : la densité spectrale est affectée par des mottes présentes dans le lit de semences qui sont transportées en surface par l'effet de triage de la herse rotative. La courbe du minimum tillage indique un pic à 160 mm : celui-ci s'explique par l'action des dents du semoir qui sont précisément séparées de 160 mm et créent des sillons dans le sol.

Sous l'action des agents climatiques, les aspérités du profil disparaissent progressivement, les premières concernées étant celles de plus petite taille. L'état motteux et rugueux se dégrade sous l'action des agents climatiques, principalement de la pluie. Les plus petits agrégats, qui sont aussi les plus sensibles, sont détruits et les particules élémentaires se soudent, ce qui correspond au glaçage. Au fur et à mesure que les pluies ou le gel interviennent, les mottes de diamètre de plus en plus grand subissent le même phénomène ; il en résulte une diminution du microrelief du sol. A ce moment, ce sont les moyennes et grandes longueurs d'onde qui voient leur contribution dimi-

nuer dans le spectre. Ce phénomène est tout particulièrement marqué pour le labour, le microrelief du travail minimum est moins dégradé.

Fonctions d'autocorrélation

Les fonctions d'autocorrélation (figure 4) donnent aussi des informations précieuses sur l'existence de périodicités au niveau du sol. Sous l'action des agents climatiques, la part aléatoire des signaux diminue dans le traitement conventionnel et l'apparition de périodicités devient très nette. La courbe de mai indique une demi-période de 200 mm, qui peut être attribuée aux sillons laissés par la charrue. En outre, au début des mesures, les fonctions d'autocorrélation se caractérisent par une pente très raide pour de faibles valeurs du décalage t . Il est clair que les pentes de ces courbes deviennent moins raides au cours du temps (Destain et Verbrugge, 1987). Ceci indique une meilleure corrélation entre une particule et ses voisines, et peut être interprété comme une soudure des particules entre elles ou un glaçage.

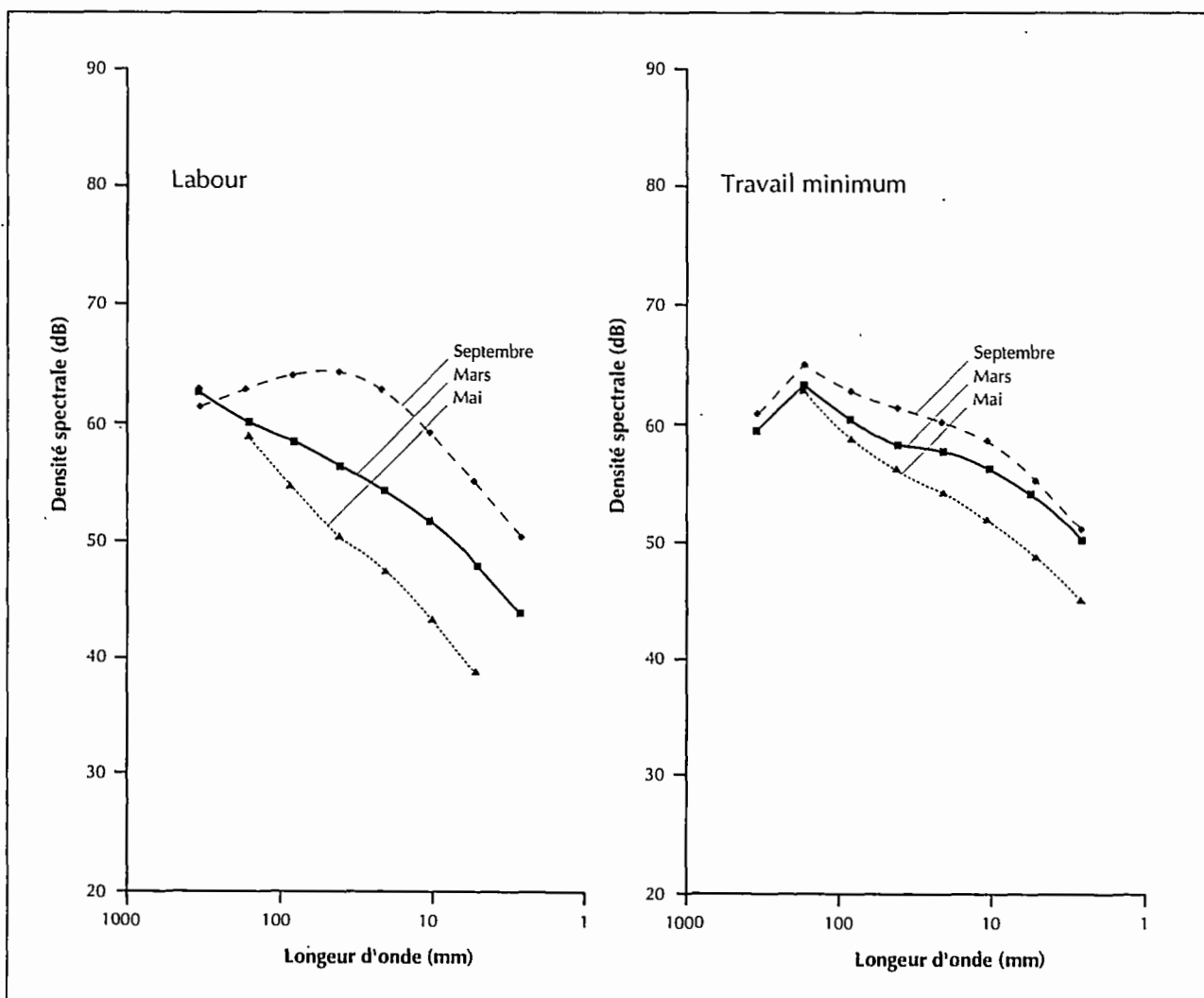


Figure 3. Densités spectrales.

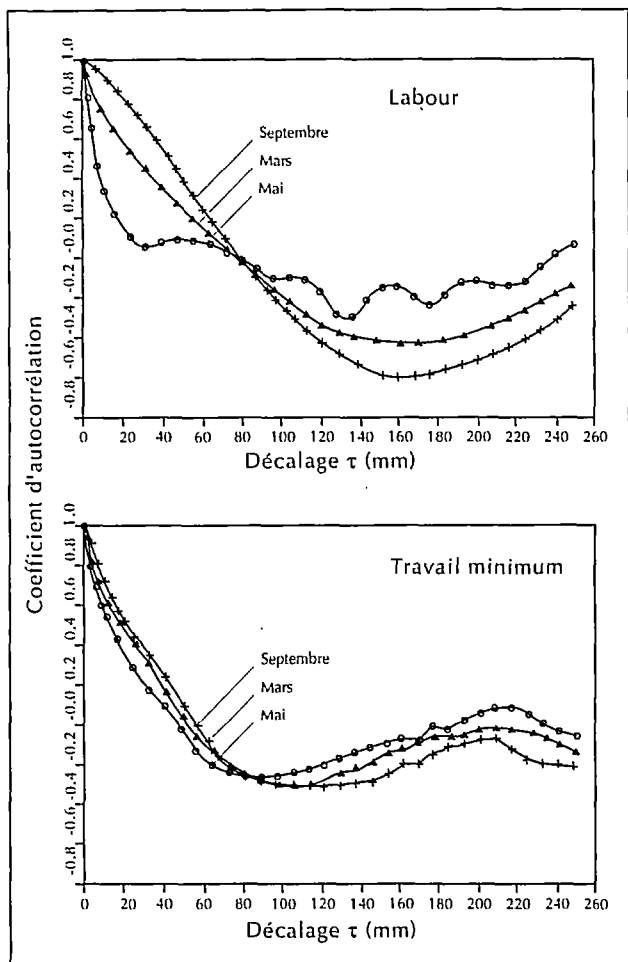


Figure 4. Fonctions d'autocorrélation.

Conclusion

Les techniques de simplification du travail du sol connaissent un certain succès actuellement auprès des agriculteurs. Dans la mesure où ces techniques peuvent modifier de façon radicale la structure du sol, il est intéressant de disposer de méthodes de mesure précises et non destructives permettant de contrôler régulièrement l'évolution de l'état structural, pour éviter de créer des situations difficilement réversibles. Dans cette optique, les méthodes d'investigations proposées, à savoir étude de la porosité par analyse d'images sur échantillons enrésinés et mesure automatisée du microrelief du sol sont parfaitement adaptées.

Références bibliographiques

- ADDISCOTT T. M., DEXTER D A.R., 1994. Tillage and crop residue management effects on losses of chemicals from soils. *Soil and Tillage Research*, 30 : 125-168.
- DALLEINE E., 1977. Les façons en travail du sol. *Etudes du Cneema* n° 428, 438, 445.

DESTAIN M.-F., LEJEUNE J.-L., 1985. Présentation d'une technique permettant d'analyser l'action des machines de travail du sol. *Actes du colloque international « Le travail du sol », Gembloux.*

DESTAIN M.-F., VERBRUGGE J.-C., 1987. Measurements of soil surfaces profiles with an optical displacement transducer. *Proceedings of the 9th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle-Systems, Barcelona*, p. 152-159.

DESTAIN M.-F., DESCORNET G., ROISIN C., FRANKINET M., 1989. Investigation of Soil Degradation by Means of an Opto-electronical Microreliefmeter. *Soil and Tillage Research*, 13 : 299-315.

DESTAIN M.-F., HOUMY K., 1990. Effects of Design and Kinematic Parameters of Rotary Cultivators on Soil Structure. *Soil and Tillage Research*, 17 : 291-301.

DESTAIN M.-F., 1994. Measurements techniques useful to compare soil structure resulting from conventional cultivation and no-tillage. *Proceedings of the EC Workshop I "Experience with the applicability of no-tillage crop production in the West-European countries", Wissenschaftlicher Fachverlag, Giessen*, 69-80.

DEXTER A.R., 1979. Prediction of soil structures produced by tillage. *J. Terramech.*, 16 : 117-127.

DRIDI B., 1989. Influence des traitements culturaux sur la porosité de deux sols limoneux à développement de profil différent (Aba et Abp0) - Essai de quantification à l'analyseur d'images. Thèse de doctorat, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux.

HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. Le profil cultural, l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Paris, Masson.

KUIPERS H. 1957. A relief meter for soil cultivation studies. *Neth. J. Agric. Sci.*, 5 : 225-262.

TURCOTTE D.L., 1992. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, 221 p.

Annexe

La fonction d'autocorrélation d'une fonction $x(t)$ est définie par

$$C(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t - \tau) dt$$

T est la période de mesure, T doit être pris aussi grand que possible compte tenu des possibilités expérimentales.

$$\text{Si } \tau \neq 0 \quad |C(\tau)| < C(0)$$

On démontre que la fonction d'autocorrélation jouit de propriétés particulières dont les suivantes :

La fonction d'autocorrélation a sa valeur maximale pour $\tau = 0$:

On remarquera que $C(0)$ qui est égal à $\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$ est la valeur quadratique moyenne ou la variance ou la puissance moyenne de $x(t)$.

La fonction d'autocorrélation d'un signal aléatoire tend vers 0 quand τ augmente indéfiniment :

$$C(\infty) = 0$$

La fonction d'autocorrélation d'un signal périodique a la même période fondamentale que le signal périodique lui-même et contient toutes les fréquences de ce signal et celles-ci seulement.

Pour définir la densité de puissance ou densité spectrale énergétique, considérons un filtre passe-bande (supposé idéal) de largeur de bande $\Delta\nu$, centré sur la fréquence ν_0 . Un tel filtre a un gain unité pour toutes les fréquences comprises dans la bande :

$$\nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2}, \quad \nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2}$$

et un gain nul pour toutes les fréquences extérieures à cet intervalle. Filtrons $x(t)$ dans le filtre F; soit $x_f(t)$ à la

sortie du filtre. La puissance moyenne de $x_f(t)$ sera alors :

$$P_m(\nu_0, \Delta\nu) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt$$

Donc, la puissance est dans ce cas fonction de la fréquence ν_0 et de la bande de faible largeur $\Delta\nu$ autour de ν_0 . On définit alors la densité de puissance ou densité spectrale énergétique comme la puissance du signal contenue dans une bande de fréquence lorsque celle-ci tend vers 0 :

$$G_{xx}(\nu) = \lim_{\Delta\nu \rightarrow 0} \frac{P_m(\nu_0, \Delta\nu)}{\Delta\nu}$$

ou

$$G_{xx}(\nu) = \lim_{\Delta\nu \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\nu} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt \right]$$

On peut démontrer que la densité spectrale et la fonction d'autocorrélation sont transformées de Fourier l'une de l'autre.

Effets des itinéraires techniques sur l'évolution du profil cultural : effets immédiats

Tahar MANSOURI, Zouhaier CHAABOUNI

Inrgref, Institut national de recherches en génie rural, eaux et forêts, BP 10, 2080 Ariana, Tunisie

Résumé : Les effets des itinéraires techniques sur l'évolution du profil cultural, ont été étudiés à l'aide de mesure aux champs. Trois itinéraires techniques de travail du sol ont été choisis. Le premier itinéraire est un itinéraire traditionnel (traitement T1) utilisant le labour avec retournement du sol à l'aide d'une charrue à trois socs réversibles, complété par un recroisement au cover crop à disques, un hersage, un semis et un roulage. Le deuxième est un itinéraire simplifié (traitement T2) utilisant le labour sans retournement du sol à l'aide d'un chisel à dents suivi d'un scarifiage avec une rotoherse combinée (vibroculteur et herse roulante), un semis et un roulage. Le dernier est un itinéraire minimum (traitement T3) sans labour : le retournement superficiel est effectué à l'aide d'un cover crop à disques suivi d'un hersage, un semis et un roulage. L'évolution du profil cultural, étudié à trois périodes différentes (après semis, au milieu du cycle cultural et avant récolte), est caractérisée par l'ameublissement superficiel du sol, le profil de la densité apparente, le profil hydrique et le profil de la résistance à la pénétration d'une pointe. Les résultats montrent que les variables mesurées dépendent des itinéraires techniques employés qui modifient le profil cultural. Le labour avec retournement du sol (traitement T1) favorise la porosité tout le long du profil étudié, maintient l'humidité du sol et réduit la résistance à la pénétration dans le sol. Le labour sans retournement (traitement T2) et le retournement superficiel (traitement T3) n'engendrent des variations sur le profil cultural que sur la couche superficielle du sol.

Le choix d'un itinéraire technique est conditionné par les exigences des cultures à installer et les opérations culturales à effectuer. Celles-ci doivent assurer des conditions favorables à l'implantation de la graine, aboutir à un état structural répondant aux besoins de la culture durant le cycle végétatif et créer un milieu convenable à son évolution.

Les outils de labour primaire et l'itinéraire technique employés occasionnent des changements du relief de surface et des perturbations de la structure du sol, ce qui engendre la présence d'agrégats de différentes tailles. Ces conséquences, souvent fonction du choix

de l'outil de labour et de son itinéraire, influencent l'évapotranspiration, la capacité de rétention de l'eau dans le sol et modifient sa densité apparente. Le passage de l'opération de labour aux techniques de travail superficiel entraîne souvent une augmentation de la densité apparente des horizons de surface. Parallèlement, le non travail du sol et l'effet de mulch des résidus organiques peuvent se traduire par une moindre évaporation et une plus forte humidité des horizons de surface, notamment au printemps.

Par ailleurs, la pratique du labour durant plusieurs années, entraîne la présence de zones compactes dans le profil. Ces zones sont plus ou moins profondes selon les techniques employées et plus ou moins compactes suivant leurs conditions de formation. Le profil de cohésion exploré par la résistance à la pénétration s'en trouve modifié et évolue suivant les différentes modalités de travail du sol.

L'objet des essais entrepris au cours de ce travail consiste à étudier les effets de trois itinéraires techniques de travail du sol utilisant le labour avec retournement, le labour sans retournement et le retournement superficiel, sur l'évolution du profil cultural, et notamment, la variation du profil de surface, du profil densimétrique, hydrique et pénétrométrique.

Matériel et méthodes

Les essais ont été menés au cours du mois d'octobre 1994, les relevés de mesure se sont déroulés jusqu'au mois de juin 1995, sur une parcelle de 2 ha

située au domaine de la station expérimentale de l'Inrat Iaâfareg à Bêjà au nord-ouest de la Tunisie dans un étage bio-climatologique sub-humide, et caractérisée par un sol de texture argileuse (52 % d'argile, 23 % de limon et 25 % sable), en vue du semis de la culture du blé.

Le dispositif expérimental comprend :

- un facteur étudié à trois niveaux : itinéraire technique, avec :
 - traitement T1 : itinéraire traditionnel utilisant les outils suivants : une charrue à 3 socs réversibles + un cover crop + une herse + un semoir + un rouleau ;
 - traitement T2 : itinéraire simplifié utilisant les outils suivants : un chisel à dents + une rotoherse + un semoir + un rouleau ;
 - traitement T3 : itinéraire minimum utilisant les outils suivants : un cover crop + une herse + un semoir + un rouleau ;
- quatre variables mesurées relatives à l'étude de l'évolution du profil cultural du sol :

- l'émiettement superficiel du sol obtenu après lecture de photos d'un cadre de 1 m² quadrillé en 10 x 10 cm posé sur le sol après chaque passage d'outil ; les photos permettent de recenser les mottes selon leurs grandeurs et de distinguer les pourcentages correspondants aux diamètres définis au préalable :

- un pourcentage correspondant aux mottes de diamètre de 0 à 2,5 cm ;
- un pourcentage correspondant aux mottes de diamètre de 2,5 à 5 cm ;
- un pourcentage correspondant aux mottes de diamètre de 5 à 7,5 cm ;
- un pourcentage correspondant aux mottes de diamètre de 7,5 à 10 cm ;
- un pourcentage correspondant aux mottes de diamètre supérieur à 10 cm ;

ces pourcentages seront ensuite transposés sur un graphique en repère orthonormé.

- la densité apparente déterminée à la suite des mesures du poids spécifique apparent sec du sol, sur des échantillons prélevés à l'aide de cylindre de volume connu, tous les 5 cm sur une profondeur de 25 cm, et dont on obtiendra ensuite le poids sec ;
- le profil d'humidité mesuré à la suite de prélèvements d'échantillons du sol tous les 5 cm sur une profondeur de 25 cm et qui permet de renseigner sur la teneur en eau présente dans le sol ;
- la résistance à la pénétration d'une pointe dans le sol obtenue au moyen d'un pénétromètre com-

portant un embout conique ayant environ 12,73 cm² de surface et ce en procédant par enfoncement régulier et par lecture directe ; les valeurs obtenues, mesurées tous les 5 cm à une profondeur de 25 cm, sont traduites en valeurs de pression après étalonnage de l'appareil.

Le dispositif expérimental, réalisé sur des parcelles élémentaires en trois répétitions et en trois blocs aléatoires, comprend une parcelle témoin sans intervention préalable et envisage des prélèvements à trois périodes différentes : un prélèvement après le semis et le roulage, un prélèvement au milieu du cycle cultural de la plante et un prélèvement avant la récolte.

L'état initial de la parcelle avant travail du sol est caractérisé par une densité apparente moyenne de 1,204 g/cm³, une teneur en eau pondérale de 14,92 % et une résistance à la pénétration moyenne de 12,18 kg/cm² sur l'horizon allant de 0 à 25 cm.

Résultats et discussion

Le classement des mottes de surface selon leur grosseur relevé après intervention des outils des trois traitements T1, T2, T3, illustre les changements apportés sur le profil de surface du sol (figure 1) et enregistre la présence d'un pourcentage important de terre fine de diamètre inférieur à 2,5 cm par rapport à la quantité globale des mottes.

L'état de surface résultant de la succession des outils du traitement T1 comporte un pourcentage de mottes de diamètre supérieur à 7,5 cm plus élevé. Toutefois, on note l'évolution lente et progressive de l'ameublissement superficiel provoqué par les quatre opérations.

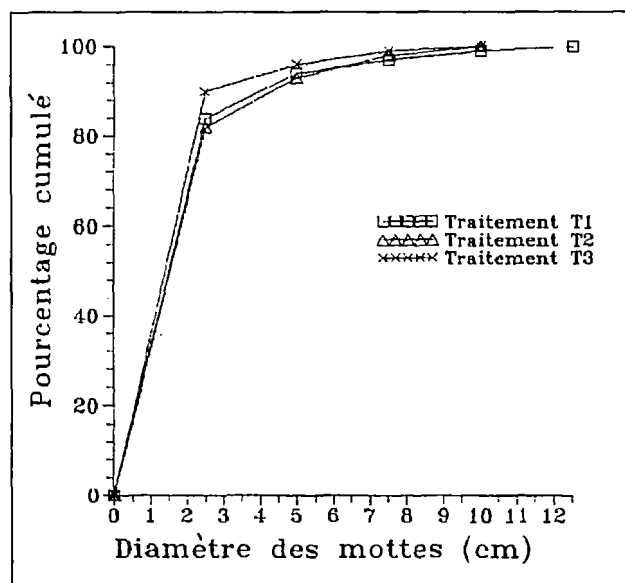


Figure 1. Effet des trois traitements T1, T2, T3, sur l'émiettement superficiel du sol.

Des différences sont signalées notamment entre l'état de surface du traitement T2 et T3. En effet, le traitement T3 se distingue par l'accroissement de l'émiettement du sol dû aux effets des disques. Par ailleurs, l'effet de fendillement occasionné par les dents du chisel (traitement T2) et la vibration des dents du vibroculteur ont favorisé le triage des mottes et de la terre fine et essentiellement, l'accumulation de mottes de diamètre moyen variant de 2,5 à 7,5 cm.

L'analyse du profil densimétrique moyen des trois traitements T1, T2 et T3 au cours des trois périodes de prélèvements (figures 2, 3, 4) relève les modifications produites sur le profil après succession des outils des trois itinéraires techniques adoptés et démontre qu'elles dépendent du type d'intervention et des caractéristiques particulières de chaque outil de labour. Des différences significatives entre les trai-

tements, et par rapport au profil témoin, sont nettement apparues.

Le profil moyen de la densité apparente des trois traitements, relevé après semis, tend à s'accroître progressivement au fur et à mesure que la profondeur augmente, ceci se traduit par une régression de la porosité au fond du profil. L'itinéraire technique T1 présente un profil acceptable et suffisamment poreux comparativement aux profils des traitements T2 et T3 qui ont tendance à augmenter et créer ainsi une faible porosité au fond du profil.

Le comportement du profil densimétrique moyen, étudié au milieu du cycle cultural, présente une amélioration de la porosité par rapport au premier prélèvement, mais aussi, met en évidence des variations appréciables selon les traitements. Toutefois, il semble que, conjointement aux effets des traitements, les conditions climatiques et la présence de la culture ont favorisé l'amélioration du profil obtenu. A cet égard, il importe d'enregistrer la porosité observée sur le profil du traitement T3. Cette porosité provient, semble-t-il, des alternances climatiques qui se manifestent facilement dans les couches superficielles et du comportement des terres argileuses qui gonflent par suite de l'humidité. Néanmoins, les variations de pression enregistrées au pénétromètre rendent compte des différences de masse volumique observées à cette période. En effet, la pression superficielle a tendance à diminuer quand la masse volumique du sol se réduit, ceci étant signalé aux traitements T1 et T3, il en résulte un compactage du sol plus faible.

Les variations occasionnées sur le profil densimétrique moyen avant récolte, ne concernent que T2 et T3 présentant quelque irrégularité sur la couche de 0 à 10 cm. Toutefois, on enregistre, par ailleurs, une augmentation de la densité apparente se traduisant

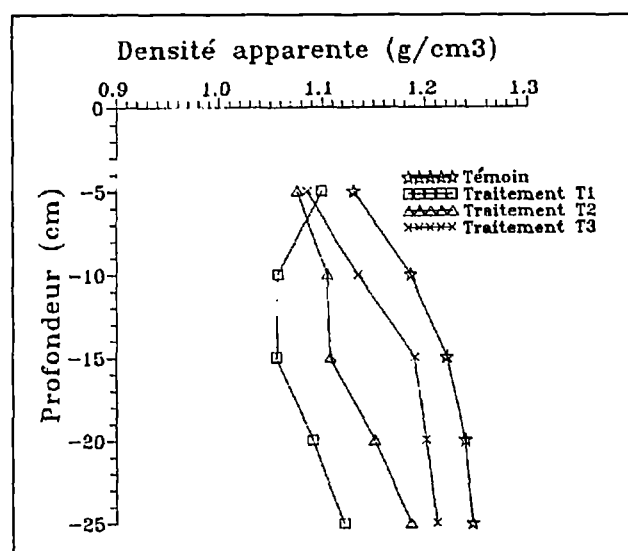


Figure 2. Profil moyen de la densité apparente des trois traitements T1, T2, T3, après semis.

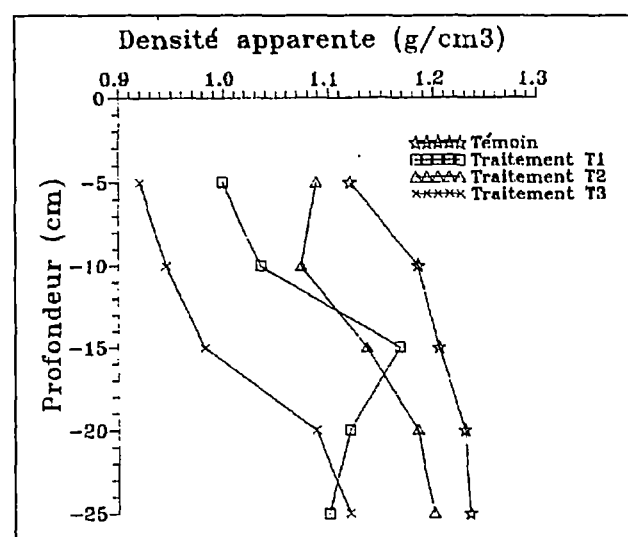


Figure 3. Profil moyen de la densité apparente des trois traitements T1, T2, T3, au milieu du cycle cultural.

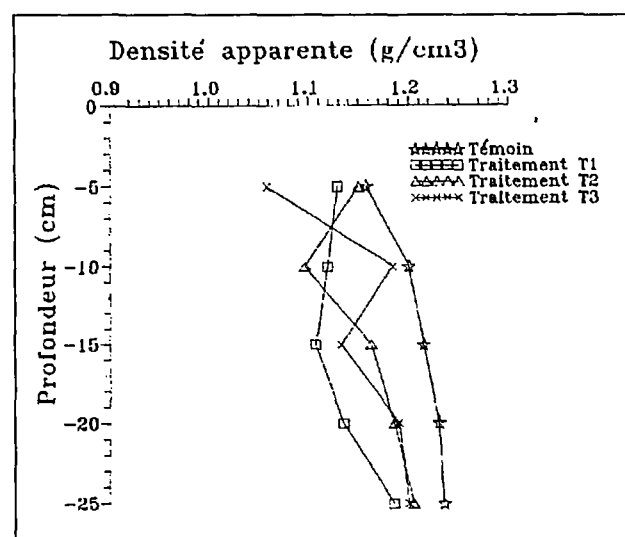


Figure 4. Profil moyen de la densité apparente des trois traitements T1, T2, T3, avant récolte.

par une décroissance de la porosité, avec une légère différence constatée sur le profil du traitement T1.

Le profil densimétrique moyen a été caractérisé par plusieurs situations variables durant le cycle de développement de la plante. Sous l'influence du climat et du développement racinaire de la plante, il a été signalé, à partir des conditions d'installation de la culture, une évolution croissante de la porosité correspondant à la période optimum de développement de la plante, et qui se manifeste par la suite sous l'effet des conditions climatiques, par une décroissance de la porosité signalée avant la récolte.

Le comportement du profil hydrique moyen des trois traitements T1, T2, T3, relevé à trois périodes différentes (figures 5, 6, 7), évolue dans le même sens et ne présente que des différences légèrement significatives entre les traitements et le profil témoin.

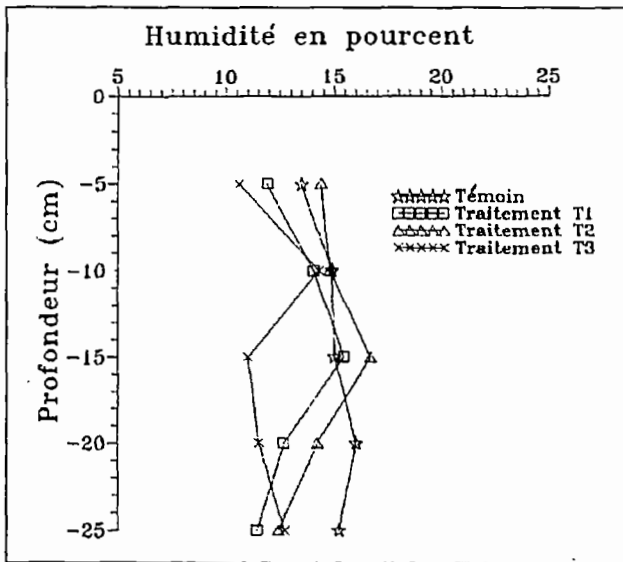


Figure 5. Profil moyen de l'humidité des trois traitements T1, T2, T3, après semis.

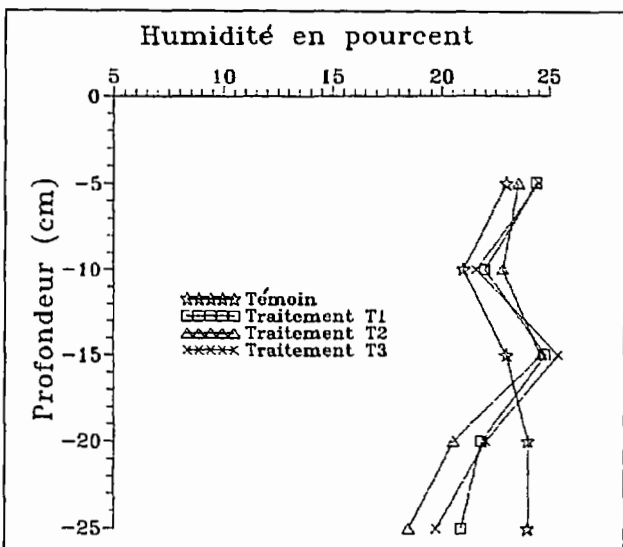


Figure 6. Profil moyen de l'humidité des trois traitements T1, T2, T3, au milieu du cycle cultural.

Le profil hydrique relevé après semis est situé entre des valeurs de 10 à 15 % et reste très proche de la teneur en eau moyenne de l'état initial. Le profil a tendance à augmenter progressivement jusqu'à la profondeur de 15 cm puis on enregistre une décroissance qui atteint la profondeur de 25 cm.

Sous l'effet des précipitations relevées avant le second prélèvement, la teneur en eau s'est considérablement améliorée et on observe un profil d'humidité qui se situe entre 20 et 25 %. Les différences entre traitements et profil témoin demeurent non exagérées et les profils ont tendances à se rapprocher.

L'humidité conservée à la fin du cycle cultural semble être insuffisante, essentiellement sur la couche superficielle, et a tendance à s'accroître au fur et à mesure que la profondeur augmente mais dans tous les cas elle ne dépasse pas la valeur de 14 %. Ceci est dû au manque de précipitations signalées à la fin du cycle.

Le profil pénétrométrique moyen obtenu après intervention des outils des trois traitements T1, T2, T3 (figures 8, 9, 10), rend compte de l'impact des outils sur le sol par rapport au profil témoin. Le profil après semis enregistre des accroissements de la résistance à la pénétration au fur et à mesure que la profondeur augmente. On dénote une légère différence entre le profil du traitement T1 et les traitements T2 et T3. Par contre, on constate des différences significatives entre le profil témoin et les trois traitements. La résistance à la pénétration ne semble pas être exagérée sur la couche de 0 à 15 cm pour les traitements T2 et T3. Toutefois, on signale au-delà de 15 cm, une couche plus compacte et dure se rapprochant de l'état initial.

Le profil relevé au milieu du cycle cultural varie dans les mêmes circonstances que le premier prélèvement, et révèle la présence d'un profil homogène et croissant avec l'augmentation de la profondeur de travail des

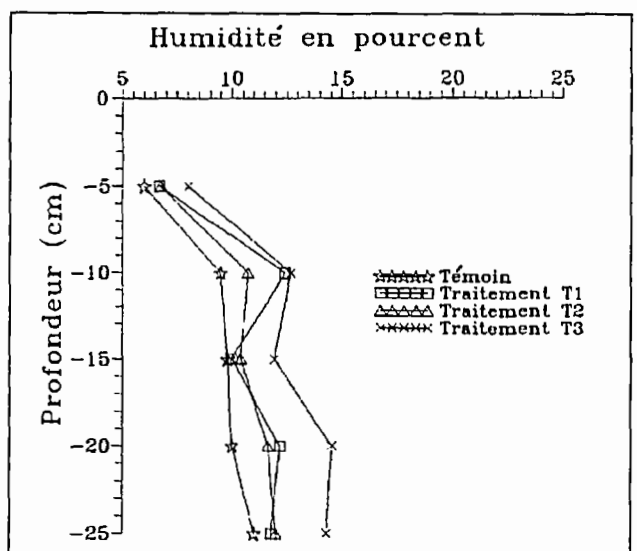


Figure 7. Profil moyen de l'humidité des trois traitements T1, T2, T3, avant récolte.

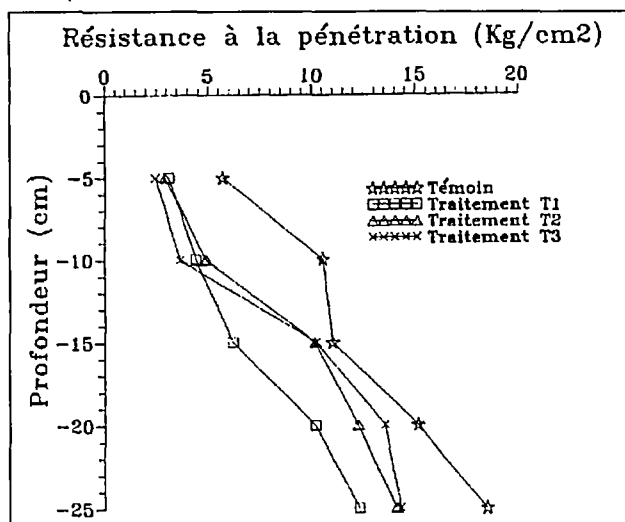


Figure 8. Profil moyen de la résistance à la pénétration des trois traitements T1, T2, T3, après semis.

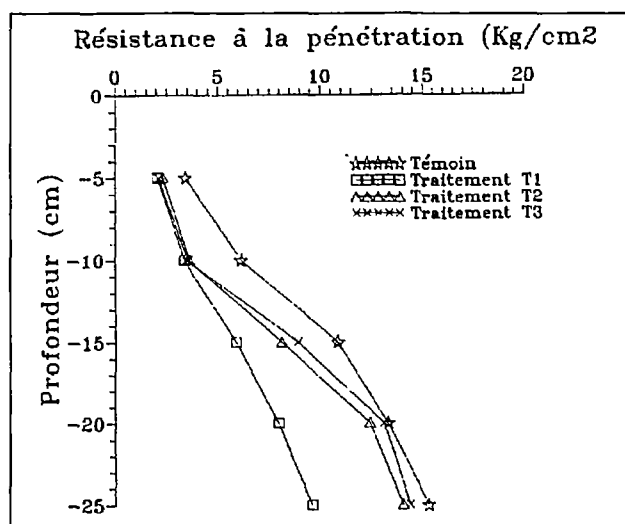


Figure 9. Profil moyen de la résistance à la pénétration des trois traitements T1, T2, T3, au milieu du cycle cultural.

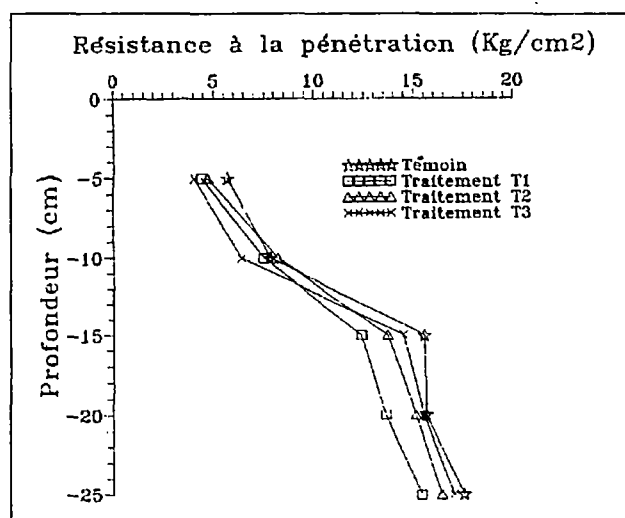


Figure 10. Profil moyen de la résistance à la pénétration des trois traitements T1, T2, T3, avant récolte.

outils. Une nette réduction de la résistance est observée sur la couche profonde du traitement T1, toutefois, on ne remarque aucun changement du profil à travers les traitements T2 et T3 ainsi que sur le profil témoin, le profil reste homogène comparativement au premier prélèvement.

Les mesures relevées avant récolte, démontre la présence d'une structure du sol plus compacte et résistante tout le long des profils étudiés pour les trois traitements T1, T2 et T3 par comparaison aux prélèvements précédents. L'influence du climat sur le sol, notamment l'absence prolongée des précipitations, a pour conséquence d'accroître la résistance à la pénétration. Des différences sont enregistrées essentiellement dans les couches profondes qui par rapport au profil témoin n'apportent pas des améliorations constatées. Le profil du traitement T1 conserve une légère réduction de la résistance à la pénétration tout le long du profil.

Conclusion

Au terme de ce travail expérimental, il apparaît que le labour avec retournement du sol et l'utilisation des outils qui le succèdent, modifie favorablement la structure du sol par l'amélioration du profil hydrique, pénétrométrique et densimétrique. Le labour sans retournement du sol occasionne des améliorations sur la couche supérieure de la structure du sol et laisse un couvert végétal en surface. Le retournement superficiel ne modifie que le profil superficiel du sol exploité par la plante et ameublisse la terre en surface.

Après analyse des résultats obtenus, les constatations que l'on peut avancer, suite à l'expérimentation des itinéraires techniques, mettent en évidence l'importance du labour avec retournement du sol, pratiqué en assolement biennal ou triennal, afin d'apporter des améliorations et des modifications du profil de la structure du sol.

Références bibliographiques

- AUBERTIN F.M., KARDOS L.T., 1965. Root growth through porous media under controlled conditions. Soil sc. soc. of Am. Proceedings, vol 29, mai-juin.
- AUBINEAU M., BILLOT J.-F., 1973. compte rendu de la session de perfectionnement de grignon sur les outils de travail du sol. Études du Cneema n° 385.
- BILLOT J.-F., 1982. Les applications agronomiques de la pénétration à l'étude de la structure des sols travaillés - Science du soi - Vol 3.
- BILLOT J.-F., 1973. Méthodes utilisées pour caractériser l'action d'un outil sur le sol. Études du Cneema n° 385.

BOIFFIN J., MARIN LAFLECHE A., 1990. La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Les colloques de l'INRA n° 53.

CALLOT G., 1984. Structure pédologique et fonctionnement du sol en relation avec la production végétale. Science du sol, vol n° 2.

CURMI P., 1988. Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Science du sol, vol 26/3.

DALLEINNE E., 1980. Les façons du travail du sol. Études du Cneema n° 428.

MANICHON H., - Les objectifs de travail du sol. Fermes modernes (hors série).

MONNIER G., THEVENET G., LESAFFRE B., 1991. Simplification du travail du sol. Les colloques de l'INRA n° 65.

SEBILLOTTE M., DALLEINNE E., RECAMIER A., 1971. Travail du sol et culture de maïs. BTI du Cneema n° 264-265.

Effets des opérations de préparation du lit de semences et de semis sur la structure de la couche labourée

G. RICHARD, H. BOIZARD

Inra, Unité d'agronomie de Laon-Péronne, rue Fernand Christ, 02007 Laon Cedex, France

Résumé : L'objectif de l'étude est d'analyser les effets des conditions d'intervention lors des opérations de travail du sol et de semis (humidité du sol et types des pneumatiques) sur la structure de la couche labourée, en décrivant à la fois les processus de compactage et de fragmentation. Les données proviennent d'un essai pluriannuel mis en place à l'Inra (Somme). Trois systèmes de culture induisant des risques de tassement de la couche labourée sont comparés depuis 1989. Ils se distinguent par une grande variabilité des conditions d'intervention, notamment en terme de profil hydrique au moment des différentes interventions culturales. Seules les données concernant le compactage lors de la mise en place des cultures de printemps sont présentées. L'humidité de la couche labourée a été mesurée au moment de chaque intervention. Le degré de compactage de la couche labourée a été caractérisé après le semis. Le volume poral structural et la proportion de zones « delta » ont été estimés dans chaque compartiment de l'horizon étudié. Les résultats montrent des degrés de compactage de la couche labourée très variables. La diminution linéaire de la porosité structurale avec l'humidité au moment du compactage est d'autant plus importante que la pression des pneumatiques est élevée et que la couche de sol considérée est proche de la base du lit de semences, elle varie peu, à une profondeur donnée, en fonction de l'humidité des couches de sol supérieures. L'ensemble des résultats a été confronté aux données de la littérature concernant la déformation des matériaux et la transmission des contraintes dans le sol.

La difficulté de prévoir au champ l'effet des conditions d'intervention sur l'état structural résultant d'une opération culturale fait que les règles de décision en matière de travail du sol et de semis restent empiriques. Deux processus interviennent lors d'un travail du sol : le compactage, essentiellement lié au passage des pneumatiques de l'engin agricole, et la fragmentation essentiellement liée à l'action des pièces travaillantes de l'outil. Les notions mécaniques mises en jeu lors d'un travail du sol sont complexes et il y a une grande variabilité des facteurs qui sont à prendre en compte. Pour ce qui est du compactage,

son intensité au sein d'une couche de sol résulte de l'importance de la contrainte exercée à la surface du sol, de la transmission de cette contrainte dans la couche de sol et enfin de la déformation du sol en chaque point selon la contrainte qu'il subit. La déformabilité des sols en fonction de leurs caractéristiques physiques (texture, teneur en matière organique, humidité...) a fait l'objet de nombreux travaux. Par contre, la transmission des contraintes dans le sol et l'effet des caractéristiques des engins agricoles sur le niveau de la contrainte exercée à la surface du sol sont beaucoup moins connus. Beaucoup de modèles sont basés sur les lois établies par Boussinesq (1885) qui considèrent le sol comme sur un milieu semi-infini, homogène, isotrope et continu. Leur domaine de validité, dans les conditions de la pratique agricole, reste à définir. Guérif (1984), par exemple, a montré que des gradients de teneur en eau ou d'état structural au sein de la couche labourée pouvaient influencer sur l'intensité du compactage. D'autre part, peu de travaux prennent en compte l'aspect spatial du compactage, alors que la géométrie des volumes compacts est importante à considérer pour la prévision de la mise en place du système racinaire ou pour la prévision des arrière-effets du compactage, notamment sur la fabrication du lit de semences pour la culture qui suit. Pour ce qui est de la fragmentation, les variations de résistance en traction d'un sol en fonction de ses caractéristiques sont connues, mais l'effet d'un passage d'outil sur la distribution de la taille des fragments l'est beaucoup moins.

L'objectif de l'étude était donc d'analyser les effets des conditions d'intervention lors des opérations de travail du sol et de semis sur la structure de la couche

labourée, en cherchant à décrire à la fois les processus de compactage et de fragmentation. Les conditions d'intervention ont varié en fonction de l'humidité du sol et des types de pneumatiques. Seul le compactage de la couche labourée sera analysé dans ce papier. Il a été caractérisé à la fois par la porosité structurale mesurée au centre des roues de tracteur et par le volume de sol d'état interne, comme défini par Manichon (1987) à l'aplomb des roues. Les données proviennent d'un essai pluriannuel mis en place sur le domaine expérimental Inra à Mons en Chaussée (Somme) dont l'objectif est de caractériser l'évolution à moyen terme de la structure de la couche labourée en fonction des systèmes de culture (Boizard *et al.*, 1994).

Matériels et méthodes

Site expérimental

Un essai pluriannuel a été mis en place en 1989 dans le nord de la France (Péronne, 50°N latitude, 3°E longitude, 85 m altitude). Le sol est un limon (*Typic Hapludalf, Luvisol Orthique*) avec un pH de 7,6. Il contient en moyenne 190 g argile kg⁻¹, 738 g limon kg⁻¹, 50 g sable kg⁻¹, 17 g matière organique kg⁻¹ et 5 g CaCO₃ kg⁻¹. La teneur en eau est respectivement de 0,252 g g⁻¹ à -10, 0,213 g g⁻¹ à -50, et 0,164 g g⁻¹ à -100 kPa. Trois systèmes de culture sont mis en comparaison :

- un système de culture I avec une rotation pois - blé d'hiver - colza - blé d'hiver. Dans ce système, les semis et les récoltes ont lieu en été ou tôt à l'automne, c'est-à-dire lors de périodes plutôt sèches de l'année (excepté pour le semis de pois réalisé tôt au printemps) ;
- les systèmes de culture II et III avec une rotation betterave à sucre - blé d'hiver - maïs - blé d'hiver ; le système de culture II est conduit de façon à limiter le compactage lors des semis et des récoltes, par l'application de règles d'intervention évitant les interventions en conditions humides ; le système de culture III est conduit de façon à maximiser l'interception de la lumière par la betterave à sucre et le maïs : les semis et les récoltes de la betterave et du maïs sont réalisés respectivement tôt au printemps ou tard à l'automne, durant des périodes humides de l'année.

Chaque culture est présente chaque année dans les trois systèmes, ce qui donne 12 traitements expérimentaux. Le dispositif expérimental est constitué de deux blocs, soit 24 parcelles de 0,40 ha chacune. La grande taille des parcelles expérimentales permet d'utiliser du matériel de grande culture, comparable à ce qu'on trouve dans les exploitations agricoles. Un labour de 25-30 cm de profondeur est réalisé chaque

année. Dans ce compte-rendu, nous avons utilisé les données collectées au printemps lors de la préparation des lits de semences et des semis de pois, maïs et betterave de 1989 à 1994. Une expérimentation complémentaire a eu lieu au printemps 1994 pour élargir la gamme de variation de l'humidité du sol au moment de la reprise du labour vers les conditions très humides. Six interventions ont été réalisées au cours d'une séquence de ressuyage, la première intervention étant réalisée très peu de temps après une pluie, sur un sol très humide (potentiel hydrique de -5 kPa).

Les caractéristiques des interventions culturales sont décrites dans le tableau I. Elles diffèrent essentiellement par la pression de gonflage et la largeur des pneumatiques, la vitesse d'avancement et le poids des engins sont beaucoup moins variables. Nous les avons regroupées en trois types de chantier :

- la préparation du sol avec pneus larges et pression de gonflage entre 60 et 80 kPa (W70 kPa) ;
- la préparation du sol avec pneus larges et pression de gonflage de 160 kPa (W160 kPa) ;
- les semis de maïs et betteraves avec pneus étroits et une pression de gonflage comprise entre 200 et 250 kPa (N220 kPa).

Tableau I. Principales caractéristiques des interventions culturales.

	Nature de l'opération culturale	
	Préparation du sol	Semis
Tracteur	Case IH 956	Fiat 780, Mf 575
Poids (kg)	5 500	3 400-4 500
Vitesse (km h ⁻¹)	6-8	5-6
Largeur des pneumatiques arrière (cm)	65	30 (betterave à sucre) ou 40 (maïs)
Pression de gonflage des pneumatiques (kPa)	70 (60-80) ou 160	220 (200-250)
Outil	Outil combiné (betteraves à sucre et maïs), herse animée (pois)	12 rangs (betteraves), 4 rangs (maïs), 3 m, semis combiné (pois)

Mesures

L'unité expérimentale est la parcelle de 0,40 ha. Au moment de chaque intervention, chaque parcelle a été caractérisée par une cartographie des passages de roues, un profil hydrique et un profil de masse volumique dans la couche labourée, un profil cultural, une distribution des tailles de mottes dans le lit de

semences. L'humidité gravimétrique de la couche labourée a été mesurée avant chaque intervention culturale entre 0 à 25 cm de profondeur, avec un pas de mesure de 5 cm (4 répétitions au hasard par parcelle). La masse volumique a été mesurée à 10 et 20 cm de profondeur au centre des passages de roues avec une sonde gammamétrique (4 répétitions au hasard par parcelle). La porosité structurale a été estimée à partir des mesures de masse volumique, et des mesures de porosité texturale et de masse volumique de solide réalisées au laboratoire. Un profil cultural de 3 m de large a été réalisé après le semis de chaque culture, en mai ou juin, selon la méthode Manichon (1987). L'emplacement du profil a été choisi de façon à prendre en compte deux traces de roues liées à la préparation du sol et une trace de roues liée au semis. Le compactage du sol a été étudié dans l'horizon de labour non repris lors de la préparation, appelé horizon H5. Le profil cultural est divisé en fonction de la présence et de l'origine des roues de tracteur (Manichon, 1987). Il a été analysé selon la méthode de Coulomb (1992). Les zones avec une structure massive et sans porosité visible à l'oeil, appelées zones Δ , sont délimitées en relief sur le terrain et des photographies sont prises à 1 m de distance du profil tous les 6,5 cm en se déplaçant parallèlement au profil. Le profil cultural est ensuite reconstitué à la main, au laboratoire, à partir des photos et avec l'aide d'un stéréoscope. Les documents ainsi obtenus peuvent être traités avec un système d'analyse d'image. Celui-ci permet de connaître l'emplacement, la surface, la hauteur et la largeur des zones Δ . L'intensité du compactage a été caractérisée par le pourcentage de la surface se situant juste sous les roues et appartenant à l'horizon de labour non repris ayant une structure massive sans porosité visible à l'oeil et en contact avec la base du lit de semences. Ce pourcentage a été calculé soit sur l'ensemble de la couche labourée non reprise, soit sur des couches de 10 cm d'épaisseur sous le lit de semences. L'épaisseur du lit de semences est de 5 à 8 cm, l'épaisseur de la couche labourée non reprise est de 27 à 32 cm.

Les parcelles pour lesquelles la structure de la couche labourée avant les façons superficielles était très hétérogène, parcelles caractérisées par la présence de grosses mottes compactes ayant un diamètre supérieur à 10 cm qui résultent d'un compactage antérieur à l'intervention, n'ont pas été prises en compte. Nous avons travaillé au total sur 50 situations pour les pneus larges gonflés à 70 kPa, 12 situations pour les pneus larges gonflés à 160 kPa et 20 situations pour les pneus étroits gonflés à 220 kPa.

Résultats

Un exemple des différentes formes de profil hydrique obtenues au printemps lors des interven-

tions culturales est donné sur la figure 1. Les interventions culturales ont toujours eu lieu sur un sol en phase de ressuyage (par opposition à la phase de réhumectation), avec une teneur en eau des dix premiers centimètres toujours inférieure ou égale à celle des horizons sous-jacents. Les variations de teneur en eau de la couche labourée se font essentiellement par évaporation. Les profils hydriques homogènes correspondent à des conditions très humides (potentiel hydrique de l'ordre de -5 kPa), obtenues lors d'interventions ayant eu lieu peu de temps après des fortes périodes pluvieuses.

Sur la figure 2 sont présentées les relations entre l'humidité moyenne entre 5 et 15 cm de profondeur au moment de l'intervention et la porosité structurale à 10 cm de profondeur (figure 2a) ou le pourcentage de zones Δ au sein de la couche de 10 cm d'épaisseur sous le lit de semences (figure 2b). Malgré une variabilité assez importante, il apparaît que (1) plus l'humidité au moment de l'intervention est élevée, plus la porosité structurale est faible et plus le pourcentage de zones Δ est élevé, (2) à une humidité donnée, la porosité structurale est d'autant plus faible et le pourcentage de zones Δ d'autant plus élevé que la pression de gonflage des pneumatiques est forte. Les valeurs les plus basses atteintes par la porosité sont proches de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, les valeurs les plus fortes atteintes par le pourcentage de zones Δ sont proches de 100, valeurs qui correspondent à des compactages sévères de la partie supérieure de la couche labourée.

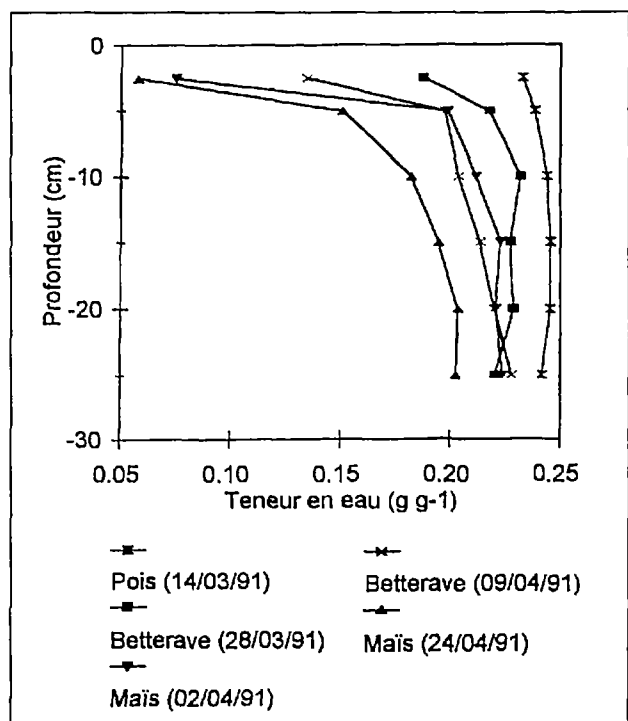


Figure 1. Profils hydriques mesurés lors des interventions culturales au printemps 1991 sur l'essai pluriannuel de Mons en Chaussée.

Sur la figure 3 sont présentées, dans le cas des pneus larges à une pression de 70 kPa, des relations similaires à celles de la figure 2 pour deux niveaux de profondeur au sein de la couche labourée : la couche 5-15 cm (figure 3a) et la couche 15-25 cm (figure 3b). L'allure des relations est la même quelle que soit la couche considérée. A une humidité donnée, la porosité structurale est plus élevée et le pourcentage de zones Δ plus faible pour la profondeur la plus grande. Pour une pression donnée à la surface du sol, la contrainte exercée au sein de la couche labourée est d'autant plus faible que la profondeur est grande.

Sur la figure 4 sont présentées des relations entre l'humidité de la couche 0-5 cm et la porosité structurale à 10 cm (figure 4a) ou le pourcentage de zones Δ au sein de la couche de 10 cm d'épaisseur sous le lit de semences (figure 4b) pour différentes humidités de la couche 5-15 cm. Il apparaît que :

- pour une humidité donnée entre 5 et 15 cm de profondeur, la gamme de variation de l'humidité entre 0 et 5 cm de profondeur est relativement faible (excepté pour la classe 0,21-0,22 g g⁻¹). Ceci est directement relié à la forme des profils hydriques lors des interventions, il existe une relation assez étroite entre les humidités de surface et de profondeur ; cette relation est probablement due au type de sol et à ses propriétés hydrodynamiques, au climat (période de l'année avec des demandes év-

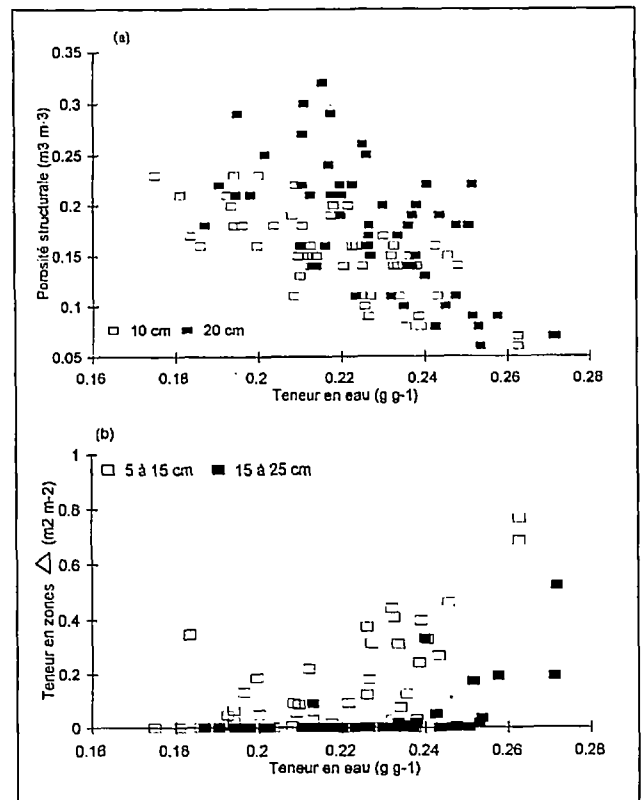


Figure 3. Relations entre l'humidité et la porosité structurale (a) ou le pourcentage de zones Δ (b) en fonction de la profondeur lors d'interventions avec pneus larges et pour une pression de 70 kPa.

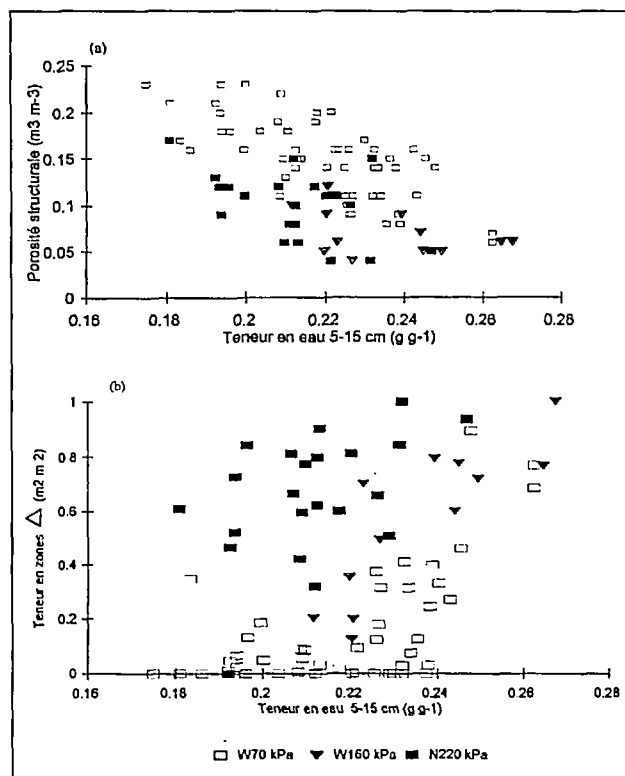


Figure 2. Effet de l'humidité entre 5 et 15 cm sur la porosité structurale à 10 cm (a) ou le pourcentage de zones Δ dans les 10 cm sous le lit de (b) en fonction des caractéristiques des pneumatiques.

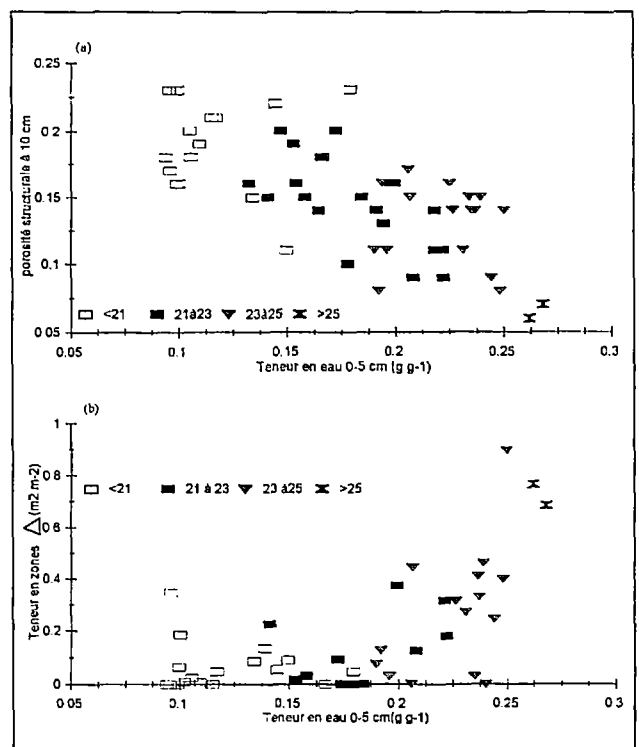


Figure 4. Effet de la teneur en eau des cinq premiers centimètres sur la porosité structurale à 10 cm (a) ou sur le pourcentage de zones Δ dans les 10 cm sous le lit de semences (b) pour différentes classes d'humidité de la couche 5-15 cm.

poratives relativement faibles) et à la nature du régime hydrique de la couche labourée au printemps, à savoir le ressuyage, qui fait que le sol est toujours plus humide en profondeur qu'en surface, sauf éventuellement immédiatement après de faibles pluies sur un sol déjà bien ressuyé ;

- la variation de la porosité structurale à 10 cm de profondeur, ou du pourcentage de zones Δ , en fonction de l'humidité des cinq premiers centimètres du sol est visible pour des humidités comprises entre 0,21 et 0,24 g g⁻¹.

Sur la figure 5 sont présentées les relations entre l'humidité moyenne de l'horizon H5 (5-25 cm de profondeur) et l'épaisseur (figure 5a) ou la largeur (figure 5b) maximales des zones Δ à l'aplomb des roues. L'accroissement des zones Δ , lorsque l'humidité du sol au moment du compactage augmente, se fait à la fois en profondeur et en largeur. Malgré une variabilité assez forte, il apparaît qu'à une humidité donnée, la profondeur et la largeur des zones Δ est d'autant plus importante que la pression des pneumatiques est élevée. La largeur maximale des pneumatiques est plus rapidement atteinte pour des pneus étroits gonflés avec la plus haute pression que pour les pneus larges.

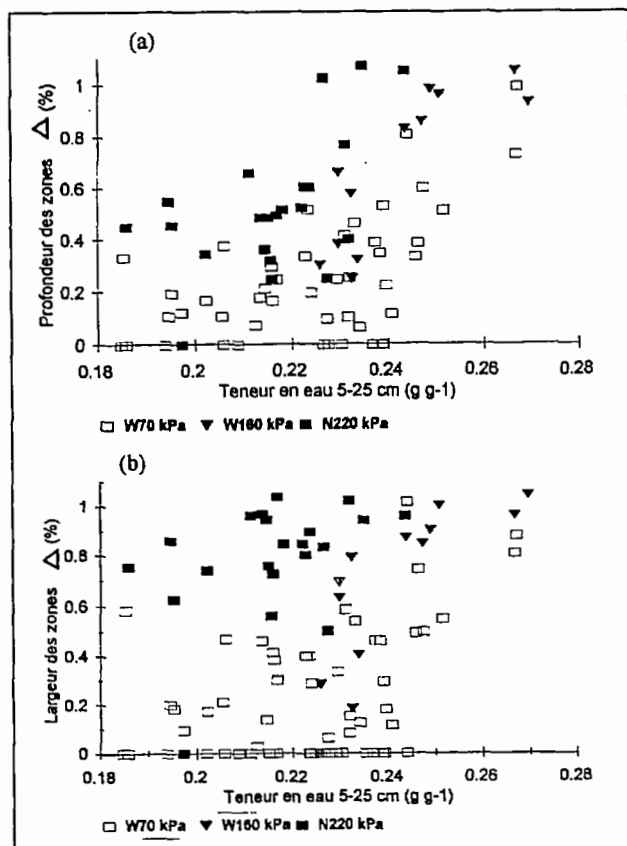


Figure 5. Épaisseur et largeur maximales des zones Δ à l'aplomb des roues en fonction de l'humidité de l'horizon H5. Pour l'épaisseur, les résultats sont exprimés en % de l'épaisseur de l'horizon H5 mesuré sur chaque profil cultural, pour la largeur, les résultats sont exprimés en % de la largeur du pneumatique.

Discussion et conclusion

L'effet de l'humidité du sol sur le compactage lors d'un passage d'engin est multiple et contradictoire. L'humidité joue sur la déformabilité du sol, sur la transmission des contraintes dans le sol, sur la surface de contact sol/pneumatiques, donc sur la pression qui s'exerce à la surface du sol selon la charge sur essieu, et sur la l'hétérogénéité de la répartition des pressions au sein de la surface de contact (Söhne, 1958). Plus le sol est sec, moins il est déformable mais plus la pression qui s'exerce à la surface du sol est grande du fait de la faible surface de contact. Il a été établi, à l'aide de divers tests au laboratoire, que la porosité du sol diminuait pour des humidités et pour des pressions appliquées croissantes, et que les relations humidité/porosité étaient parallèles pour les différentes contraintes, au moins dans le domaine visqueux et pour des contraintes inférieures à 400 kPa (Guérif, 1982). Les résultats obtenus, malgré leur forte variabilité, apparaissent similaires aux résultats obtenus en conditions contrôlées, suggérant que c'est avant tout la déformabilité du matériau qui définirait l'intensité du compactage obtenu au champ, au moins si l'on est proche de la surface du sol. La disparition de la porosité structurale interviendrait pour des humidités comprises entre 0,22 et 0,26 g g⁻¹, avec des pressions de 60 à 220 kPa. D'après Guérif (1982), la disparition de la porosité structurale, pour un sol à 300 g kg⁻¹ d'argile et dans une gamme de pressions appliquées comprises entre 100 et 400 kPa est obtenue pour des humidités pondérales comprises entre 0,16 et 0,25 g g⁻¹, soit pour une gamme d'humidité proche de celle obtenue au champ. Les courbes de déformation du sol étudié devront être établies pour conforter cette analyse.

L'effet de la profondeur correspond à une atténuation de la pression dans le sol avec la profondeur : la pression qui s'exerce à 20 cm est plus faible que celle qui s'exerce à 10 cm. En effet, d'après Söhne (1958), la pression qui s'exerce à une profondeur donnée est inversement proportionnelle au carré de la profondeur. Cependant, si cet effet était le seul en cause, on obtiendrait des courbes humidité/porosité qui seraient parallèles pour différentes profondeurs. Le fait que dans nos conditions expérimentales, les porosités obtenues après compactage en conditions très humides soient similaires pour les deux profondeurs considérées suggère que l'humidité modifie aussi la transmission des contraintes dans le sol : le sol humide transmettrait mieux la pression en profondeur, en accord avec les résultats de Frölich (1934). Ce résultat serait en accord avec celui obtenu concernant l'effet de l'humidité des premiers centimètres du sol sur le compactage de la couche sous-jacente. Malgré la forte corrélation que l'on a obtenue entre l'humidité des premiers centimètres du sol et celle de

la couche sous-jacente, nos résultats semblent indiquer que l'intensité du compactage à une profondeur donnée dépend de l'humidité de la couche de sol qui lui est supérieure.

Les effets globaux de l'humidité du sol, de la pression des pneumatiques et de la profondeur sur les variations de la porosité structurale que l'on a obtenus sont donc conformes à ceux de la littérature. L'effet de l'humidité sur la déformabilité du matériau semble prépondérant, mais son effet sur la transmission des pressions dans le sol pourrait expliquer en partie la variabilité des résultats obtenus. Une analyse plus poussée suppose de disposer des courbes de déformation du sol considéré et de confronter nos résultats à ceux issus d'un modèle de compactage comme celui de Smith (1985) par exemple.

Les effets des différents facteurs étudiés sont similaires que l'on considère la porosité structurale ou le pourcentage de zones Δ d'une couche donnée : le critère morphologique que constitue le pourcentage de zones Δ réagit de manière conforme aux différentes contraintes appliquées au sol. On dispose donc d'un indicateur du volume de sol concerné par une certaine intensité de compactage. On a montré que l'extension des zones compactées se faisait simultanément en profondeur et en largeur lorsque l'humidité au compactage augmente. Le volume de zones Δ correspond à une cartographie des couples humidité/pression qui provoquent la disparition du volume poral structural, cartographie qui pourrait être un moyen de caractériser la transmission des pressions dans l'espace, pour certaines conditions hydriques.

L'ensemble de ces résultats permet de mieux définir la relation conditions d'intervention/état structural de la couche labourée suite aux opérations de préparation du lit de semences et de semis et donc de prévoir la porosité structurale ou la proportion de zones Δ

dans la couche labourée en fonction de l'humidité au moment de l'intervention pour certains types de chantiers. Il devrait aussi permettre de tester des modèles de compactage, qui s'ils s'avéraient opérationnels, pourraient permettre d'étendre les résultats obtenus à d'autres types de chantiers, voire à d'autres types de sol.

Références bibliographiques

- BOIZARD H., RICHARD G., GUERIF J., BOIFFIN, J., 1994. Effects of harvest and tillage operations on soil structure. Proceedings 13th International ISTRO Conference, 24-29 July, 1994, Aalborg, p. 19-24.
- BOUSSINESQ J., 1885. Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Gauthiers-Villars, Paris, France, 30 p.
- COULOMB I., 1992. Analyse quantitative du comportement du sol au labour : rôle de l'état structural initial. Thèse INA-PG, Paris 2, 230 p.
- GUERIF J., 1982. Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 2 : 287-294.
- GUERIF J., 1984. The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. *J. Agric. Engng. Res.*, 29 : 367-374.
- MANICHON H., 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. In G. Monnier and M.J. Goss (Eds). *Soil Compaction and Regeneration*, Balkema, Rotterdam, p. 39-52.
- SMITH D.L.O., 1985. Compaction by wheels : a numerical model for agricultural soils. *Journal of Soil Science*, 36 : 621-632.
- SÖHNE W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering*, 39 : 276-281, 290.

Préparation des sols de rizière en fin de saison des pluies pour une remise en culture immédiate

Abdul ROZAQ

Faculté de technologie agricole, Université de Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonésie

Résumé : En Indonésie, le type de climat à deux saisons des pluies, joue un rôle essentiel sur les pratiques culturales des paysans et, en particulier, sur la mise en culture de *palawija*¹ en triple cultures. A la fin de la saison des pluies, les paysans doivent attendre plusieurs semaines avant de semer en raison de l'humidité excessive du sol. Ce laps de temps, très variable, est fonction du type de climat, de la structure du sol et de la présence ou non d'un système de drainage en profondeur. Ce décalage dans le temps crée de nombreux problèmes tels que le dérèglement du calendrier d'irrigation et peut induire des risques de maladies, de déficit hydrique, de dégâts dus à la pluie au moment de la récolte, etc. Pour permettre aux paysans de semer sans risques d'humidité excessive tout en maintenant une réserve d'eau excédentaire utile pour le développement initial du *palawija*, un équipement simple a été mis au point. Il consiste en un mini-tracteur de 14 chevaux équipé avec une draineuse-taupe, une foreuse actionnée par le système hydraulique du tracteur et entraînée par la prise de force, et un dispositif de roues cages pour assurer la mobilité du tracteur dans le sol saturé d'eau. Les résultats d'essais montrent qu'il est possible de pratiquer un drainage-contrôlé dans les rizières ayant des semelles de labour peu profondes. Dans les sols argileux lourds, de nouvelles mesures doivent être faites pour éviter la mise hors service de l'équipement.

Les problèmes de préparation du sol en fin de saison des pluies

Un des problèmes actuels de la riziculture indonésienne est l'incertitude, en fin de saison des pluies, sur la date de semis des *palawija*¹ après une deuxième culture de riz dans un système à trois cycles de culture : riz-riz-*palawija*. Les dates de semis sont très variables en raison du temps d'attente après la récolte du riz,

elle-même très variable. Ce temps d'attente est dû à l'état des sols gorgés d'eau ou parfois complètement submergés qui ne permettent pas aux paysans de préparer les sols et de mettre en place le *palawija*. Ce problème est lié au facteur climatique de type mousson humide (caractérisé par une pluviométrie annuelle relativement constante, mais avec une répartition et une intensité très variables dans le temps et dans l'espace) et à un certain nombre de facteurs comme une structure de sol relativement massive, l'absence d'un système de drainage en profondeur, la présence d'une semelle de labour nécessaire au développement du riz (en opposition aux semelles de labour dans les zones subtropicales), et les conditions de développement différentes pour une autre culture que le riz.

Cette incertitude sur les dates de semis de *palawija*, pose un problème au niveau de la gestion de l'irrigation ; l'eau irriguée doit, en effet, être distribuée de façon précise en quantité et au moment opportun, spécialement dans les rizières ayant des types de sol argileux. De plus, ces variations dans les dates de semis peuvent provoquer le développement de maladies sur le riz et augmenter soit les risques de déficit en eau à la fin du stade de développement des plantes, soit les risques de dégâts causés par la pluie au moment de la récolte du *palawija*. Cependant, les paysans hésitent à réaliser des réseaux de drainage en surface en raison du manque à gagner des surfaces ainsi utilisées (les exploitations ont de faibles surfaces), des problèmes d'inadaptation des machines agricoles, et de l'engorgement rapide de ces réseaux au moment des pluies intenses. Le semis direct de *palawija* ne peut être réalisé qu'après un certain laps de temps, et il arrive aux paysans de semer plusieurs fois pour remplacer des graines ou des jeunes plantules détruites par des pluies encore fréquentes.

1. Le terme *palawija* désigne l'ensemble des cultures hors bas-fond, non inondées et non irriguées.

Concept du drainage contrôlé²

La mise en culture de *palawija* à la fin de la saison des pluies dans un système à trois cultures riz-riz-*palawija* dans les rizières doit être accompagnée d'une solution permettant de réduire le temps de remise en culture après la récolte du deuxième cycle de riz. Cette solution doit pouvoir minimiser l'effet néfaste d'une pluie incertaine, liée au climat tropical de mousson, sur les sols de rizières qui ont en général une très faible conductivité hydraulique. Autrement dit, la solution technique préconisée doit permettre aux paysans de semer plus tôt sans pour autant risquer un mauvais développement des cultures dû à un excès d'eau ou à une inondation par des pluies encore présentes à la fin de la saison pluvieuse. De plus, l'eau excédentaire est en partie utile au début de la saison sèche pour assurer le développement initial du *palawija* qui n'est pas irrigué. Il est donc nécessaire de conserver temporairement cette eau pour le démarrage des plantes en début de culture. A partir de ces constats, le travail de recherche a abouti à un nouveau concept de drainage contrôlé.

L'objectif du drainage contrôlé est de diminuer la teneur en eau dans la couche superficielle (de 5-10 cm en dessous de la surface) pour favoriser la germination des graines de *palawija*, et de conserver une partie de l'eau drainée en profondeur, juste au-dessus de la semelle de labour (25-30 cm), dans des galeries-taupe ou dans un certain nombre de cavités (figure 1). Ce principe ne peut être appliqué que dans le cas de rizières à nappe d'eau relativement peu profonde (au-dessus de la semelle de labour), autrement dit l'eau excédentaire, sur et dans le sol, qui doit être drainée est une nappe d'eau captive.

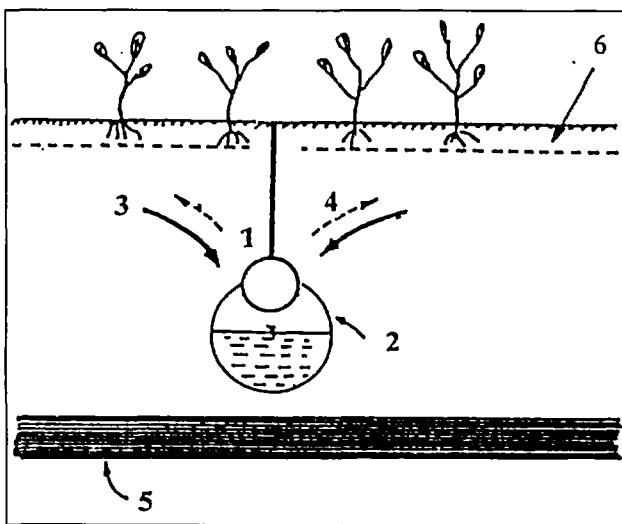


Figure 1. Concept du drainage contrôlé
1. Galerie de drainage-taupe ; 2. cavité de conservation de l'eau drainée ; 3. drainage ; 4. capillarité ; 5. semelle de labour ; 6. couche de sol non saturée.

2. Ce terme correspond au "conserved-drainage" anglais.

La mise en pratique de ce principe n'est évidemment pas facile, en raison d'un sol encore humide, mou, et qui parfois adhère très vite aux équipements et aux systèmes de traction de la cellule motrice. La portance du sol est relativement faible et dépend principalement de la profondeur de la semelle de labour qui se développe naturellement dans un profil de sol de rizière.

Le développement de cette méthode est important, d'une part en raison de l'effort du gouvernement pour diversifier des cultures dans les rizières et d'autre part pour économiser l'eau d'irrigation. La réalisation de cette opération passe par la conception d'un équipement spécial qui puisse fonctionner de manière satisfaisante dans des conditions de sol extrêmes.

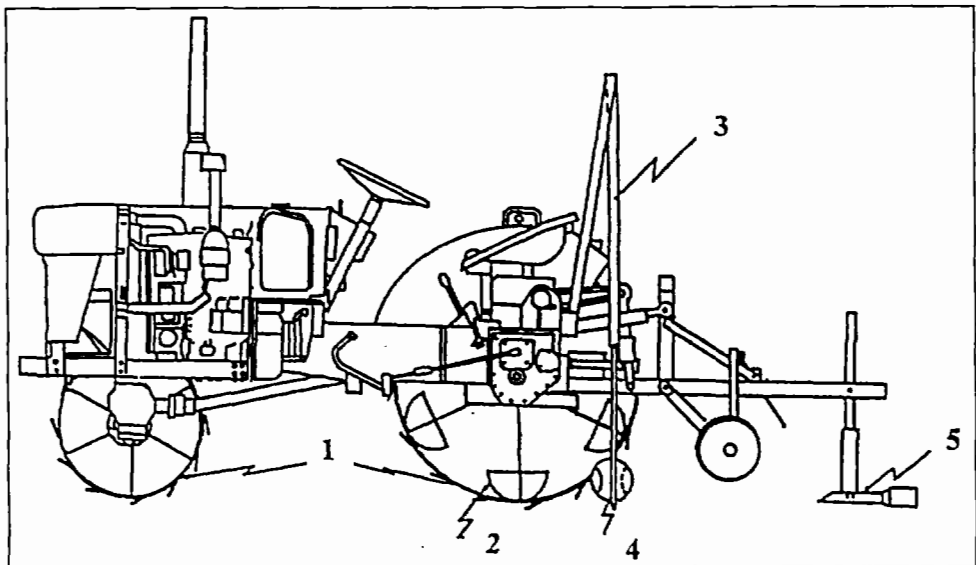
Mise au point d'une machine simple de drainage contrôlé pour préparer un sol en condition saturée

Il s'agit d'un mini tracteur de 14 chevaux équipé d'une machine genre draineuse-taupe et muni d'une foreuse actionnée par un piston à double effet, branché sur le système hydraulique du tracteur (figure 2). La partie taupe comporte deux diamètres différents, 3 cm pour la partie coupante et 6 cm pour la partie de mise en forme. Cette partie est capable de faire une galerie-taupe de 6 cm de diamètre à une profondeur maximum de 25 cm. La géométrie a été déterminée par un certain nombre d'essais dans un bac à terre en vue d'obtenir l'effort de traction minimum. La modélisation mathématique de cet effort de traction est en cours de réalisation. Il s'agit de modéliser mathématiquement (Puspito, 1996) l'effort de traction par un certain nombre de paramètres qui sont les paramètres de conception de la draineuse-taupe et de la structure du sol (annexe).

La partie tournante comporte une foreuse capable de creuser une cavité de 12 cm de diamètre le long de la galerie, à une distance prédéterminée, pour servir de réservoir temporaire à l'eau drainée. Le mouvement vertical de va et vient de la foreuse est contrôlé par un vérin hydraulique à double effet, et le mouvement rotatif est réalisé par la prise de force du tracteur. La partie draineuse-taupe est montée sur un bâti équipé de deux roues qui assure le déplacement sur le sol mou et sert en même temps de contrôle de la profondeur.

Pour assurer le déplacement du tracteur sur un sol mou ayant une portance faible, une roue cage spéciale a été conçue. Ces roues-cages comportent deux parties : 1) des roues-cages d'un mètre de diamètre équipées de douze ailettes de dimension 8 x 35 cm pour assurer la traction et 2) un dispositif comportant 6 cylindres de 20 cm de diamètre et 400 cm de lon-

Figure 2.
Équipement de préparation
du sol de rizière
en condition saturée.
1. Roues-cages ;
2. dispositif de flottaison ;
3. dispositif hydraulique ;
4. foreuse ;
5. draineuse-taupe.



gueur pour assurer la portance de l'ensemble roue-machine. L'ensemble de l'outil et cellule motrice (figure 2) est capable de travailler dans des sols limoneux relativement mous en présence de tiges de riz, à la fin de la saison pluvieuse. Sur des sols argileux complètement saturés, qui constituent la plupart des sols de rizières, la galerie-taupe peut être faite sans difficulté, ainsi que les cavités, même si quelques améliorations doivent être réalisées notamment pour assurer l'évacuation du sol mou à l'intérieur de cavité.

La performance de la machine sur un sol limoneux est présentée dans le tableau I. La machine est capable de travailler sans difficulté, et sa capacité dépend de la distance entre les galeries-taupe. Elle varie de 0,1 à 0,2 ha à l'heure pour une distance à la galerie-taupe de 75 à 225 cm (Rozaq *et al.*, 1994, 1995, 1996). Du point de vue du travail aux champs cette capacité est faible. Sauf dans le cas d'un passage de sous-soleuse ou de décompacteur, l'effort de traction de l'équipement est de l'ordre de 240-275 daN ce qui équivaut à une puissance de 0,7-1,6 ch (tableau II). La foreuse, a des vitesses de rotation qui dépendent de la vitesse de la prise de force qui peut varier selon la position de la manette de l'accélérateur (tableau III). Pour réaliser une cavité dans les sols saturés, il faut disposer d'un couple de l'ordre de 0,8 - 1,4 m.daN (Rozaq *et al.*, 1996).

Tableau I. Performance de la machine destinée au drainage contrôlé.

	Distance entre galeries-taupe Dg (cm)		
	Dg 75	Dg 150	Dg 225
Vitesse du travail (km/h)	1,30	1,33	1,35
Profondeur du travail (cm)	20	20	20
Capacité du travail (ha/hr)	0,07	0,14	0,21
Efficience du travail (%)	51,40	50,58	55,87
Glissement (%)	25,6	26,9	22,3

La galerie-taupe créée par ce type de machine peut persister jusqu'à la fin de période de culture de troisième cycle, avant d'être détruite par l'action du travail du sol ultérieur pour la culture du riz. Cependant, les pratiques du semis direct pour le riz, qui se développent (notamment dans le sud de Sumatra) pourraient favoriser une utilisation plus longue de ces galeries-taupe.

Après ce type d'intervention, les paysans peuvent semer, directement, différentes plantes de *palawija*, notamment du soja. Le semis direct utilisant un piquet du bois a été pratiqué longtemps par les paysans ; quelques résultats de recherche ont mis en évidence les avantages de cette pratique, notamment, après une culture de riz où le sol était travaillé à l'état saturé. Malheureusement aucune de ces recherches n'a étudié ses effets sur le développe-

Tableau II. Effort de traction de l'équipement.

Gamme de boîte vitesse	Force (daN)	Vitesse (m/s)	Puissance (ch)
V3M	274,4	0,40	1,49
V3E	275,6	0,43	1,61
V2M	243,1	0,20	0,66
V2H	275,1	0,24	0,89

V : vitesse ; M : moyenne ; E : élevée.

Tableau III. Vitesse de rotation de la foreuse.

Position d'accélérateur	Vitesse de rotation de la perceuse selon la position de la manette prise de force (rpm)		
	P1	P2	P3
Stationnaire	32	58	94
Milieu	64	108	181
Plein	89	151	250

ment des plantes et ses conséquences sur l'élaboration du rendement des cultures de *palawija*. L'approche de l'analyse du profil cultural développé par Henin est probablement utile pour aborder cet aspect. Cependant, son utilisation pour les sols de rizières est beaucoup plus délicate en raison de l'extrême différence du mode d'intervention sur un sol sec et un sur sol boueux.

Études préliminaires aux champs

Les études réalisées aux champs à la fin de la saison des pluies dans une rizière limoneuse ont montré que l'engin était capable de réaliser un travail du sol en formant des galeries-taupe. Les cavités n'étaient pas, cependant, encore parfaites, en raison du mauvais fonctionnement de la foreuse. Le sol était complètement saturé mais la semelle de labour existait à 25 cm de profondeur, ce qui a permis le déplacement du tracteur. Trois écartements entre galeries-taupe (voisins de l'écartement calculé par la formule de Glover Dumm), de 75 cm, 125 cm, et 225 cm ont été essayés avec une profondeur unique de 20 cm.

Les résultats montrent que la diminution de la teneur en eau de la couche superficielle (0-10 cm) est relativement plus rapide que celle du témoin, et plus l'écartement entre les galeries-taupe est grand, plus la diminution de la teneur en eau est lente.

Ce type d'intervention peut réduire le temps de remise en culture jusqu'à 40 % (Hamidah, 1996). Les teneurs en eau des différentes couches du sol dans le système de drainage contrôlé d'eau sont relativement plus grandes que les teneurs en eau dans un système de drain-taupe sans cavité (figure 3).

Les études en cours sur un sol argileux lourd (> 60 %) avec le même écartement de galerie ne montrent pas la même tendance. La conclusion ne peut pas encore être tirée en raison du mauvais fonctionnement de l'équipement au niveau des galeries-taupe.

La variation de la teneur en eau aux alentours des cavités, séparées par une distance de 125 cm l'une et l'autre, est présentée dans la figure 4. L'eau a tendance à s'accumuler vers les cavités (teneur en eau plus élevée dans les zones proche de la cavité que dans les zones éloignées). Ceci montre que la présence de cavités augmente les possibilités de rétention de l'eau au-dessus de la semelle de labour (Waluyo, 1996). La capacité des cavités à retenir ou conserver l'eau ainsi que le mouvement de l'eau dans la couche superficielle (lit de semence) est en cours d'étude.

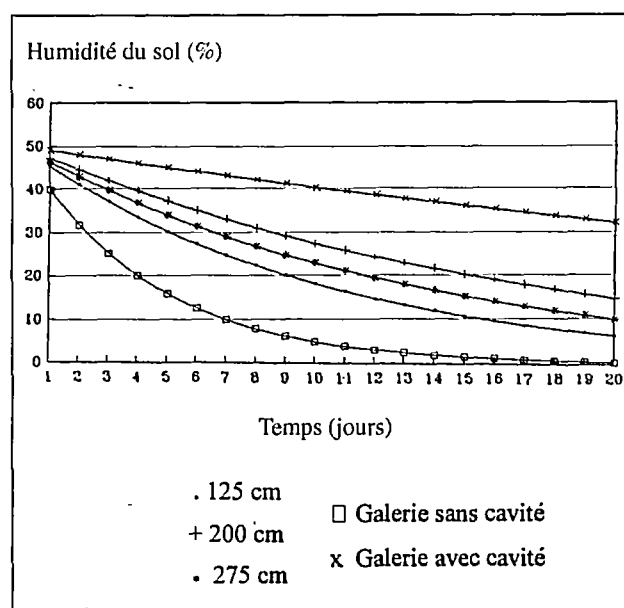


Figure 3. Évolution de la teneur en eau dans différents traitements.

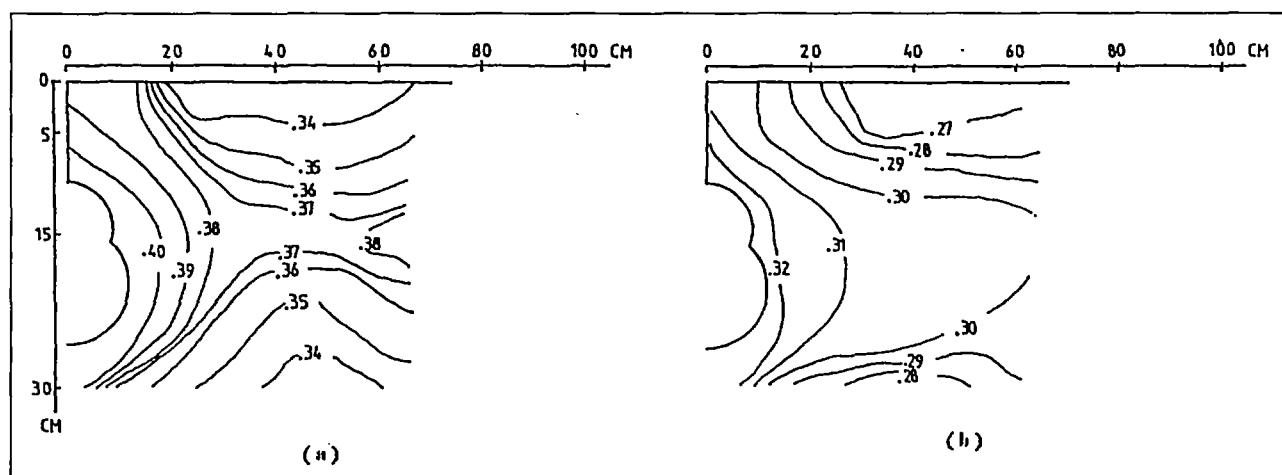


Figure 4. Distribution de la teneur en eau dans la zone autour de la cavité (sol limoneuse). (a) après traitement (b) 10 jours plus tard.

Un semis direct a été réalisé sur un sol limoneux après un drainage contrôlé, pour étudier le développement et le rendement des plantes. Les résultats montrent un développement légèrement plus important des plantes juste au-dessus des galeries. Ceci est probablement dû à la teneur en eau et à la présence de fissures en surface tout le long de la galerie. Dans l'ensemble, les plantes ne présentent pas de différence de développement selon les traitements, hormis un décalage de la période de récolte, d'environ une semaine par rapport au témoin.

Discussions

Sur les sols limoneux l'équipement semble capable de creuser des galeries et des cavités à distances prédéterminées. Les observations aux champs montrent que dans ce type de sols, les semelles de labour existent à faible profondeur (< 25 cm) et que le sol adhère faiblement aux équipements. Dans les sols argileux, le problème d'adhérence du sol augmente, la présence un film d'eau sur la surface du sol peut réduire ce problème. Dans les sols argileux lourds, un autre problème qui se manifeste est celui de la profondeur excessive des ornières, car dans ce type de sol, les semelles de labour n'existent pratiquement pas.

L'ensemble des contraintes de climat et de sol dans les rizières tropicales de type mousson humide pose des problèmes au niveau de la gestion de l'irrigation et de la diversification des cultures. Un des obstacles à la mise en culture (autre que le riz) des sols de rizière en fin de saison des pluies est en passe d'être résolu par l'introduction de nouvelles techniques de préparation du sol. La technique du drainage contrôlé présentée dans cette étude préalable constitue une solution mais non la seule. Des études complémentaires doivent être entreprises pour valider sur le long terme les aspects économiques et techniques et en particulier, la capacité des cavités à conserver une partie de l'eau drainée, l'utilisation de l'eau par les plantules de *pala-wija*, la maintenance de l'équipement...

La conception de l'équipement a montré la complexité des interactions sol-machine, et certains éléments tels que : bourrages, adhérence du sol sur des organes de roulement, profondeur excessive des ornières, doivent être réétudiés sans pour autant diminuer la capacité de traction de la cellule motrice.

Conclusions

L'étude préliminaire en vue de la réalisation d'un principe de drainage contrôlé a montré la complexité au niveau de la conception d'une machine capable de

« perforer » un sol complètement saturé, relativement mou, et qui adhère très vite aux engins. Les résultats provisoires ont mis en évidence la possibilité d'appliquer une nouvelle technique de préparation du sol. Les travaux du sol dans les rizières constituent un nouveau domaine d'étude et les recherches doivent être poursuivies pour élaborer un nouveau concept de travail du sol en zones tropicales de mousson.

Remerciements

Mes remerciements s'adressent au Drn (*National research council*) de l'Indonésie qui a octroyé le budget de recherche et au Professeur Dr. Suprodjo Pusposutardjo, Doyen de la Faculté de technologie agricole Ugm pour son aide fructueuse. Mes remerciements vont aussi aux collègues R. Handoyo, B. Purwantono, S. Gunadi, J. F. Daywin, et à l'ensemble des techniciens du laboratoire de machinisme agricole pour leur étroite collaboration. Enfin, je remercie l'Ambassade de France à Jakarta pour l'aide financière à la participation au séminaire, et au Cirad Montpellier spécialement à Monsieur P.Y. Le Gal pour l'invitation au séminaire.

Références bibliographiques

- PUSPITO J., 1996. Identification of design parameters of shallow mole plow to predict the force of traction. Thesis submitted to Faculty of Agricultural Technology, Université of Gadjah Mada, 63 p.
- ROZAQ A., 1992. Identification of the soil failure pattern at the construction of shallow mole channels. Proceeding of International Conference on Engineering Application for the Development of Agriculture in Asia and Pacific Region, Bogor, Indonesia, 12-15 octobre.
- ROZAQ A., HANDOYO R., PURWANTANA B., 1994. Design of a shallow mole plough to speed up the planting date of secondary-crops in the rice fields. Proceeding of Regional Seminar on Agricultural Research Management (ARM) I, Yogyakarta, 13-14 juin.
- ROZAQ A., HANDOYO R., PURWANTANA B., GUNADI S., DAYWIN F. J., 1996. Engineering approach of drainage-conservation concept to minimize the timeliness of non-rice cropping in rice fields. Research Report funded by Integrated Strategic Research Grant Program (RUT II).
- ROZAQ A., PURWANTANA B., GUNADI S., 1995. Application of a shallow mole drainage concept to minimize the turnaround time for secondary crops in the last rainy season. Research report under P4M-DGHE research grant.
- HAMIDAH N., 1996. Influence of shallow mole drainage on the timeliness of non-rice cropping in the rice fields. Thesis submitted to Faculty of Agricultural Technology, UGM, 74 p.
- WALUYO S., 1996. Performance of the cavity in the soil to conserve temporarily the drained water under the mole drainage system in the rice field. Thesis submitted to Faculty of Agricultural Technology University of Gadjah Mada, 75 p.

Annexe

Modèle mathématique de l'effort de traction de la draineuse-taube

$$F_b = N_\alpha [d^2/b + d.A/b^2 \cdot \ln(A/A + b.d)] + d^2.Ca.cot\alpha + N_\beta [A/b + \pi E/b^2 \cdot (D-d) + \pi E/b^3 \cdot (2E + b.D) \cdot \ln E/\{E + b \cdot (D-d)/2\}] + A \cdot Ca \cdot cot\beta + N_\gamma [p.t/b + 2.p/b^2 \cdot \ln K/(K + b.t/2)] + p.t \cdot Ca \cdot cot\gamma$$

α = angle de la partie coupante.

F_b = Force exercée par la draineuse-taube.

F_p = Force exercée par la partie coupante.

F_e = Force exercée par la partie mise en forme.

F_k = Force de l'étauçon.

a = Constante hyperbolique du sol (m^3/N).

b = Constante hyperbolique du sol (m^2/N).

δ = angle de friction sol-outil assumé ($^\circ$).

δ_{max} = angle de friction sol-outil mesuré ($^\circ$).

Ca = Adhésion sol-outil (N/m^2).

D = Diamètre de partie de mise en forme (m).

d = Diamètre de la partie coupante (m) (ouverture).

β = Angle de la partie de mise en forme.

p = Hauteur de l'étauçon en contact avec le sol (m).

t = Epaisseur de l'étauçon (m).

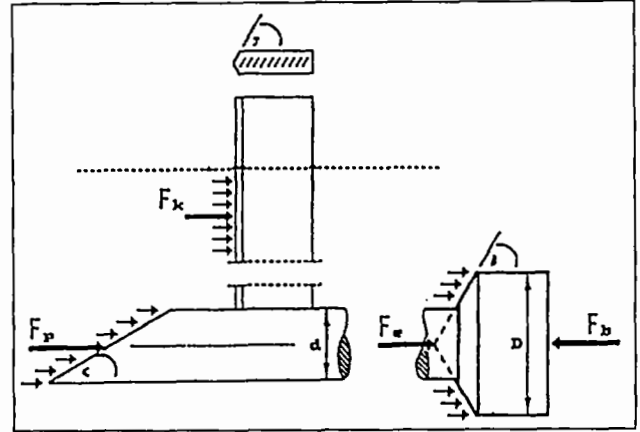
γ = Angle d'attaque de la partie avant de l'étauçon.

$A = \pi/4 (D^2 - d^2)$ en m^2 .

$N_\alpha = \sin(\alpha + \delta) / \sin\alpha \cdot \cos\delta$

$N_\beta = \sin(\beta + \delta) / \cos\delta \cdot \sin\beta$

$N_\gamma = \sin(\gamma + \delta) / \cos\delta \cdot \sin\gamma$



L'effet de la récolte mécanique de la canne sur le sol et la plante

Ronald Ng. CHEONG, Vivian RIVIÈRE, E. JACQUIN
Mauritius Sugar Industry Research Institute (Msiri), Réduit, République de Maurice

Résumé : A Maurice, une industrialisation rapide a provoqué, entre autres, une compétition pour la main-d'œuvre, rendant essentielle la mécanisation des opérations culturales de la canne à sucre, notamment la récolte et le chargement. La communauté des planteurs ayant exprimé des craintes sur la possibilité d'effets néfastes des machines sur le sol, deux essais ont été implantés pour étudier le compactage du sol suite au passage de récolteuses et chargeurs mécaniques. La densité apparente sèche de deux sols a été mesurée à l'aide d'une sonde gamma-neutronique, dans la rangée et l'entreligne de canne à des intervalles de profondeur de 10 cm et jusqu'à 30 et 50 cm respectivement. La sensibilité de ces sols au compactage a été déterminée par le test Proctor. Dans le premier essai, après le passage d'un chargeur mécanique, le sol s'est fortement compacté à 10 cm, et légèrement au-delà de cette profondeur. Dans l'autre essai, la densité apparente sèche, sous l'effet du passage de la récolteuse et du chargeur, a augmenté dans l'entreligne à une profondeur maximale de 10 cm. Cependant, dans les deux cas, le compactage n'est pas permanent car la densité apparente diminue avec le temps, même si elle ne revient pas toujours à son état initial. Les rendements de canne dans les traitements récoltés à la machine sont inférieurs aux traitements récoltés manuellement. Cette réduction n'est pas causée uniquement par le compactage, mais est due surtout à une combinaison de différents effets, en particulier les pertes de souches.

La canne à sucre, cultivée à Maurice depuis plus de trois siècles et demi, constitue l'un des piliers de l'économie du pays. Jusqu'à récemment, toutes les opérations culturales étaient faites à la main, les producteurs ayant à leur disposition une main-d'œuvre abondante. Le développement industriel accéléré de ces deux dernières décennies a rendu la main-d'œuvre plus coûteuse et surtout moins disponible. La mécanisation des opérations culturales est ainsi devenue inévitable.

La récolte et le chargement sont les deux opérations qui requièrent le plus de main-d'œuvre et qui nécessitent donc une attention particulière pour la mécanisation. Le chargement mécanique est déjà une pratique courante dans l'île, des chargeurs de 4 tonnes

ou plus sont utilisés. Quant aux récolteuses disponibles, elles pèsent plus de 7 tonnes et sont toutes pneumatiques. Ce sont des machines automotrices qui peuvent couper les tiges entières et les andainer sur un entreligne ou les tronçonner et charger directement dans une corbeille.

Le passage de ces machines pourrait provoquer un compactage du sol sous les pneumatiques, surtout si le sol est humide. Ainsi, un poids axial de moins de 5 tonnes pourrait causer un compactage ne dépassant pas une profondeur de 30 cm (Voorhees, 1986). Dans le cas de la récolteuse, les roues ne passent que dans les entrelignes de canne et le compactage devrait donc y être confiné. Par contre, la roue centrale du chargeur passe sur les lignes de canne et pourrait donc y avoir un effet, non seulement au niveau du sol mais également sur les souches.

L'île Maurice est divisée en trois zones climatiques selon la pluviométrie moyenne annuelle :

- sous-humide : < 1 200 mm ;
- humide : 1 200 – 2 400 mm ;
- perhumide : > 2 400 mm.

Le chargement mécanique introduit, dans les années 70, se fait sans problème dans les régions sous-humides et humides. Par contre, dans la zone perhumide, le chargement mécanique n'est pas recommandé car cette pratique abîme les tiges juvéniles qui contribuent au rendement de la saison suivante. De même, la coupe rase n'est pas recommandée car toutes les tiges présentes sont alors coupées, y compris les tiges juvéniles de la saison suivante. Cette pratique occasionne des pertes de rendement de 10 à 20 % lors de la récolte suivante (Mc Intyre et Hardy, 1989). Pour éviter cela, la récolte sélective est donc recommandée dans

cette zone. Cependant, cette recommandation ne peut évidemment plus être appliquée avec la récolte mécanisée.

En sus des effets de la coupe rase, inévitables avec la récolte mécanisée, des craintes ont été exprimées par des producteurs sur les conséquences d'un passage d'engins lourds sur le sol, en particulier, dans les zones humides et perhumides. Dans le premier cas, il y aurait perte de rendement alors que dans le deuxième, un fort compactage du sol entraînerait des problèmes d'ordre mécanique (sol dur et difficile à pénétrer et travailler) ou hydraulique (perméabilité réduite, aération déficiente, etc.) produisant ainsi des conditions peu propices à la croissance de la canne.

Pour ces raisons, l'organisme chargé de la recherche sucrière à Maurice, le *Mauritius sugar industry research institute* (Msiri), a décidé d'entreprendre deux essais pour vérifier si ces craintes sont fondées et avec pour objectif :

- de vérifier s'il y a compactage avec le passage des machines et dans l'affirmative, la situer dans la rangée ou l'entreligne de canne ;
- d'identifier la profondeur et faire le suivi de son évolution ;
- d'identifier les effets sur la canne, au niveau de sa croissance (mortalité de souches, etc.), de sa repousse subséquente et surtout son rendement.

Ces études ont été effectuées sur de grandes parcelles, la canne étant récoltée sur une base industrielle. L'intérêt de cette démarche est de valider les résultats auprès des producteurs, souvent critiques vis-à-vis des essais sur petites parcelles qui leur paraissent peu réalistes et souvent très loin de la réalité industrielle.

Dans d'autres pays producteurs de canne, des études entreprises à ce jour ont fourni des résultats contradictoires. Les chercheurs concluent que le compactage engendré par le trafic a soit des effets néfastes sur le rendement (Swinford et Boevey, 1984), soit aucun effet (De Boer, 1993 ; De Beer *et al.*, 1993). En ce qui concerne les mesures du sol, il apparaît que le compactage est confiné à la partie supérieure du profil (Torres *et al.*, 1990). Il n'y a cependant pas eu d'étude pour suivre un paramètre de compactage tout au long d'une saison afin de vérifier si le sol retournait à son état original sous les effets du climat et autres facteurs biotiques.

Matériels et méthode

Récolteuses et chargeurs étudiés

Deux essais ont été mis en place à Valetta et Courbevoie. Dans les deux cas, la récolteuse utilisée

est une Cameco S30. C'est une machine de 7,2 tonnes sur 4 roues pneumatiques, automotrice et coupant des tiges entières et andainant 5 à 6 rangées de canne sur un entreligne. Son écimeuse est réglée au préalable à une hauteur fixe en fonction de la hauteur moyenne de la canne.

Le chargeur mécanique étudié est un engin tricycle Bell muni d'un grappin et pesant 4,0 tonnes. Les trois roues sont pneumatiques et la roue centrale se trouve à l'arrière du véhicule. La canne andainée est prise dans le grappin du chargeur (700 kg par chargement) qui la transporte jusqu'en bordure du champ et la charge dans le transporteur.

Le site des essais

L'essai de Valetta se situe dans la partie centrale du pays, à une altitude d'environ 450 mètres avec une précipitation annuelle de 3 000 mm (Padya, 1984) concentrée à 70 % durant les mois d'été, de décembre à avril. Le sol de l'essai est classifié comme un sol ferrallitique fortement à très fortement désaturé (Willaime, 1984). Le sol est surtout composé d'argiles non-gonflantes (kaolinite et oxydes de fer et d'aluminium) à travers tout le profil. Il est bien structuré en surface mais l'horizon B à 30 cm est compact et draine mal, ce qui fait que le sol est souvent humide en profondeur. La variété de canne plantée est la M 3035/66.

L'essai de Courbevoie implanté en 1992, se trouve dans la zone humide à une altitude d'environ 70 mètres avec une précipitation annuelle de 1 800 mm (Padya, 1984) la distribution mensuelle est similaire à celle de Valetta. Le sol du site est défini comme étant ferrallitique moyennement désaturé modal (Willaime, 1984) avec un fort taux d'argiles non-gonflantes (jusqu'à 80 %) mais comme la kaolinite dans l'horizon A est cimentée par des oxydes de fer, le sol au champ est plutôt limono-argileux fin. L'horizon B est bien structuré et le site est en général bien drainé. La variété de canne plantée est la R 570.

Les traitements à la récolte

Les différents traitements de récolte et de chargement de la canne sont résumés dans le tableau I.

Le traitement "récolte manuelle + chargement mécanique" est la pratique la plus courante dans l'île. L'introduction de récolteuses mécaniques conduit au traitement "récolte mécanique + chargement mécanique" et la comparaison de ces deux traitements est le but premier de ces essais. Le traitement 1 de Valetta est une illustration de la méthode classique qui est de moins en moins utilisée par les gros producteurs. Sa prise en compte dans l'essai est déterminée surtout par

le besoin d'une comparaison avec une situation où la machine est totalement absente.

Tableau I. Description des traitements.

Site	Numéro	Traitement
Valetta	1	Récolte manuelle sélective + chargement manuel
	2	Récolte manuelle rase + chargement mécanique
	3	Récolte mécanique + Chargement mécanique
Courbevoie	1	Récolte manuelle + chargement mécanique
	2	Récolte mécanique + chargement mécanique

Les dispositifs de mesures

Plusieurs paramètres sont communément utilisés comme mesures de compactage, telles la résistance à la pénétration, la densité apparente sèche, la perméabilité, etc. Suite à des essais conduits à la *Scottish institute of agricultural engineering* (Siae), il en a été conclu que la densité apparente du sol est le meilleur paramètre (Smith, 1987). Cette technique a été choisie pour le présent essai. L'avantage de cette technique est qu'il faut trois positions de mesures pour avoir un résultat représentatif, alors que la pénétrométrie en requiert une vingtaine. Quant aux techniques liées à la perméabilité, elles ont le désavantage de se confiner aux zones superficielles alors qu'il est possible de mesurer la densité à différentes profondeurs avec une sonde gamma-neutronique. Selon Soane *et al.* (1981), cette technique peut donner des résultats fiables avec un minimum de perturbation dans le sol.

L'appareil utilisé pour les mesures est une sonde gamma-neutronique de la compagnie Campbell pacific nuclear (Cpn), modèle MC-S-24, préalablement étalonné sur différents sols ferrallitiques de Maurice. La sonde se compose de deux tiges, l'une émet rayons gamma et particules de neutron et mesure les neutrons lents, et l'autre mesure uniquement les rayons gamma. Les deux sont reliées à un processeur central qui enregistre les comptages.

A chaque position de mesure, deux trous parallèles (à espacement prédéterminé) sont creusés et bouchés avec des tuyaux rigides. Au moment du comptage, les tuyaux sont enlevés et les deux tiges de la sonde insérées dans les trous. Les comptages sont effectués un jour avant et après la récolte, puis à intervalles mensuels en utilisant les mêmes trous d'accès. L'ap-

pareil donne des mesures de densité apparente totale et humidité volumique et la densité apparente sèche est calculée à partir de ces dernières. Les comptages sont toujours effectués aux mêmes sites, les rendant ainsi comparables dans le temps.

Trois placettes espacées à environ 20 m sont sélectionnées dans chaque traitement pour le suivi. Dans chacune d'entre elles, les mesures sont affectées à deux endroits, l'un à côté de la rangée de canne, l'autre au milieu de l'entreligne. Les rangées de canne sont espacées à 1,6 m et la distance entre ces deux points de mesure est d'environ 0,7 m. Les mesures sont effectuées avec les deux tiges parallèles aux rangées (figure 1) à des profondeurs de 10, 20 et 30 cm dans les deux cas, avec une profondeur additionnelle de 50 cm à Valetta. Une moyenne de trois comptages de 30 secondes est effectuée pour chaque profondeur.

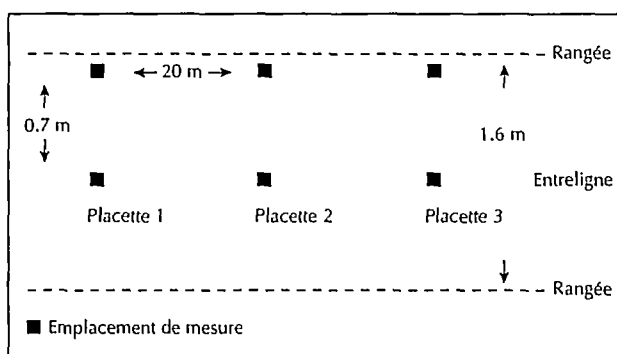


Figure 1. Dispositif de mesures de sonde.

Les tests de Proctor

La sensibilité des deux sols au compactage a été déterminée au laboratoire par une version modifiée du test de Proctor (Proctor, 1933). Des échantillons de sol de la couche végétale (jusqu'à 20 cm de profondeur) ont été tamisés frais à 5 mm, puis humectés ou desséchés de façon homogène pour obtenir une gamme d'humidité. Ils ont été introduits en trois couches dans le moule Proctor et soumis à une énergie de compactage de l'ordre de 140 kJ m⁻³, soit l'équivalent de l'énergie développée pour un chantier de récolte complètement mécanisé à La Réunion (Siegmond et Ducreux, 1982). Le couple humidité volumique et densité apparente maximale pour la couche végétale a été ainsi établi.

Mesures à la récolte

Les rendements de la totalité des parcelles ont été considérés, la canne étant chargée dans des remorques pesées sur la balance des usines. A Valetta, le pourcentage d'espaces vides entre les souches de canne a été mesuré, donnant ainsi une indication des pertes de souches. Il est établi qu'un espace vide excédant

50 cm entre deux souches de canne n'est jamais recouvert par les souches adjacentes. Les distances vides ont été donc mesurées et réconverties en terme de fraction de la longueur totale des lignes.

A Courbevoie, la quantité de matière étrangère incluse avec la canne récoltée a été mesurée. Il s'agit surtout de bouts blancs (partie supérieure de la canne) qui n'auraient pas été récoltés manuellement car ces morceaux ne contiennent pas de sucre. Leur inclusion est inévitable dans la récolte mécanique et a pour effet de baisser la richesse totale de la canne récoltée tout en augmentant le poids. Les autres éléments de matière étrangère sont la paille, verte ou sèche.

Résultats et discussion

Effets sur le sol

La courbe Proctor pour les deux sols est présentée dans la figure 2. Il est ainsi établi que le compactage maximal mène à des densités apparentes sèches de l'ordre de 1,25 et 1,20 g cm⁻³ pour Valetta et Courbevoie respectivement, les deux intervenant à une humidité volumique d'environ 50 %. En théorie, avec l'énergie appliquée sur le site par les machines utilisées, la densité apparente sèche mesurée ne doit pas dépasser ces valeurs.

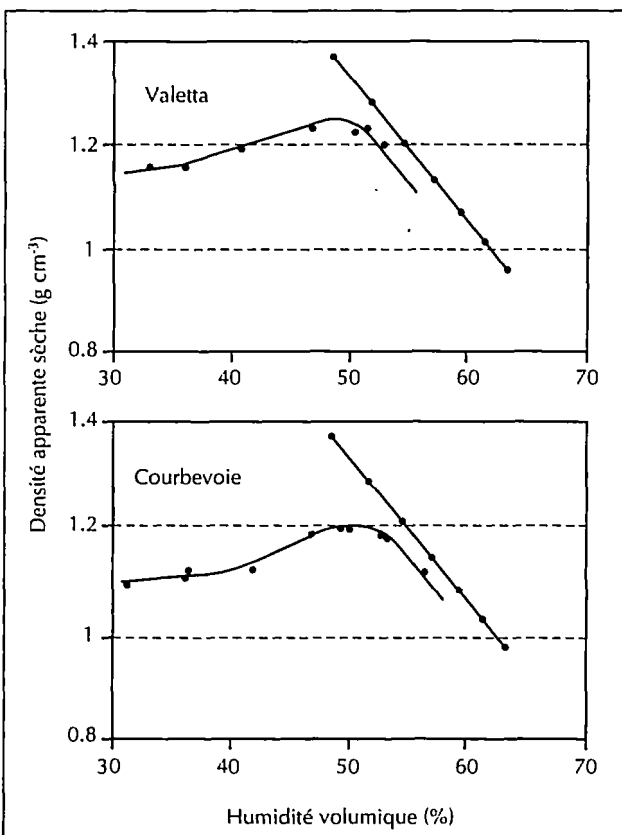


Figure 2. Courbes Proctor.

L'évolution de la densité apparente sèche et de l'humidité volumique est illustrée dans les figures 3 et 4 pour Valetta et Courbevoie respectivement. Ces valeurs de densité et d'humidité sont les moyennes des trois placettes de mesure.

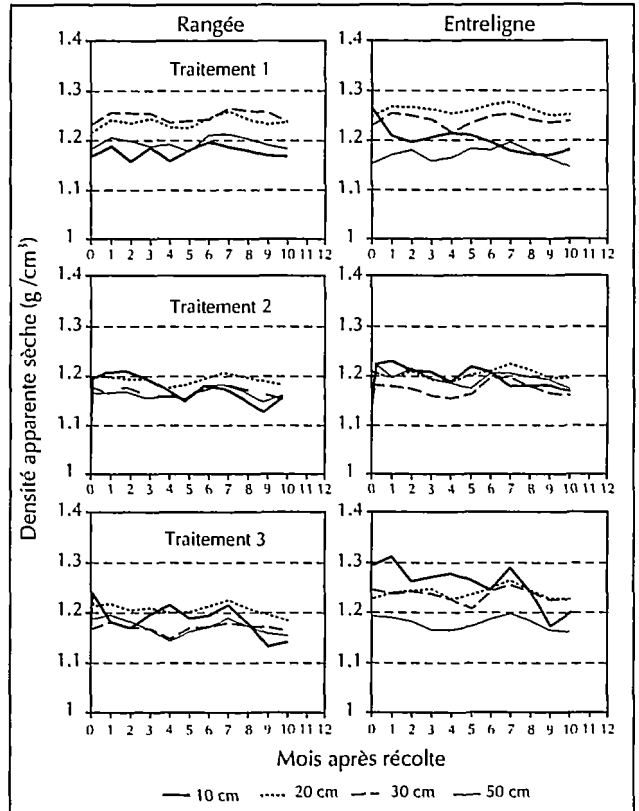


Figure 3a. Evolution de la densité apparente sèche à Valetta.

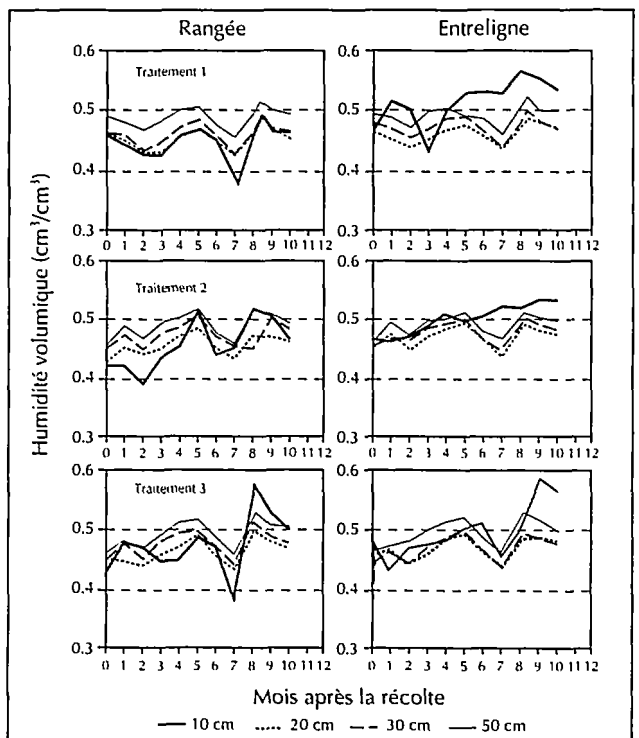


Figure 3b. Evolution de l'humidité volumique à Valetta.

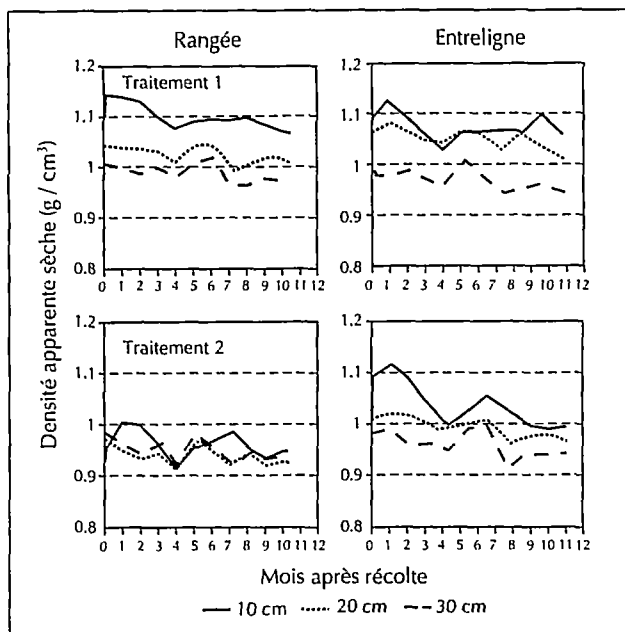


Figure 4a. Evolution de la densité apparente sèche à Courbevoie.

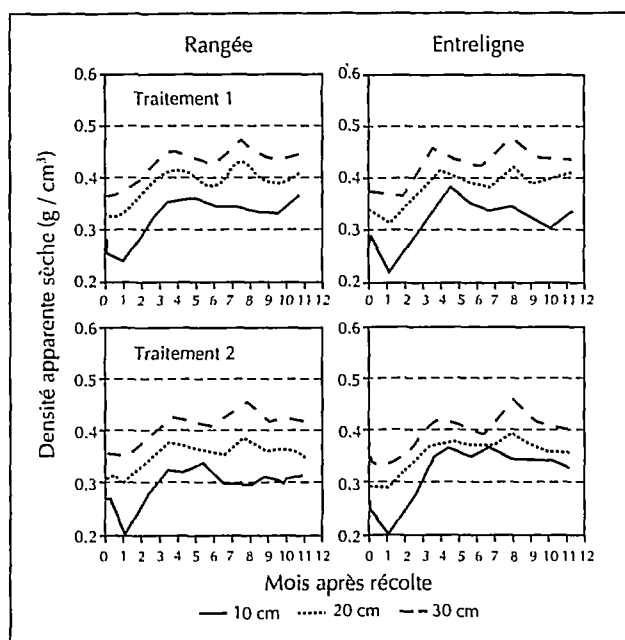


Figure 4b. Evolution de l'humidité volumique à Courbevoie.

A Valetta, le sol à la récolte est à un taux d'humidité assez proche de l'optimum Proctor pour le compactage, entre 45 et 50 % pour les traitements 1 et 2, et à environ 40 % dans le traitement 3. Subséquemment, ce taux d'humidité a varié entre 40 et 60 %, démontrant ainsi la nature perhumide du site.

La densité est restée plus ou moins constante dans le traitement 1, chose normale pour un traitement excluant complètement les machines. Le sol était déjà compact à 20 et 30 cm, la densité étant semblable au maximum enregistré dans le test Proctor. La seule évolution notable a lieu à 10 cm dans l'entreligne où la densité

commence à diminuer après deux mois et la tendance est à la baisse subséquemment. Le sol s'est donc décompacté de façon naturelle dans la zone superficielle, vraisemblablement sous l'effet d'actions physiques mais surtout biologiques (racines, vers de terre, etc).

Dans le traitement 2, le sol est initialement à une densité inférieure au maximum possible et donc susceptible au compactage. Sous l'effet du chargeur mécanique, la rangée et l'entreligne sont compactés de façon importante à 10 cm et de façon moins marquée à plus grande profondeur. L'effet sur la rangée est plus marqué à cause de sa densité initiale plus faible et après le passage du chargeur la densité atteint une valeur proche du maximum Proctor. La densité a tendance à diminuer avec le temps mais ne revient pas à son niveau initial (figure 5a).

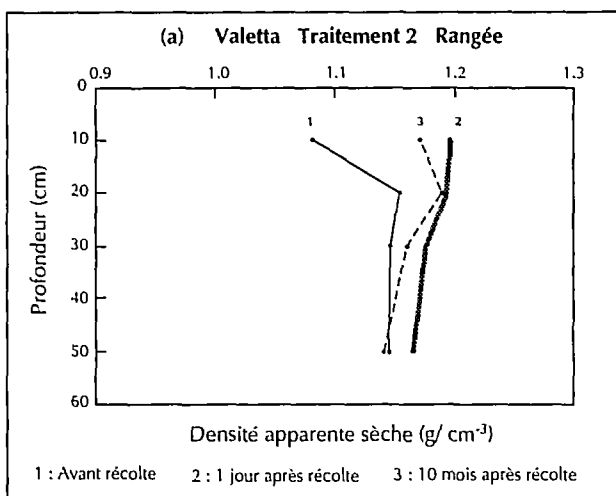


Figure 5a. Profils de densité.

Dans le traitement 3, le sol est naturellement compact à son état initial, la densité étant très forte dans l'entreligne. Dans ce dernier cas, la densité dépasse le maximum Proctor à 10 cm durant les huit premiers mois de l'essai. Au bout de huit mois, cette densité baisse pour atteindre un niveau inférieur à celle de 20 et 30 cm. Quant aux autres profondeurs, la densité reste sensiblement la même dans le temps. Il y a eu un léger compactage dans la rangée à 10 cm. La densité a, là aussi, tendance à baisser avec le temps.

A Courbevoie, le taux d'humidité du sol à la récolte le rend moins susceptible au compactage. Le sol est initialement assez loin de la densité maximale Proctor dans les deux traitements. Dans le traitement 1, il a un léger compactage à 10 cm causé par le passage du chargeur. Cependant, la tendance pour la densité est vers la baisse et après dix mois, elle est plus faible qu'à l'état initial pour les trois profondeurs dans la rangée et l'entreligne.

Dans le traitement 2, il y a un léger compactage dans la rangée à 10 et 20 cm, mais le plus grand effet est noté à 10 cm dans l'entreligne (figure 5b) où le passage des deux machines cause une forte augmenta-

tion dans la densité. Comme pour le traitement 1, la tendance est à la baisse dans tous les cas et la densité après dix mois retourne à un niveau inférieur comparé à l'état initial.

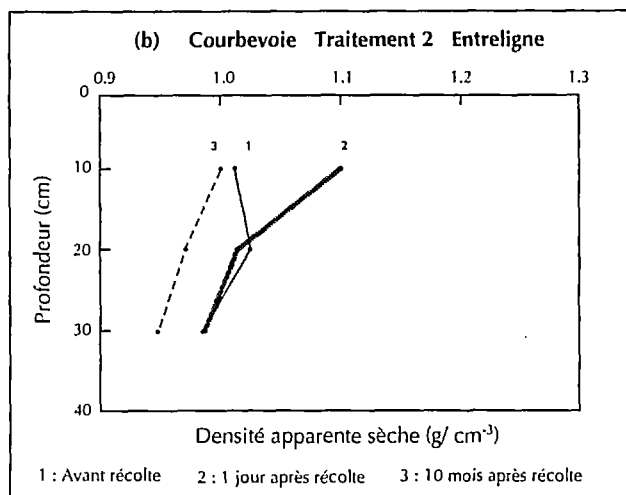


Figure 5b. Profils de densité.

Effets sur la plante

Les rendements cumulatifs de 1992 à 1994 pour Valetta sont résumés dans le tableau II. Les pertes de souches sont exprimées en pourcentages d'espaces vides, ces derniers sont en fait des distances d'espaces libres sur la distance totale des rangées de canne.

Tableau II. Rendements à Valetta et pertes de souches.

Traitement	Rendement canne (t/ha) Cumulatif 92 - 94	% Espaces vides
1	214,0	8,4
2	182,0	11,8
3	174,3	20,5
PPDS (P = 0,05)	10,0	-

Ainsi, les rendements des traitements récoltés et/ou chargés à la machine sont nettement inférieurs au meilleur rendement possible, ce dernier est obtenu avec le traitement à récolte et chargement manuels. Cette différence reflète l'effet positif de la récolte sélective par rapport à la coupe rase, avec en plus les effets des pertes de souches. Le traitement 3 a un rendement plus faible que le traitement 2, mais cette différence est expliquée par une grande perte de souches plutôt que par le compactage car il y a environ deux fois plus d'espaces vides dans le traitement 3.

Pour l'essai de Courbevoie, les rendements sont présentés dans le tableau III. Pour rendre la comparaison possible, le poids de la matière étrangère (bouts blancs, paille verte et sèche, etc.) dans la canne récoltée est

mesuré et le rendement recalculé pour en éliminer les effets. Ainsi, dans les deux traitements, il n'y a que le poids de canne usinable qui est pris en considération.

Tableau III. Rendements à Courbevoie.

Traitement	Rendement canne mesuré (t/ha)	Matière étrangère (%)	Rendement canne calculé (t/ha)
1	99,8	4,8	95,0
2	100,4	12,0	88,4
PPDS (P = 0,05)	3,7	-	3,6

Les rendements mesurés sont donc très proches pour les deux traitements. Cependant, en éliminant la matière étrangère, le rendement calculé est statistiquement inférieur pour la récolte mécanique. Cette différence peut être expliquée par des espaces vides observés comme à Valetta (pertes de souches déracinées par les lames mal aiguisées de la récolteuse).

Conclusion

Le passage des machines est responsable du compactage du sol sous certaines conditions. L'essai de Valetta démontre, ainsi, que, même si le sol est à une humidité propice pour le compactage, il est déjà compact dans deux des trois traitements, et n'y est donc pas affecté. Quand le sol est à une densité moindre que la densité maximale Proctor, il y a compactage suite au passage des machines.

Le compactage est observé dans la rangée et l'entre-ligne. L'effet en entre-ligne est attendu dans la mesure où l'entre-ligne est le lieu de passage des machines. Cet effet est observé même en l'absence des récolteuses, démontrant ainsi que le chargement mécanisé a autant, sinon plus, d'effet sur le sol que la récolte mécanisée. Le compactage observé dans la rangée est causé par le passage des chargeurs et est lui aussi inévitable. Dans la rangée et l'entre-ligne, le compactage est surtout observé à 10 cm et diminue naturellement avec le temps. Dans beaucoup de cas, la densité après dix mois est plus faible que la densité initiale.

Le rendement des parcelles récoltées mécaniquement est inférieur de celui des parcelles récoltées manuellement. Les mesures et observations montrent que cela est dû aux pertes de souches de canne plutôt qu'au compactage du sol. Cette constatation rejoint les conclusions d'un essai effectué en Colombie (Torres et Villegas, 1993) où le compactage réduisait au maximum le rendement par 10 % alors que la perte de souches pouvait causer une réduction allant jusqu'à 45 %.

Références bibliographiques

DE BEER G., HUDSON J. C., MEYER, E. TORRES J. S., 1993. Cost effective mechanization. Sugar Cane (4) : 11-16.

DE BOER H. G., 1993. The effect of mechanical harvesting on sugar cane yield in Barbados. Int. Sugar J. 96 (137) : 327-365.

MC INTYRE G., HARDY M., 1989. The influence of cutting methods and of burning on cane and sugar yield. Sugar Cane (1) : 2-3.

PADYA. B. M., 1984. The climate of Mauritius. Meteorological Office, Mauritius. 2nd Edition.

PROCTOR R. R., 1933. Fundamental principles of soil compaction. Eng. News Record, 111 : 245-248, 286-289, 348-351.

SIEGMUND B., DUCREUX A., 1982. Utilisation du test Proctor pour l'étude des phénomènes de compactage apparaissant en culture de canne à sucre sur parcelles récoltées mécaniquement. Rapport annuel CEEMAT Réunion 1982, p. 177-191.

SMITH D. L. O., 1987. Measurement, interpretation and modelling of soil compaction. Soil Use and Management 3 : 87-93.

SOANE B. D., BLACKWELL P. S., DICKSON J. W., PAINTER D. J., 1981. Compaction by agricultural vehicles : a review. I. Soil and wheel characteristics. Soil and Tillage Research 1 : 207-237. Elsevier.

SWINFORD J. M., BOEVEY T. M. C., 1984. The effects of soil compaction due to infield transport on ratoon cane yields and soil physical characteristics. Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass. : 198-203.

TORRES J. S., YANG S. J., VILLEGAS F., 1990. Soil compaction and cane stool damage by semi-mechanized harvesting systems in the wet season. Sugar Cane (5) : 12-16.

TORRES J. S., VILLEGAS F., 1993. Differentiation of soil compactage and cane stool damage. Int. Sugar Jnl, 1993, Vol. 95, n° 1132E : 127-131.

WILLAIME P., 1984. Carte pédologique de l'île Maurice 1/50 000e. ORSTOM/MSIRI.



Le profil cultural : méthode d'observation, base de modélisation de son évolution à long terme

J. ROGER-ÉSTRADE

Institut national agronomique Paris-Grignon, département Ager, 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris cedex 05, France

Résumé : Nous proposons, dans un premier temps, un indicateur de l'effet à long terme des systèmes de culture sur l'état structural, basé sur la méthode de description morphologique de la structure proposée par Manichon (1982), méthode présentée dans la première partie de l'article : la teneur en éléments d'état interne Δ des différents compartiments de la couche labourée. Dans un second temps, après avoir testé expérimentalement la pertinence de cet indicateur sur le centre de Grignon, nous proposons un modèle d'évolution au cours du temps. Ce modèle repose sur l'hypothèse que l'indicateur évolue, dans une situation régulièrement labourée, sous l'effet de trois types de flux : création, sous les roues des engins, de volumes Δ , qui sont ensuite retournés et déplacés latéralement lors du labour, alternativement dans un sens puis dans l'autre au fil des années ; enfin la disparition d'éléments Δ s'opère par fragmentation lors de la reprise et sous l'effet du climat (alternances humectation-dessiccation ou gel-dégel). Une fois confortée cette hypothèse sur le fonctionnement de la couche labourée, l'étape suivante du travail a consisté à envisager l'application du modèle à des conditions plus proches de la réalité agricole que dans les parcelles expérimentales étudiées à Grignon. Ceci a conduit à proposer un mode de simulation basé sur une représentation de la couche labourée prenant mieux en compte la répartition spatiale des éléments structuraux d'états inertes (au sein de la couche labourée).

Valorisant l'importante expérience de terrain accumulée par M. Sebillotte et son équipe dans les années 70, les travaux de H. Manichon (1982) ont permis de lever deux obstacles à l'utilisation du concept de profil cultural pour caractériser l'étude de l'état structural des parcelles cultivées :

- la variabilité spatiale, très importante aux échelles décimétrique et métrique, rendait inopérante toute description « en moyenne » des horizons anthropiques ;
- les critères de caractérisation de la structure, trop inspirés des critères utilisés en pédologie, se prêtaient mal à l'étude de l'influence sur l'évolution de la structure du sol, des actions de fragmenta-

tion et de compactage liées à l'emploi des engins de culture.

Adoptant une attitude plus tournée vers l'analyse des effets des systèmes de culture sur l'évolution de l'état structural et ses conséquences sur le fonctionnement du peuplement végétal, Manichon formalisait une méthode de description du profil clairement déterministe : pour la définition des critères de description, tout d'abord, mais aussi par la manière d'appliquer ces critères à l'objet complexe qu'est un profil cultural.

Partant du fait que l'état structural est, à un moment donné, le résultat d'une évolution sous l'effet de deux types d'agents (anthropiques et naturels) qu'il faut pouvoir distinguer pour porter un diagnostic, la caractérisation repose sur la définition de deux niveaux d'organisation structurale, l'état interne des mottes d'une part, leur calibre et leur mode d'assemblage d'autre part, décrits à l'aide de critères simples, révélateurs de l'effet des principaux facteurs de structuration (figure 1).

Si l'on excepte le labour, le volume de sol n'est, à chaque opération culturale, que partiellement affecté par les actions mécaniques (compactage et fragmentation) exercées sur le profil ; cela conduit à réaliser une double stratification de la face d'observation (figure 2) : les intersections des limites horizontales (les horizons) et verticales (au droit des passages de roues) définissent des compartiments ayant subi des actions mécaniques différentes. Il est alors possible de relier l'état observé aux opérations culturales et aux conditions de leur application.

Cette méthode, conçue en premier lieu pour le diagnostic au champ de la composante physique de l'état du profil (Manichon, 1982 ; Gautronneau et

Manichon, 1987), s'est également révélée utile dans des démarches de nature plus expérimentale visant à une meilleure compréhension de la genèse de l'état structural et de ses conséquences sur le fonctionnement du peuplement végétal (Tardieu, 1987) ou la circulation de l'eau (Papy, 1984).

Après avoir présenté brièvement les principes de la caractérisation de l'état structural, nous exposons comment nous avons utilisé cette méthode pour construire un modèle d'évolution à long terme de l'état structural de l'horizon Ap de parcelles labourées.

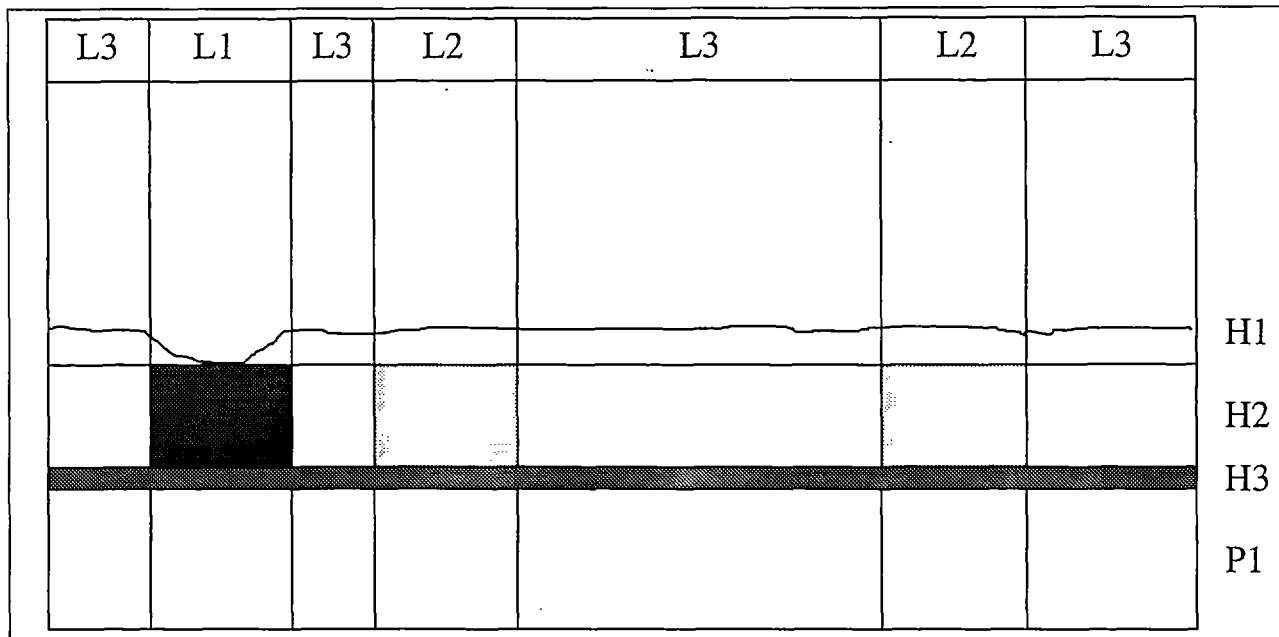


Figure 1. Principe de la double partition du profil cultural (Gautronneau et Manichon, 1987).

Dénomination des horizons :

Ap : horizon labouré, composé de : H1 à H4 : horizons de reprise du labour ; H5 : horizon labouré non repris ; H6, H7 : bases d'horizons labourés anciens ; P1, P2 : horizons « pédologiques ».

Positions latérales : L1 : passages les plus récents ; L2 : passages entre le labour et la dernière façon superficielle ; L3 : indemne de tout passage depuis le dernier labour.

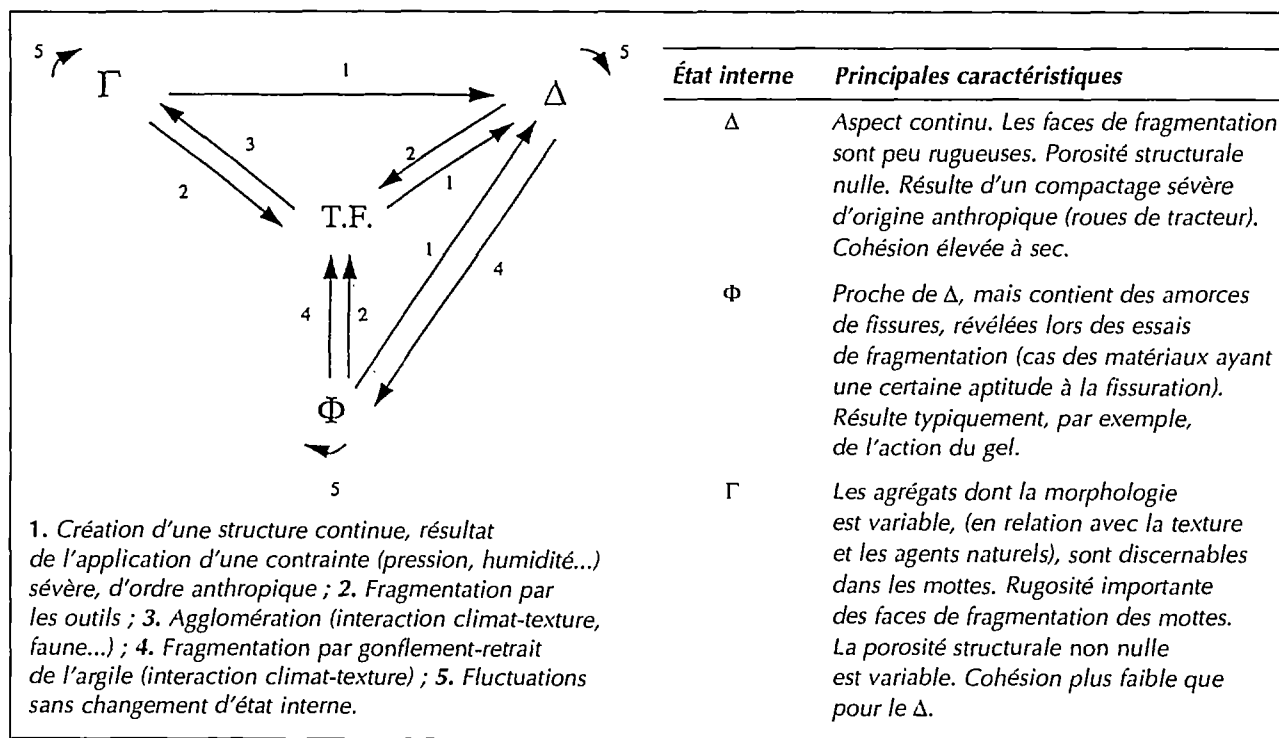


Figure 2. Définition des états internes des mottes et schéma des inter-relations entre états (Gautronneau et Manichon, 1987).

La méthode d'observation morphologique de l'état structural du profil cultural

Prise en compte de la variabilité spatiale : analyse géométrique des équipements¹ et stratification du profil

Une opération culturale donnée (qu'il s'agisse ou non de travail du sol), peut être caractérisée par la nature des actions mécaniques qu'elle exerce sur le sol et le volume au sein de l'horizon Ap concerné par chacune (Manichon, 1988). Si l'on ne considère que le compactage par les roues du tracteur (et de l'outil si celui-ci n'est pas porté) et la fragmentation par les pièces travaillantes des outils de travail du sol, plusieurs données géométriques permettent d'évaluer le volume de Ap affecté par chacune de ces actions² :

- la largeur d'appui au sol du tracteur (et des roues de l'outil s'il y a lieu) ; elle dépend de la dimension des pneumatiques et de leur nombre ;
- la largeur de travail dont dépendent en partie les règles de circulation sur la parcelle ; c'est bien parce que cette largeur est en règle générale différente de la précédente qu'il existe une variabilité spatiale des contraintes appliquées ;
- éventuellement l'épaisseur de l'horizon fragmenté par l'outil, au plus égale, dans la plupart des cas, à l'épaisseur totale de l'horizon Ap.

Sur ces bases, il est possible de définir sans ambiguïté quatre types de compartiments, correspondant aux différents cas possibles : compartiment ayant subi un compactage, seul ou suivi d'une fragmentation ; compartiment non compacté, avec ou sans fragmentation. Les tailles de ces compartiments (le volume qu'ils occupent dans la couche travaillée) dépendent des valeurs des paramètres géométriques présentés ci-dessus. Notons que, dans cette double partition du profil, verticale et horizontale, on ne tient pas compte de l'intensité des transformations subies par le sol, mais uniquement de l'existence d'une contrainte mécanique appliquée à celui-ci ; on ne préjuge donc en rien de la variabilité des états structuraux intra ou inter compartiments. Lorsque plusieurs opérations ont été réalisées et que l'on veut opérer une stratification qui tienne compte de l'ensemble, il est en principe nécessaire d'avoir repéré précisément les passages lors de chaque opération, ce qui n'est pas toujours réalisable pour des raisons pratiques évidentes. Dans une optique de diagnostic, Gautronneau et Manichon

(1987) proposent de procéder plus simplement, en délimitant sur la face d'observation du profil, une double partition (figure 1) :

- dans le sens vertical en identifiant au sein de Ap les horizons dont les limites sont définies par les profondeurs d'action des différents outils de travail du sol, visibles au moment de l'observation ;
- latéralement, en découpant dans la face d'observation plusieurs positions ayant subi (ou non) des compactages par les roues des engins qui ont circulé sur la parcelle après le dernier labour.

Dans les cas les plus simples, les volumes délimités par les intersections entre limites verticales et horizontales correspondent aux compartiments définis plus haut dans le cas d'une seule opération. Ces volumes élémentaires se distinguent par la nature et l'intensité des contraintes mécaniques qu'ils ont subies lors de l'itinéraire technique.

Cette stratification, réalisée après l'implantation de la culture, lorsque les principales opérations qui déterminent le compartimentage ont été effectuées (très généralement les interventions postérieures au semis, à l'exception de la récolte, n'affectent qu'une faible partie du volume de la couche travaillée), sert de cadre à la description des états structuraux, et s'avère indispensable à l'étude de leur déterminisme : l'analyse de l'origine des états structuraux observés (de l'histoire de la parcelle) dans une situation donnée passe d'abord par l'étude de leur localisation dans cet horizon (de leur géographie). Ainsi, l'observation des positions L3 permet d'étudier l'effet sur la structure du dernier labour, et c'est ensuite la comparaison de l'état des positions L1 et L2 avec celui de L3 qui permet d'analyser l'effet des compactages postérieurs au passage de la charrue sur un état structural visible en L3. C'est également l'étude du compartiment H5-L3, indemne de toute action anthropique depuis le dernier labour, qui permet d'analyser l'effet des opérations culturales antérieures à cette opération, en d'autres termes, de piéger les effets hérités du système de culture, (Manichon, 1987 ; 1988).

Description morphologique de l'état structural

Dans la méthode de description morphologique de la structure proposée par Manichon (1982), le parti pris est résolument déterministe : les critères de description sont ceux qui sont le plus directement en relation avec les facteurs majeurs de structuration du profil cultural. C'est ce qui a amené cet auteur à choisir les mottes comme niveau d'échelle privilégié pour l'observation de la structure. En effet, lorsqu'on applique à une parcelle qui ne subissait jusqu'alors pas d'actions anthropiques notables, un système de culture comportant des plantes annuelles et un travail du sol

1. Par équipement, nous entendons l'ensemble cellule motrice-outil.

2. On ne considère pas ici les cas où les passages sont croisés.

profond, on perturbe de façon importante son état structural. Partant d'un profil présentant une stratification assez simple, essentiellement verticale (on y distingue en particulier un horizon de surface riche en matières organiques) où l'élément de base de la description de la structure est l'agrégat, on assiste progressivement à une différenciation verticale et latérale des états structuraux. En particulier, on note la création de « sur-structures » par agglomération des agrégats initiaux au sein de mottes (sous l'effet du climat ou lors de compactages par les roues des tracteurs) qui sont ensuite divisées plus ou moins progressivement par fragmentation lors du travail du sol ou sous l'effet du climat et des racines. L'application d'un système de culture se traduit ainsi par un cycle, où alternent création de mottes par compactage, et destruction ou diminution du calibre de ces mottes par fragmentation. C'est donc bien au niveau des mottes qu'il convient de décrire les effets du système de culture sur le milieu.

C'est également le souci de l'analyse des relations entre système de culture et état structural qui a conduit cet auteur à distinguer deux niveaux d'organisation de la structure, l'état interne des mottes d'une part, leur calibre et leur mode d'assemblage d'autre part. La signification de ces deux niveaux d'organisation n'est en effet pas la même dans l'étude de la relation entre le système de culture et l'état structural du sol.

Le second niveau (assemblage des mottes) est contingent des actions culturales et climatiques récentes. Son évaluation se prête mal à l'analyse des effets à moyen et long terme du système de culture. Il est par contre indispensable de le prendre en compte dans l'évaluation des conséquences à court terme de l'état du profil sur la végétation. Le tableau I présente les critères retenus pour la caractérisation de ce deuxième niveau d'organisation de la structure. Dans une gamme donnée de calibre des mottes, la porosité structurale entre mottes, nulle par définition en M, décroît de F à SF puis SD. L'action des pluies, en particulier, entraîne une évolution plus ou moins rapide de l'organisation de l'espace poral entre mottes : passage de F à SF, puis SD, voire M. On observe une diminution des vides,

Tableau I. Critères de caractérisation du 2^e niveau d'organisation de la structure (Gautronneau et Manichon, 1987).

Un élément structural	Plusieurs éléments structuraux	
	Structure continue	Individualisés
	Soudés entre eux	
	Difficilement discernables	Facilement discernables
	↓	↓
	M	SD SF F

l'agglomération de terre fine..., en des évolutions qui ne sont pas distinguables de celles occasionnées par les actions de compactage modérées (sans changement d'état interne) sous les roues des engins. À l'échelle d'un compartiment, on peut regrouper les notations relatives au mode d'assemblage des mottes, et référer son état dominant à l'un des trois états-types dont les définitions figurent au tableau II.

Tableau II. Définition des états-types (Gautronneau et Manichon, 1987).

État type	Définition et origine
o	Dominance de modes d'assemblage F et SF sans mottes décimétriques ni cavités importantes. Terre fine abondante. Typiquement : bandes de labour fortement émietées.
b	Dominance de F avec mottes décimétriques et vides importants. Peu de terre fine. Typiquement : bandes de labour peu fragmentées.
c	Pas de discontinuités structurales notables ; dominance de M et SD. Typiquement : effet de compactages postérieurs au labour sur un sol fortement émietté.

Le premier niveau est, quant à lui, moins contingent. De plus, sa définition, centrée sur l'importance et la nature de la porosité structurale des mottes, est directement liée aux facteurs de structuration du profil (figure 2).

L'état interne Γ est directement en relation avec les agrégats : Les mottes Γ proviennent de l'agglomération d'éléments plus fins, constituant la terre fine, sous l'effet des agents climatiques ou lors de l'application de contraintes modérées. Les caractéristiques de cet état (morphologie, densité, propriétés) sont donc variables d'un matériau à l'autre, et, pour un même matériau, selon l'histoire des contraintes mécaniques subies.

Δ correspond à un état d'organisation limite, où l'espace poral structural a été très fortement diminué sous l'action de contraintes mécaniques sévères (définies par le couple humidité-énergie appliquée), le plus souvent anthropiques, ayant entraîné la coalescence des agrégats préexistants, soit au sein de mottes Γ , soit dans la terre fine. Sur des matériaux de texture limoneuse, provenant du centre expérimental de Grignon, Manichon (1982), Manichon et Roger-Estrade (1990) et De Leon (1991) ont effectué des mesures de densité de mottes, avant d'examiner leurs états internes. Ces différents auteurs observent toujours que la distribution des densités s'ordonne en fonction des types d'états internes, l'état Δ étant associé aux densités les plus élevées. Par contre, ces distributions sont plus ou moins disjointes, et la

variabilité des valeurs associées à l'état interne Δ plus ou moins forte, suivant les expérimentations. Cette variabilité apparaît cependant toujours plus faible pour cet état interne que pour les échantillons non Δ .

Φ dérive de l'état Δ par le jeu des agents naturels (gel et alternance humectation-dessiccation), lorsque la teneur en argile le permet. C'est parce que la porosité fissurale qui se crée de cette manière est aisément reconnaissable au champ, qu'a été introduite cette modalité. Elle permet d'affiner la description, en distinguant les effets de ces agents de ceux des outils.

De nombreuses observations au champ montrent que ces différents états internes coexistent au sein d'un même profil, en proportions très variables suivant les systèmes de culture. Cela conduit à l'idée que les états sont reliés entre eux par les processus de structuration (compactage et fragmentation sous l'effet des agents naturels et anthropiques), et que les passages de l'un à l'autre sont réversibles.

On peut alors émettre l'idée que les teneurs respectives entre ces différents éléments caractérisent, à un moment donné, un état d'évolution du profil cultural. Plus simplement, la proportion d'éléments structuraux d'état interne Δ peut être considérée comme le solde du bilan des actions ayant entraîné tassement et fragmentation (Manichon et Roger-Estrade, 1990).

Utilisation pour le diagnostic au champ de l'état structural du profil cultural

Le diagnostic sur l'origine des états observés repose sur l'analyse de la localisation spatiale des états structuraux dans la couche labourée : ainsi on distinguera les positions latérales L3, qui permettront d'étudier les effets directs du labour sur la structure de celle des positions L1 et L2, qui donneront des indications sur l'effet des différentes interventions postérieures au labour. On cherchera à caractériser les effets à plus long terme dans le compartiment H5-L3 du profil.

Cette analyse permet ainsi de détecter les opérations culturales ou les éléments du système de culture qui sont responsables de l'état observé. Le tableau III, bâti à partir d'une synthèse des comportements du sol sous l'action des outils, observés au champ, récapitule les règles d'interprétation. L'utilisation de ce tableau doit être faite en considérant l'ensemble des différents compartiments du profil : ainsi un état interne (dominant en L1 ou L2 n'indique des dégradations intenses sous les roues que si l'état en L3 est fragmentaire (o), avec dominance de l'état interne Γ .

Tableau III. Les états des positions latérales en H5 et leur interprétation, cas d'une parcelle habituellement labourée (d'après Manichon, 1986).

Position L3		Position L1 et L2	
État	Interprétation État initial Eo et effet du labour	État	Interprétation Effets des travaux post-labour
$o\Gamma^a$	Eo non dégradé ^b , fragmentation intense par le labour	$o(T)\Gamma$ $c\Gamma$ $c\Delta$	Pas de dégradation Dégradation modérée Dégradation intense
$o\Delta$	Éléments initiaux « Δ » de faible calibre, dégradation ancienne ou fissuration préalable	$o(T)\Delta$ $c\Delta$	Pas de dégradation Dégradation modérée ou intense
$b\Gamma$	Eo non dégradé, fragmentation limitée due aux conditions de labour	$b(T)\Gamma$ $c\Gamma$ $c\Delta$	Pas de dégradation Dégradation modérée Dégradation intense
$b\Delta$	Eo dégradé	$b(T)\Delta$ $c\Delta$	Pas de dégradation Dégradation modérée ou intense
$c\Gamma$	Eo non dégradé, pas de labour récent, ou prise en masse sous l'action du climat ^c	$c\Gamma$ $c\Delta$	Pas de dégradation Dégradation intense
$c\Delta$	Eo dégradé, absence de fragmentation (pas de labour récent)	$c\Delta$	Pas de dégradation ou dégradation modérée ou dégradation intense

a. Cette notation signifie : état interne (dominant, pour un état type « o » lui-même dominant en L3.

b. Eo : état avant le dernier labour.

c. Pour l'interprétation, tenir compte du temps écoulé entre le labour et l'observation du climat et de la texture.

Modélisation de l'évolution à long terme de l'état structural du profil cultural

Proposition d'un indicateur

Lorsque l'on s'intéresse à l'évolution à long terme de l'état structural des couches labourées, plusieurs considérations découlent de ce qui précède.

C'est au sein des différents compartiments de la couche labourée qu'il faut rechercher la mesure d'un indicateur des effets à long terme du système de culture.

En particulier, le compartiment H5-L3 apparaît particulièrement indiqué. Cependant, si ce compartiment

apparaît comme le lieu le plus apte pour la mesure à un moment donné d'un indicateur des effets hérités du système de culture, la situation est différente dès lors que l'on veut modéliser ces effets au cours du temps, sur une période qui dépasse l'année d'observation et celle qui la précède. Limiter cette modélisation au seul compartiment H5-L3 n'aurait de sens que si sa position était fixe dans la parcelle d'une année sur l'autre (si les passages d'engins sont parfaitement localisés au même endroit tous les ans). Il faut également considérer l'existence de transferts entre compartiments, par déplacement latéral lors du labour : ce fait interdit de considérer l'état de H5-L3 à un moment donné, indépendamment de celui qu'avaient, les années précédentes, les autres compartiments du profil. Il ressort de ces considérations que le système que nous modéliserons sera l'ensemble de la couche travaillée de parcelles labourées. Nous conserverons cependant la possibilité d'identifier au sein de cette couche de sol, les différents compartiments du profil, tels qu'ils ont été définis ci-dessus, nous laissant ainsi non seulement la possibilité de confronter les résultats du modèle aux mesures de terrain, mais également celle de tester par simulation la capacité de cet indicateur à différencier les systèmes de culture sur la base de leurs effets à long terme sur la structure du sol.

C'est un critère basé sur l'état interne des mottes qui se prête le mieux à la mesure de l'évolution à long terme de l'état structural.

C'est en effet ce niveau de caractérisation qui est le moins contingent des actions climatiques récentes, et c'est également l'état interne qui est le plus directement relié aux facteurs de structuration majeurs du profil cultural. Plusieurs résultats expérimentaux (De Leon, 1991 ; Coulomb, 1991), et de nombreuses observations de terrain, ont amené à retenir, comme indicateur de l'effet à long terme des systèmes de culture sur l'état structural, la teneur en éléments d'état interne Δ des différents compartiments de la couche labourée. On admet ce faisant l'hypothèse d'une certaine persistance de l'état interne Δ au sein de cette couche, en dehors des compartiments affectés par les compactages en cours de culture, ainsi que l'invariance de la teneur en Δ sous l'action du labour.

Modélisation

Cet indicateur étant défini, il s'agissait d'en modéliser l'évolution au cours du temps, de manière à étudier, par simulation, les conditions d'atteinte de l'état moyen du profil cultural, dont les caractéristiques (niveau, stabilité) sont déterminées, dans un milieu donné, par le système de culture et les conditions de sa mise en œuvre. Après avoir testé expérimentalement la pertinence de cet indicateur sur le centre de

Grignon, nous avons proposé un modèle reposant sur l'hypothèse que l'indicateur évolue, dans une situation régulièrement labourée, sous l'effet de trois types de flux : *création*, sous les roues des engins, de volumes Δ , qui sont ensuite retournés et déplacés latéralement lors du labour, alternativement dans un sens puis dans l'autre au fil des années ; enfin la disparition d'éléments (s'opère par fragmentation lors de la reprise et sous l'effet du climat (alternances humectation-dessiccation ou gel-dégel)). Partant d'un état initial donné, ces différentes actions sur la structure de la couche labourée l'amènent progressivement à un état moyen, caractéristique du système de culture, ce dernier déterminant l'intensité de chacune de ces actions, ainsi que l'importance et la localisation spatiale des volumes affectés à chaque étape de l'évolution.

Ces considérations nous ont amené à retenir, dans un premier temps, un modèle compartimental comme support pour la simulation de cette évolution. Les compartiments correspondent aux volumes de sol déplacés par la charrue, et sont caractérisés, à un moment donné, par leur teneur en Δ . Par analogie avec les modèles compartimentaux utilisés en cinétique chimique, on considère que cette teneur évolue sous l'effet des trois types de flux énoncés ci-dessus, avec un pas de temps annuel.

Le paramétrage du modèle dans les conditions de fonctionnement des parcelles du centre expérimental de Grignon nous a permis de réaliser des simulations de l'évolution de l'indicateur que l'on a confronté aux mesures de teneur en Δ , effectuées sur trois parcelles (numérotées 1, 2 et 3 dans la suite du texte). Les parcelles 1 et 2 comprenaient au moins 8 cultures d'hiver en dix campagnes, et la parcelle 3 portait, depuis plus de dix ans, une succession maïs-blé d'hiver. Les observations ont toutes été réalisées alors que les 3 parcelles étaient cultivées en blé.

Sur le domaine expérimental, ces parcelles ont une longueur de 30 m pour une largeur de 17,50 m. Ces dimensions sont adaptées à l'équipement spécifique du centre dont on dispose pour les cultiver : pour l'ensemble des opérations culturales, on utilise un tracteur dont la voie (distance entre les axes des pneumatiques) est de 1,75 m, et la largeur des pneumatiques de 0,35 m. Les équipements utilisés pour les reprises ainsi que le semoir ont cette même largeur de 1,75 m. Ainsi lors de l'implantation des cultures et du semis, il est possible de localiser les passages de tracteur de telle sorte que chaque parcelle expérimentale soit divisée en dix planches correspondant à dix trains de semoir, chacune étant encadrée par deux zones de roulement. Dès que la parcelle a été labourée, les passages de roues ne s'effectuent que sur ces zones, et ce jusqu'à la récolte. Pour les traitements en cours de culture, on dispose d'un épandeur qui permet de traiter une parcelle en deux

passages, eux aussi localisés sur les zones de roulement. Tous les travaux sont effectués dans la même direction. Un système de repères permet de localiser les parcelles tous les ans au même endroit, ce qui entraîne une position fixe d'une année sur l'autre des zones de passage de roues. Par contre à la récolte, les passages ne sont pas localisés au niveau de ces bandes de roulement. L'observation des chantiers de récolte montre qu'un passage de roues en moyenne se situe en dehors de celles-ci.

Si l'on ne tient pas compte des opérations pour lesquelles on n'a pas de localisation stricte des passages de roues, les règles de circulation dessinent sur les parcelles un motif géométrique simple et bien défini dans l'espace (figure 3) : il se caractérise par la répétition d'une bande de roulement de 35 cm de largeur (la position L1), et d'une zone de 1,40 m de largeur,

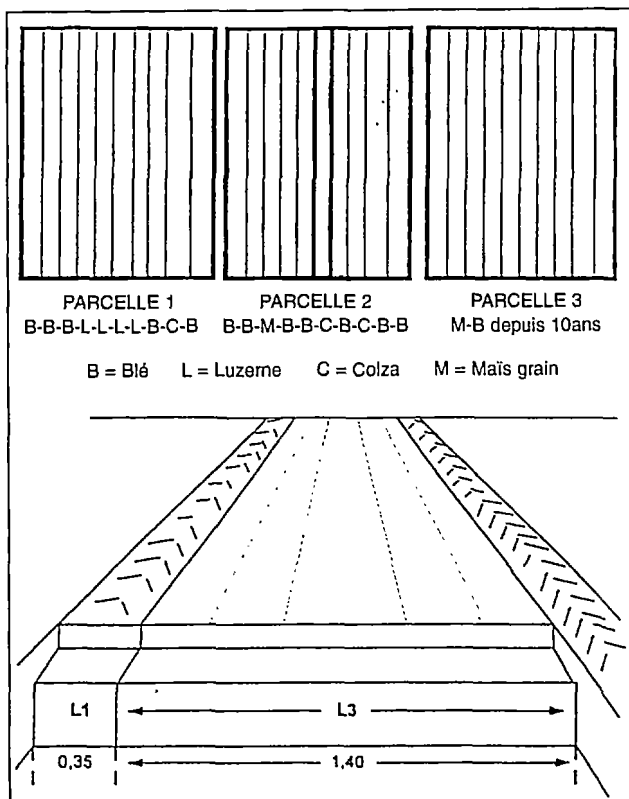


Figure 3. Motif géométrique caractéristique des parcelles du centre expérimental de Grignon.

indemne de tout compactage postérieur au labour (position L3).

La figure 4 donne le schéma de principe du modèle compartimental correspondant à cette description du motif géométrique caractéristique du système de culture pratiqué. Le modèle comprend 5 compartiments. Le premier correspond à la position L1, les quatre autres composent la position L3 dont la largeur est égale à quatre fois la largeur de travail d'un corps de charrue. Les transferts entre compartiments sont dus au déport latéral par la charrue lors du retournement des bandes de terre, qui n'excède pas deux compartiments. Enfin, ne pouvant considérer un nombre infini de compartiments, nous avons introduit un bouclage traduisant le fait que le motif géométrique se répète dans la parcelle (les compartiments d'une extrémité du motif recevant la terre des compartiments de l'autre extrémité du motif adjacent lors du retournement de la bande de terre découpée par la charrue).

Les résultats des simulations pour les trois parcelles sont présentés sur les figures 5, 6 et 7. La valeur présentée est celle de la teneur moyenne des 4 compartiments de L3.

Parcelle n° 1

Sur cette parcelle, qui ne comprend que des cultures d'hiver, on considère que les opérations de récolte n'ont aucun effet sur la structure.

On constate que la valeur moyenne des compartiments de L3 tend vers une valeur d'équilibre stable : le système apparaît en état d'équilibre statique (Pavé, 1994). La valeur moyenne pour l'ensemble de la position L3 (35,03 %) est très proche de la valeur mesurée dans la parcelle 1 (33,4 %).

Parcelle n° 2

Dans cette situation, le système de culture pratiqué est comparable à celui de la parcelle 1 (du point de vue de la fréquence des cultures d'été), à l'exception de la présence d'une culture de maïs huit ans avant la date d'observation. Pour la simulation, on introduit donc un compactage supplémentaire sur l'un des

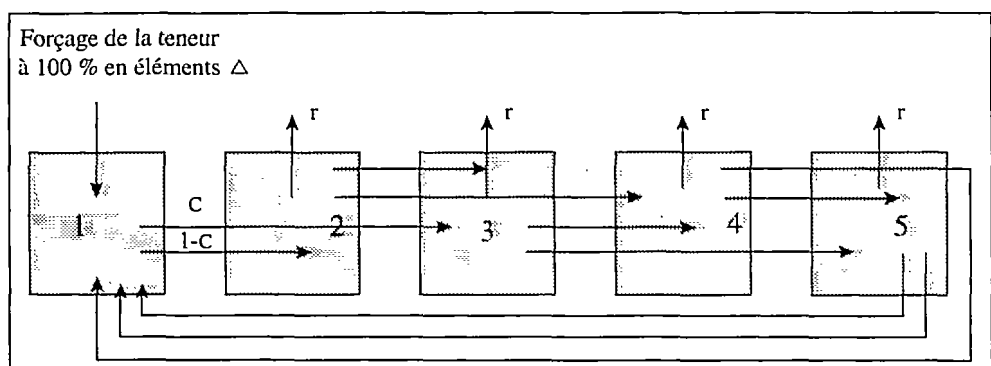


Figure 4. Schéma de principe du modèle compartimental.

compartiments de L3, lors de la troisième année de pratique du système de culture (c'est-à-dire huit ans avant la date d'observation). On observe une brusque augmentation la troisième année, due au compactage supplémentaire simulant la récolte du maïs, puis la teneur tend vers la valeur obtenue dans les conditions de la parcelle 1. L'année d'observation est proche du moment où les deux courbes se rejoignent, ce qui

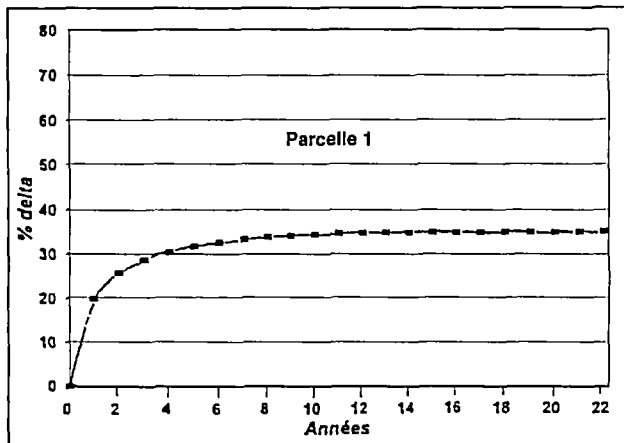


Figure 5. Simulation de l'évolution de la teneur en Δ de la position L3 de la parcelle 1.

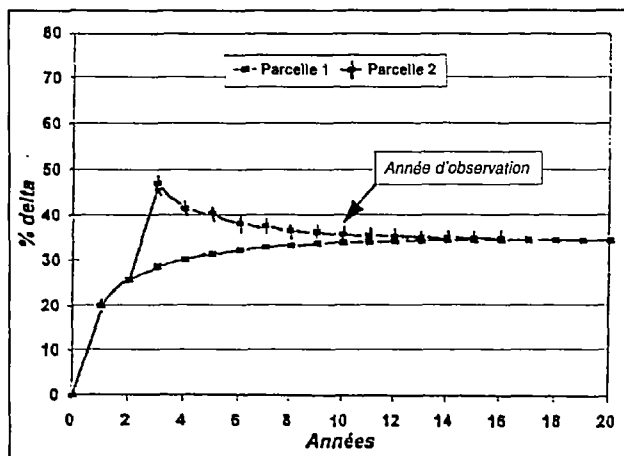


Figure 6. Simulation de l'évolution de la teneur en Δ de la position L3 des parcelles 1 et 2.

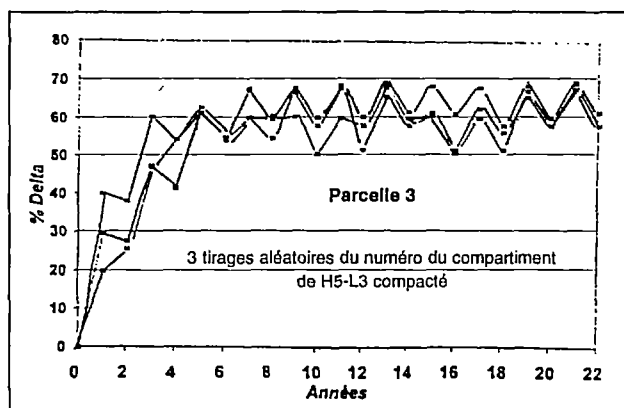


Figure 7. Simulation de l'évolution de la teneur en Δ de la position L3 de la parcelle 3.

concorde avec la similitude des valeurs mesurées sur ces deux situations. On note par ailleurs que cinq à six années sans compactage supplémentaire sont nécessaires pour retrouver, après une récolte dégradante, une valeur proche de l'équilibre (pour « rattraper » la situation dégradée). Le comportement du modèle confirme ici les résultats de l'analyse mathématique, ayant montré l'atteinte d'un état d'équilibre asymptotiquement stable.

Parcelle n° 3

Pour cette parcelle, on introduit donc un tassement supplémentaire une année sur deux en forçant un compartiment de L3 à 100 % de Δ pour simuler l'effet dégradant de la récolte du maïs. Le numéro du compartiment affecté par ce tassement supplémentaire est tiré au hasard chaque année correspondant à une culture de maïs. La courbe décrivant l'évolution de la teneur moyenne en L3, dont on a présenté trois exemples correspondant à trois séries de tirages aléatoires, présente une allure générale semblable à celle décrivant l'évolution de l'indicateur dans la parcelle 1, mais :

- la teneur atteinte est plus élevée ;
- le temps d'atteinte de l'équilibre est différent entre les trois tirages ;
- on observe une oscillation des valeurs moyennes autour de la moyenne générale après huit années environ de pratique du système de culture.

Dans cette situation, le système atteint, en huit ans environ, un état d'équilibre dynamique, oscillant plus ou moins régulièrement autour d'une valeur moyenne. Les mesures ayant été effectuées sur le terrain l'année culturale suivant la récolte du maïs, il faut tenir compte des valeurs simulées aux mêmes dates pour effectuer la comparaison entre le modèle et les données expérimentales (lors des années paires dans notre modèle). La moyenne des valeurs atteintes les années paires, est, lorsque le système est en régime stationnaire (à partir de la huitième année), de 66,7 %, à rapprocher des 68,3 % mesurés sur la parcelle 3.

Conclusion

Les résultats de la simulation ont permis de distinguer les mêmes groupes de parcelles que par la mesure directe de l'indicateur. L'influence de l'opération de récolte sur l'évolution de l'état structural est ici bien mise en évidence comme facteur majeur de différenciation du profil. Il apparaît aussi, par mesure directe comme par simulation, une quasi-identité des valeurs numériques obtenues dans des parcelles qui n'ont pourtant pas connu la même succession de cultures. Ceci suggère que, plus que la nature de ces der-

nières, ce sont les techniques culturales qu'elles impliquent et les conditions hydriques du sol au moment des interventions qui sont déterminantes pour l'évolution de l'état structural. Plus encore, cette quasi-identité des valeurs numériques suggère que le facteur déterminant tient aux caractéristiques géométriques des équipements employés et à leurs règles d'emploi. Ainsi, lorsque, par simulation, on accroît la largeur des outils employés, on observe une diminution de la valeur à l'équilibre et une augmentation de la variabilité des teneurs entre compartiments. Cet accroissement de la variabilité spatiale de l'état structural peut avoir diverses conséquences (sur le comportement de la végétation, la traficabilité...) et inciter les agriculteurs à rechercher des moyens permettant de limiter le tassement. Une adaptation simple des règles de fonctionnement du modèle permet d'étudier l'effet de ces mesures. On constate que la réduction du flux d'entrée de Δ dans le système se traduit par un abaissement sensible de la valeur d'équilibre, mais qu'à flux d'entrée égal, une répartition entre plusieurs compartiments entraîne également une diminution de la valeur d'équilibre. Cet exemple montre le parti que l'on peut tirer de ce modèle très simplifié pour étudier l'effet de changements techniques.

Une fois confortées ces hypothèses sur le fonctionnement de la couche labourée, l'étape suivante du travail a consisté à envisager l'application du modèle à des conditions plus proches de la réalité agricole que dans les parcelles expérimentales étudiées à Grignon (Roger-Estrade, 1995). Ceci a conduit à proposer un mode de simulation basé sur une représentation de la couche labourée prenant mieux en compte la répartition spatiale des éléments structuraux d'état interne Δ au sein de la couche labourée : celle-ci est représentée par un réseau de points régulièrement répartis sur une maille carrée de 2 cm de côté ; chaque point, repéré par ses coordonnées au sein du profil, est affecté d'une modalité d'état interne, Δ ou non Δ , suivant sa position par rapport aux compactages ou aux fragmentations affectant le profil. Un programme informatique calcule les déplacements des points lors du labour. Les résultats des simulations ont été confrontés à des observations de profils en parcelles d'agriculteurs. Ces confrontations ont permis de valider l'aptitude du modèle à différencier les systèmes de culture et à prédire la morphologie générale des profils. Il faut souligner que ces résultats ont été obtenus malgré des informations relativement succinctes sur les situations. C'est l'un des intérêts de ce modèle que de ne nécessiter qu'un nombre de paramètres très réduit pour faire des simulations.

Les perspectives de valorisation de ce travail concernent tout d'abord l'utilisation du modèle pour simuler l'évolution, sous l'effet des systèmes de culture, d'autres composantes de l'état du profil que sa seule structure. Afin de contribuer à une évaluation plus globale des effets précédents, dans le cadre d'une

étude fine de la durabilité des systèmes de culture, il s'agira alors de modéliser l'évolution quantitative et la répartition spatiale au sein des horizons labourés de composantes telles que le stock de semences adventices (dont le taux de survie est lié à la position dans le profil), les résidus végétaux (dont il importe de connaître la répartition dans le profil en relation avec l'évolution de certains agents pathogènes), voire du phosphore ou du potassium (éléments peu mobiles dans le sol, dont la répartition et l'accessibilité aux racines est conditionnée par le travail du sol – Roger-Estrade, 1991) ou des résidus de pesticides. Le modèle proposé ouvre la voie à des travaux portant sur la dynamique de l'organisation spatiale du profil cultural sous l'effet des systèmes de culture.

Références bibliographiques

- COULOMB I., 1991. Analyse quantitative du comportement du sol au labour : rôle de l'état structural initial. Thèse Doct. Ing., Ina-Pg, 230 p.
- De LEON F., 1991. Morphologie, propriétés physiques et conditions de formation des éléments structuraux de la couche labourée. Contribution à l'interprétation du profil cultural. Thèse Doct. Ing., Ina-Pg, 133 p.
- GAUTRONNEAU Y, MANICHON H., 1987. Guide méthodique du profil cultural. Lyon, Paris, Ceref/Geara Eds, 71 p.
- MANICHON H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Doct. Ing., Ina-Pg, 214 p.
- MANICHON H., 1987. Observation de l'état structural et mise en évidence d'effet de compactage des horizons travaillés. In "Soil compaction and regeneration", G. Monnier et M.J. Goss Eds, Balkema, Rotterdam, 39-52.
- MANICHON H., 1988. Compactage, décompactage et système de culture. C.R. Acad. Agr. Fr., 76 : 39-52.
- MANICHON H., ROGER-ESTRADE J., 1990. Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. In « Systèmes de culture », Les Colloques de l'Inra, Paris.
- PAPY F., 1984. Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps. Thèse Doct. Ing., Ina-Pg, 232 p.
- PAVE A., 1994. Modélisation en biologie et en écologie. Lyon, Aléas, 560 p.
- ROGER-ESTRADE J., 1991. Effet du travail du sol sur la localisation et l'accessibilité des éléments minéraux ; conséquences sur l'élaboration du rendement du maïs (*Zea mays* L.). Sci Sol, 29 : 159-173.
- ROGER-ESTRADE J., 1995. Modélisation à long terme de l'état structural des parcelles labourées. Contribution à l'analyse des effets des systèmes de culture. Thèse Ina-Pg, 185 p.
- TARDIEU F., 1984. Étude au champ de l'enracinement du maïs. Influence de l'état structural sur la répartition des racines, conséquences sur l'alimentation hydrique. Thèse, Ina-Pg, Paris, 218 p.

Perspectives de travail

Le travail du sol : un champ de recherches trop négligé

Hubert MANICHON
Cirad-Ca, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

Le travail du sol, c'est-à-dire son aménagement pour permettre l'implantation des cultures, correspond à un ensemble de pratiques très diversifiées, et donc difficiles à connaître et à étudier.

Dans les agricultures peu mécanisées et peu utilisatrices d'intrants, ces pratiques constituent le moyen principal dont disposent les paysans pour conduire leurs cultures. Elles sont coûteuses en travail — temps et pénibilité — et sont souvent la cause d'un grand étalement des dates de semis, préjudiciable à l'utilisation optimale des facteurs climatiques par les cultures.

Dans les agricultures fortement mécanisées, l'achat et l'utilisation des tracteurs et des outils génèrent des coûts importants, souvent déterminants pour la rentabilité des exploitations, sans que l'on puisse toujours affirmer qu'ils sont réellement justifiés pour la conduite des systèmes de culture.

On s'attend donc à ce que les institutions de recherche agronomique placent, à un niveau élevé de leurs priorités, les travaux dans ce domaine. Mais force est de constater que les chercheurs abordent le travail du sol avec prudence, voire réticence.

Et pourtant, l'évidence du terrain montre que, sauf situations particulièrement favorables, notamment sur le plan climatique, les techniques utilisées pour l'implantation des cultures font partie des déterminants essentiels de la réussite de ces cultures. Si les conditions de sol nécessaires ne sont pas assurées, les autres facteurs de production (variétés améliorées, engrais...) seront mal valorisés : la recherche agronomique peut-elle rester muette sur ce domaine ? L'évidence du terrain montre aussi que l'évolution à long

terme des sols dans l'espace cultivé, qu'il s'agisse d'améliorations ou de dégradations, est déterminée largement par les pratiques annuelles de travail du sol : peut-on alors parler de gestion des ressources naturelles, ou d'évolution de la fertilité des sols, sans analyser sérieusement ces pratiques et leurs effets sur le milieu de culture ?

On tentera ici d'expliquer les raisons de ce paradoxe, qui tiennent à la difficulté, en soi, du sujet et à son statut scientifique. Puis, tirant parti de cette analyse, on indiquera ce que pourraient être les grandes orientations des recherches dans ce domaine.

Le travail du sol : des effets multiples à analyser et à diagnostiquer

Parmi les techniques culturales, le travail du sol constitue un domaine d'étude particulièrement complexe, dont les bases conceptuelles ont été établies, il y a de nombreuses années en France, par l'équipe du Professeur Hénin, dans un ouvrage qui reste d'actualité : *Le profil cultural* (Hénin et al., 1969). La principale difficulté, soulignée par ces auteurs, tient à ce que l'on ne peut établir de relation causale stable entre l'emploi d'un outil et l'état du sol qui en résulte. Dès lors, ambitionner de relier directement l'emploi d'un outil, ou la conduite d'un itinéraire technique (Sebillotte, 1978), avec le rendement de la culture relève de l'illusion. Dans la réalité, le travail du sol n'agit directement que sur le sol, créant des condi-

tions plus ou moins favorables auxquelles réagiront les plantes, en interaction avec les conditions climatiques. Il est donc nécessaire (i) de caractériser les effets du travail du sol sur l'état du milieu de culture, et (ii) d'étudier le fonctionnement du peuplement végétal en relation avec cet état. On abordera ci-après ces deux thèmes à partir d'exemples.

L'analyse des effets des techniques sur le sol

La mise en œuvre d'un outil déterminé se décline en plusieurs effets, recherchés ou non, favorables ou défavorables, ce qui rend délicat l'établissement du bilan de son emploi. L'exemple du labour (à l'aide d'une charrue à socs et versoirs, pour être plus précis) est particulièrement illustratif.

On attend très souvent du labour une contribution efficace à la lutte contre les plantes adventices. Cet effet n'est pas facile à analyser. En effet, le retournement des bandes de terre découpées par la charrue permet bien une destruction mécanique de la végétation existante. Mais il s'accompagne d'un retour, vers la surface du sol, de graines d'autres adventices enfouies en profondeur par le labour précédent : quel sera le bilan de ces actions sur le salissement de la parcelle ? Cela dépend de la nature des adventices, de leur écophysiologie et de leurs modalités de multiplication, comme de la température et de la pluviométrie dans la période suivant le labour. Les réglages de la charrue (profondeur d'action, degré de retournement des bandes, réglage de la rasette...) et la forme du versoir influent aussi sur les capacités de repousse et la qualité de la destruction des plantes. On ne peut donc pas fixer, à priori, un niveau d'efficacité général à cette opération. Par contre, on peut déterminer les caractéristiques du sol à rechercher par le labour, compte tenu de sa date et de la biologie des adventices à éliminer, pour atteindre les effets souhaités. Dans les cas où ces résultats pourront être obtenus, le labour sera une technique adaptée, qu'il faudra comparer (en termes d'efficacité, de possibilités de mise en œuvre et de coûts) à d'autres moyens ; dans les autres cas (sol difficile à labourer du fait de ses propriétés mécaniques, calendrier de travaux imposant des dates de labour inadéquates pour cette fonction...), il sera inopérant et il faudra obligatoirement avoir recours à d'autres moyens pour éliminer les adventices.

Un autre effet recherché par le labour, l'ameublissement du sol sur une certaine épaisseur pour favoriser l'infiltration de l'eau et l'implantation des racines, est souvent retenu comme objectif principal de l'emploi de cette technique. Mais la charrue crée en même temps une discontinuité à son fond de travail, qui peut être un obstacle sévère à l'accès aux couches

sous-jacentes : soit du fait du compactage (on parle de « semelle de labour », horizon tassé que l'on peut observer dans de nombreux cas), soit par la destruction de la continuité des pores biologiques préexistants, utilisables par les racines, et qui étaient capables d'assurer un transfert rapide de l'eau saturante jusqu'aux couches profondes. Dans beaucoup de cas, les causes d'un dysfonctionnement des drainages doivent ainsi être recherchées dans l'emploi de la charrue. Les techniques de « non labour » peuvent au contraire présenter des avantages appréciables ; à moins que les pores biologiques soient trop peu nombreux et se saturent rapidement en eau, lorsque l'accès à une couche profonde plus perméable n'est pas possible. On voit que les avantages et inconvénients respectifs de ces techniques dépendront de la pluviométrie, de la pente du terrain, des caractéristiques pédologiques et en particulier de drainage interne du sol, il faudra donc raisonner le choix de leur emploi dans chaque contexte.

On remarquera aussi, sans détailler plus ce point, que les effets directs de l'emploi d'un outil dépendent de nombreux facteurs : l'outil lui-même (la forme des pièces travaillantes, leurs réglages), le moyen utilisé pour le déplacer dans la parcelle (traction animale ou motorisée) et la vitesse d'avancement, et bien sûr le sol et son état au moment du travail.

La question de la validité des références établies dans des domaines expérimentaux, c'est-à-dire dans des conditions souvent très éloignées de la pratique agricole, se pose aussi. Par exemple, dans le cas des labours en traction animale des sols « *dior* » du Sénégal, on avait pu constater (Manichon et Chopart, non publié) que les états de la couche labourée obtenus en station et dans les champs paysans environnants étaient très différents : les champs paysans se caractérisaient toujours par une couche labourée de faible épaisseur et d'état pulvérulent, très sensible à l'érosion hydrique et éolienne, alors que dans les parcelles expérimentales les labours étaient plus motteux (même après précédent arachide) et plus profonds. Les causes de ces différences étaient aussi bien la qualité de l'équipement et de sa conduite que la force de traction des bœufs (liée à leur santé et à leur alimentation). Dès lors, la supériorité du labour sur les autres techniques, pourtant bien établie expérimentalement, peut-elle être retrouvée dans les champs paysans où le « labour » ne constitue en réalité qu'un simple grattage ? Dans le cas cité, les parcelles expérimentales étaient conduites avec beaucoup de soins. Dans d'autres, c'est dans les domaines expérimentaux, soumis à des contraintes de fonctionnement de natures diverses, que les travaux du sol sont réalisés dans des conditions pénalisantes pour les cultures, en particulier, lorsqu'ils sont plus tardifs que ceux des paysans. Dans tous les cas, la question de l'extrapolation doit être examinée de façon critique. Pour l'établissement

de références sur le travail du sol réellement utilisables, il est très généralement insuffisant de conduire des expérimentations en station comparant au travers des rendements des cultures la « technique traditionnelle » (mise en place par l'expérimentateur, représente-t-elle réellement ce que font les différents paysans ?) à une technique dite « améliorée ».

Il est donc dangereux de porter des jugements tranchés sur une technique culturale, tant est grande la diversité des effets recherchés et celle des effets obtenus. Dire sans nuance que « le labour est indispensable », ou au contraire que « le labour doit être proscrit », cela n'a pas de sens si le contexte n'est pas précisé dans ses différentes composantes. On n'assisterait pas à de telles querelles d'opinion si un effort de caractérisation des résultats réellement obtenus et de leurs déterminants, et le suivi de leurs conséquences, étaient plus souvent faits. Ces études fournissent les moyens objectifs d'un raisonnement du choix et des conditions et modalités d'emploi des outils, selon les situations écologiques et économiques.

Un bon exemple de ces études est celles qui ont été réalisées dans les brésiliens (Séguy *et al.*, 1996), qui ont diagnostiqué le caractère néfaste des labours (réalisés ici avec des outils à disques) sur l'intensité de l'érosion hydrique (contrainte physique principale dans ces situations, renforcée par l'absence de protection de la surface, la végétation étant enfouie par le labour, et par la réduction de l'infiltration due aux semelles de labour), et montré les avantages comparatifs des systèmes de semis direct avec couverture végétale. A partir de ces diagnostics, des systèmes de culture complets, centrés sur la technique de semis direct, ont pu être proposés avec succès aux agriculteurs.

Il est particulièrement important, en effet, d'aborder les questions du travail du sol au sein des systèmes de culture, et non pas isolément. Dans la réalité, plusieurs opérations culturales qui se succèdent dans la même parcelle, certaines ayant pour objectif l'aménagement du sol, d'autres concernant l'entretien ou la récolte des cultures : c'est l'ensemble de l'itinéraire technique qu'il faut analyser pour comprendre comment le sol a évolué au cours de la campagne, et ce qui en est résulté pour la culture.

L'évolution à long terme des caractéristiques physiques du profil cultural dépend, dans un contexte déterminé de sol et de climat, des effets cumulatifs des itinéraires techniques utilisés pour les différentes cultures de la succession : on peut parler (Sebillotte, 1990) d'un « état moyen » du profil cultural, caractérisant le résultat de cette évolution pour un système de culture et un milieu donnés. Il est important de savoir si l'on peut gérer cette évolution, en jouant sur les caractéristiques des outils et leurs conditions d'emploi, pour se prémunir contre des évolutions défavorables à long terme. A cet égard, la modélisation du bilan des actions antagonistes de dégradation et d'amélioration

de l'état physique, sur un pas de temps annuel (Roger-Estrade, 1995) est un moyen puissant de simulation et de prévision. Les résultats ainsi obtenus montrent, en accord avec de nombreuses observations au champ, que les opérations de récolte des cultures jouent dans les systèmes mécanisés, par les compactages intenses qu'elles peuvent introduire, un rôle déterminant dans l'évolution du sol. Ces résultats confirment combien il serait insuffisant de limiter les analyses aux seules opérations de travail du sol.

La mise en évidence de conséquences sur le rendement des cultures

La caractérisation de l'état du profil cultural n'aurait guère d'utilité pratique, quant au mode de raisonnement du choix des techniques de travail du sol, si l'on n'était pas capable de le mettre en relation avec le comportement des cultures.

La question, justement, de la détermination de la part de responsabilité qui revient au travail du sol dans l'élaboration du rendement des cultures, est particulièrement délicate et ne peut s'aborder qu'en interaction avec d'autres éléments (le climat, la richesse chimique du sol...). L'une des difficultés essentielles rencontrées est bien qu'il n'est pas possible d'établir des références stables, reliant l'emploi de techniques de travail du sol aux rendements des cultures : le classement entre les techniques de travail du sol, exprimé au travers des rendements, varie selon les conditions climatiques et édaphiques.

Ceci se comprend aisément, et n'occasionne pas de controverse, lorsque l'on considère la variabilité inter-annuelle des rendements d'une culture, pour un même itinéraire technique et un même précédent cultural. Chacun admet qu'en année très sèche les rendements soient limités par un déficit de l'alimentation hydrique, et ceci quelle que soit la technique d'implantation utilisée. Chacun admet aussi qu'en cas de périodes de sécheresse limitées dans le temps, il y ait un avantage aux travaux du sol qui ont permis un enracinement plus profond et plus dense, permettant l'utilisation maximale des réserves en eau du sol. Dès lors, il suffit de réaliser une étude fréquentielle des risques climatiques pour déterminer la technique la plus satisfaisante. On remarquera cependant qu'il ne s'agit pas forcément de celle qui donnera, sur plusieurs années, la moyenne la plus élevée : selon la situation des paysans, et selon le contexte économique dans lequel ils se situent, on peut au contraire préférer une solution moins performante en moyenne, mais qui corresponde à des amplitudes interannuelles plus faibles.

La mise en œuvre de ce raisonnement, pour l'aide à la décision des agriculteurs dans le choix de leurs itinéraires techniques, suppose implicitement que la variabilité intra-annuelle des résultats obtenus pour une

même technique et dans un même sol, est faible vis-à-vis de la variabilité interannuelle. L'exemple suivant, tiré d'une enquête portant sur plus de 100 parcelles cultivées en blé d'hiver dans une région de grande culture en France (Coulomb *et al.*, 1990) montre que cet aspect ne peut pas toujours être négligé.

Dans cette région, les techniques de travail du sol et de semis sont très voisines entre exploitations, et semblent bien adaptées a priori aux données climatiques et pédologiques. Elles comportent en effet toujours un labour d'automne dont les fonctions principales sont dans ces sols limoneux : (i) d'assurer l'évacuation des pluies hivernales par la création d'une importante porosité structurale dans la couche travaillée (les techniques sans labour, précédemment utilisées dans la région, ont été abandonnées à cause du risque élevé d'envoie des parcelles au cours de l'hiver), et (ii) de retarder au printemps les levées d'adventices (ceci permettant des économies appréciables d'herbicides à l'automne). Ce labour est suivi de l'opération de semis, réalisée avec un outil combinant une herse animée et le semoir. Ce passage unique d'engin est effectué avec

un tracteur de forte puissance équipé d'un dispositif anti-compactage (roues jumelées à l'arrière, rouleau d'appui à l'avant) destiné à rappuyer sans excès la couche labourée, sur la largeur de travail du semoir.

Les conditions d'emploi de cet itinéraire technique varient entre parcelles au cours de la campagne de semis, selon les dates (et donc les conditions d'humectation du sol) de la récolte du précédent cultural, du labour et du semis du blé, ces différentes dates n'étant pas indépendantes. On peut alors distinguer (tableau I) cinq modalités mises en œuvre l'année d'étude. Pour chacune, l'état du sol créé est décrit après chaque étape de réalisation des travaux.

On constate que seule la modalité B (labour et semis en sol réhumecté) a permis d'obtenir un état du profil cultural satisfaisant. Au contraire, les conditions trop sèches (A) ou trop humides (D et E) aboutissent à des états défavorables. La situation C, comparée à B, montre l'impact d'un mauvais réglage du dispositif anti-compactage (mauvais équilibre des pressions de gonflage des roues du tracteur et des roues jumelées),

Tableau I. Différentes modalités de mise en œuvre d'un itinéraire technique, conséquences sur les performances du blé d'hiver.

Récolte du précédent cultural				
Précoce, en sol sec		Tardif, en sol humide (après maïs, tournesol)		
Profil non dégradé		Profil dégradé (continu et compact)		
Labour d'automne pour le blé				
Précoce, en sol sec	En sol réhumecté		Tardif, en sol humide	
Bandes de labour peu fragmentées (grosses mottes et cavités)	Bandes de labour très fragmentées, terre fine abondante, pas de cavités		Bandes de labour peu fragmentées (grosses mottes tassées et cavités)	
Implantation du blé (outil combiné avec le semoir)				
Précoce, en sol sec	Sol réhumecté, DAC bien réglé	Sol réhumecté, DAC mal réglé	Sol humide	Sol humide
Lit de semence grossier, persistance des mottes de labour et cavités	Lit de semence fin, pas de tassement sous les roues	Lit de semence hétérogène, tassement sous les roues du tracteur (1/3 de la largeur du semoir)	Lit de semence hétérogène, tassement sous les roues du tracteur et les roues jumelées (2/3 de la largeur du semoir)	Lit de semence grossier, tassement sur l'ensemble de la couche labourée, persistance des cavités les plus profondes
A	B	C	D	E
Parcelles ayant atteint au moins 80 % du rendement potentiel du blé (en fréquences, pour chaque modalité de l'itinéraire technique)				
0,55	0,71	0,42	0,17	0

DAC : dispositif anti-compactage (roues jumelées à l'arrière, rouleau d'appui à l'avant du tracteur).

et la situation D correspond aux cas où l'on a été au-delà des limites d'emploi de cet équipement. On constate aussi qu'après une récolte tardive du précédent cultural, le sol dégradé par cette opération ne peut être amélioré par le labour et les travaux de semis, vu la persistance des conditions d'excès d'humidité.

La variabilité des états obtenus, avec des équipements très analogues mais selon leurs conditions d'emploi, est donc très grande. Mettre en rapport les états du sol obtenus avec les performances du blé n'aurait pas grand sens si on le faisait directement avec les rendements, étant donné l'existence d'une forte incidence de la date de floraison (liée pour partie à la date de semis, et donc aux modalités d'implantation) sur celui-ci.

Pour éviter cette confusion d'effet, qui reviendrait à pénaliser d'entrée de jeu les semis les plus tardifs, on a calculé pour chaque parcelle son rendement potentiel, obtenu lorsque seule l'énergie lumineuse est limitante au cours de la phase floraison - maturité. Ce potentiel varie, au sein de l'échantillon, de 8,6 à 9,6 t/ha. On a ensuite dénombré, pour chaque modalité d'implantation, les parcelles qui dépassaient le seuil de 80 % de ce rendement potentiel. Sur cette base, le classement des différentes modalités devient possible et l'on voit (tableau I) : (i) que la modalité E n'a pas permis d'approcher le rendement potentiel, alors que la modalité B l'a atteint dans près des trois-quarts des cas, (ii) qu'après un labour satisfaisant, le compactage de la couche labourée par le tracteur au semis est fortement pénalisant (comparaison de B avec C et D), et (iii) que la modalité A, caractérisée par un rattachage insuffisant, est pénalisée dans la moitié des cas.

Sans vouloir affecter au seul état du profil cultural, et aux modalités d'utilisation d'un itinéraire technique, la totalité des raisons d'une pénalisation des rendements du blé, on constate bien l'existence d'une relation, qui est en accord avec le référentiel agronomique et qui permet d'affiner le jugement sur les pratiques de travail du sol. La typologie de situations à laquelle on aboutit est particulièrement simple, et se révèle par ailleurs très robuste dans l'explication des déterminismes de chaque cas : le diagnostic, mais aussi le pronostic, peuvent être établis et servir de base au conseil auprès des agriculteurs pour le choix des modalités de réglage et de dates d'emploi de leurs matériels.

La richesse de ce mode d'analyse de la diversité des situations culturales pose, en retour, la question de la pertinence d'une approche uniquement expérimentale sur le même sujet : si l'on avait comparé, au sein d'un même dispositif expérimental, la « technique traditionnelle » (c'est-à-dire celle qui est généralement utilisée dans la région) avec une « technique nouvelle », quelle modalité de mise en œuvre de chacune aurait-on étudiée ? Quelles conséquences en aurait-on tirées pour le jugement sur les techniques culturales ?

De façon très générale, apparaît la nécessité d'une approche systémique de la parcelle cultivée, avec de grandes exigences sur la pertinence et la qualité des contrôles à inscrire dans les protocoles de recherche, qu'il s'agisse d'expérimentations ou d'enquêtes.

Le statut scientifique des recherches sur le travail du sol

Le statut scientifique de ce domaine semble d'entrée de jeu mal défini, d'abord parce qu'il relève de plusieurs disciplines qui doivent être mises en œuvre conjointement.

On citera, principalement :

- la physique et la mécanique du sol, indispensables pour rendre compte des mécanismes des changements d'état du sol, sous l'action des machines et des agents naturels (Gill et Vandenberg, 1967 ; Horn, 1989 ; Guérif, 1990), mais dont l'application à la complexité du champ cultivé est souvent décevante en pratique ;
- la pédologie, qui fournit des clés de la compréhension du fonctionnement des sols, et de l'extrapolation spatiale des résultats obtenus dans des dispositifs expérimentaux, mais qui est mieux armée pour traiter des déterminants naturels de la différenciation des sols que de l'effet des facteurs anthropiques sur leur évolution (Manichon, 1982) ;
- le machinisme agricole, mécanique appliquée à la conception des outils de travail du sol et à l'analyse de leurs mécanismes d'action, mais dans laquelle la part faite au pragmatisme est déterminante ;
- l'écophysiologie, qui fournit les connaissances sur les modalités de fonctionnement des peuplements végétaux soumis à des états variés du milieu de culture et à des conditions climatiques fluctuantes ;
- les sciences humaines, nécessaires pour l'analyse des pratiques paysannes, de leurs coûts et de leurs performances.

Le risque est grand d'aborder une question relative au travail du sol en privilégiant trop l'une de ces entrées par rapport aux autres. Dès lors, les réponses apportées sont fragmentaires et ont peu de portée opérationnelle, elles ne sont pas convaincantes pour les praticiens.

Il revient à l'agronomie, discipline de synthèse orientée vers la résolution des problèmes agricoles, de tirer parti de ces différents apports pour analyser et diagnostiquer les problèmes, de renvoyer vers les différents spécialistes l'étude de questions spécifiques nécessitant l'élaboration de connaissances nouvelles, et de construire

des solutions adaptées aux différents lieux et aux différentes catégories de producteurs en partant de l'analyse de la réalité et de la diversité du terrain.

Le cahier des charges des agronomes, vis-à-vis du travail du sol, est donc particulièrement contraignant. Sa mise en œuvre implique tout d'abord de posséder une grande expérience du terrain pour poser correctement les questions, les étudier par des dispositifs adaptés, et modéliser le fonctionnement du profil cultural. De plus, l'analyse des résultats des enquêtes culturelles et la conception et la mise en place des expérimentations exigent de connaître le fonctionnement pratique des machines utilisées, et ce qu'elles sont susceptibles de fournir selon les conditions d'emploi. Ceci rebute souvent les jeunes chercheurs. Ils peuvent voir dans les protocoles de laboratoire, plus facilement maîtrisables techniquement que les travaux au champ et plus facilement répétables, la possibilité d'obtenir plus rapidement des résultats scientifiquement valorisables.

Enfin, et ce n'est pas le moins important, s'il est un domaine de la recherche agronomique qui ne saurait se concevoir sans interaction forte avec les paysans, c'est bien celui du travail du sol. Cette exigence est liée à la nature même de ce domaine, où la démarche scientifique ne peut se construire sans partir de la réalité technique et sociale. Mais admettre que l'on ne peut concevoir et conduire un programme de recherche en-dehors des utilisateurs, admettre que ceux-ci doivent être eux-mêmes des acteurs engagés dans la recherche, c'est aller contre les idées les plus communément répandues sur le statut des chercheurs dans la société. Ne peut-on voir là l'une des raisons essentielles des réticences que les chercheurs éprouvent à s'y engager ?

En définitive, considérées dans les institutions de recherche comme relevant plus de la technique que d'un domaine scientifique « noble », les recherches sur le travail du sol sont souvent délaissées, et dévolues sans appui scientifique réel à des structures de vulgarisation. Ceci est dommageable pour l'efficacité de la recherche agronomique, qui doit pourtant faire face à des demandes concernant autant la productivité des cultures que la gestion des ressources naturelles.

Conclusion : quelles recherches sur le travail du sol ?

Le travail du sol constitue donc un domaine de recherche pluridisciplinaire, dont le point de départ est l'analyse des réalités du terrain et des pratiques des paysans, et dont la finalité est de proposer à ceux-ci un ensemble d'itinéraires techniques adaptés à leurs objectifs (de production, de coût) et à leurs contraintes

(liées au milieu physique, aux caractéristiques de leurs exploitations et à leurs capacités de travail et d'équipement, et à leur environnement socio-économique). L'une des difficultés que rencontrent les institutions de recherche pour concevoir des programmes en ce domaine est que la diversité des situations réelles est tellement grande que l'on ne peut imaginer de les aborder toutes, et que la quantité de travail à consacrer pour étudier certaines d'entre-elles paraît très importante eu égard à des retombées limitées : la « science des localités » est alors un luxe que l'on ne peut se permettre.

Cette difficulté est réelle, mais il est possible d'aller au-delà en adoptant une démarche de programmation prenant en compte les exigences suivantes. Ces recherches doivent être sélectives, pertinentes, explicatives et participatives.

Elles doivent être sélectives, par l'identification des situations agricoles prioritaires. Les critères de sélection concernent principalement : (i) les caractéristiques du milieu physique (difficultés pour la mise en place des cultures, existence d'aléas climatiques, de risques de dégradation du milieu...) et l'extension spatiale de ces milieux dans une région, (ii) les systèmes de culture pratiqués et les risques de dégradation qu'ils engendrent à priori sur le sol, leurs coûts de mise en œuvre (intrants, équipement...) et l'intensité des risques économiques pour les agriculteurs. Concrètement, un zonage agro-climatique d'une région, confronté à une typologie des principaux systèmes de culture, permet à l'agronome d'identifier assez rapidement les situations où des « problèmes de travail du sol » et de gestion du milieu se posent avec le plus d'acuité.

Elles doivent être pertinentes, par l'identification des questions à résoudre dans ces situations : selon que l'on incrimine, au vu de mauvais résultats des cultures, la qualité du profil cultural ou au contraire l'impossibilité de réaliser les semis aux dates « optimales », les thèmes de recherche seront différents. Dans le premier cas, on privilégiera l'étude des relations sol-machine et des réactions des systèmes racinaires à l'état du sol (c'est-à-dire des investigations à l'échelle de la parcelle, mettant en comparaison différents itinéraires techniques), dans le second, on analysera les raisons de l'étalement dans le temps des semis, qui tiennent à l'équipement des exploitations, à leur force de travail et à la manière dont elles sont allouées aux différentes tâches (on comparera donc des exploitations). Dans les deux cas, on s'intéressera à l'analyse et à la compréhension de la variabilité des états du profil cultural (voir l'exemple présenté au tableau I) pour l'identification des questions. Certaines d'entre-elles ne seront pas considérées comme des questions de recherche, lorsque des solutions existent déjà et peuvent être proposées directement (Manichon, 1994) : on doit aller à l'essentiel.

Elles doivent être explicatives, pour permettre une extrapolation peu coûteuse des résultats obtenus en certains points du dispositif de recherche, aux situations de caractéristiques analogues. La modélisation de certains processus (transferts d'eau et de solutés, analyse des effets annuels et cumulatifs des différentes opérations culturales...) est ici particulièrement précieuse. Elle permettra aussi d'éviter de diffuser des résultats uniquement sous forme d'effets moyens calculés sur plusieurs années, ne prenant pas en compte la diversité des situations.

Et enfin, elles doivent être participatives dans leur mise en œuvre, dès la conception du programme de recherche.

Cet ancrage des recherches sur le travail du sol dans la réalité est une condition essentielle de leur réussite, il ne peut être obtenu que si les agronomes travaillent en liaison étroite avec les agriculteurs, pour identifier les questions et élaborer des réponses adaptées. Concrètement aussi, la maîtrise par les agronomes de la conduite pratique des machines est un atout déterminant de la pertinence des diagnostics et du réalisme des propositions.

Sur ces quelques principes de bon sens, il est possible de définir des programmes de recherche efficaces, associant différentes compétences, et conduisant les investigations à différentes échelles, du laboratoire au profil cultural, de la parcelle à la région.

Références bibliographiques

COULOMB I, MANICHON H., ROGER-ESTRADE J., 1990. Évolution de l'état structural sous l'action des systèmes de

culture. *In* Actes du colloque « La structure des sols et son évolution », J. Boiffin et A. Marin-Lafliche Eds., Inra, p. 137-155.

GILL W.R., VANDENBERG G.E., 1967. Soils dynamics in tillage and traction. Agricultural Handbook n° 316. Agricultural Research Service, Usda.

GUERIF G., 1990. Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. *In* Actes du colloque « La structure des sols et son évolution », J. Boiffin et A. Marin-Lafliche Eds, Inra, p. 71-90.

HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. Le profil cultural : l'état physique et ses conséquences agronomiques. Masson, Paris, 332 p.

HORN R., 1989. Strength of structured soils due to loading : a review of processes on macro and micro scale ; european aspects. *In* Mechanics and related processes in structured agricultural soils. Larson *et al.*, Eds. NATO ASI, Ser. E, vol. 172, 240.

MANICHON H., 1994. Quelques questions et réponses sur les enquêtes régionales. *In* Analyse de la diversité des situations agricoles. Actes de l'atelier d'échanges et de formation 22-28 octobre 1993. Garoua (Cameroun). Colloques du Cirad, Montpellier, p. 58-62.

MANICHON H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural. Thèse Ina-Pg, 214 p.

ROGER-ESTRADE J., 1995. Modélisation de l'évolution à long terme de l'état structural des parcelles labourées. Contribution à l'analyse des effets des systèmes de culture. Thèse Ina-Pg 185 p.

SEBILLOTTE M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. CR. Ac. Agr. Fr.

SEBILLOTTE M., 1990. Système de culture. Un concept opératoire pour les agronomes. *In* Les systèmes de culture. L. Combe et D. Picard Eds. Inra, Paris, p. 165-196.

SEGUY L., BOUZINAC S., TRENTINI A., CORTES N.A., 1996. L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. Agriculture et Développement, 12:2-61.

Index des auteurs

Barro A.	61	Letournel F.	101
Becquer T.	101	Manichon H.	151
Billot J.F.	35	Mansouri T.	113
Blavet D.	101	Medina C.C.	41
Boizard H.	119	Muller M.M.L.	41
Bourarach E.H.	19	Perret S.	5, 87
Bourdon E.	101	Piccinin J.L.	41
Brandao J.O.	41	Pirot R.	11
Chaabouni Z.	113	Ralisch R.	41
Cheong R.N.	131	Richard G.	49, 119
Chopart J.L.	27	Rivière V.	131
Destain M.F.	107	Rode C.	55
Dürr C.	49	Roger-Estrade J.	139
Duwig C.	101	Rozaq A.	125
Guillobez S.	79	Sène M.	65
Guimaraes M.F.	41	Souty N.	55
Jacquin E.	131	Tavares Filho J.	41
Knechtges H.	19		

La collection Colloques

La collection Colloques publie les actes de séminaires organisés
ou coorganisés par le CIRAD

Déjà parus

Analyse de la diversité des situations agricoles. Conséquences sur la programmation de la recherche
22-28 octobre 1993, Garoua, Cameroun

Coconut *Phytophthora*
26-30 October 1992, Manado, Indonesia

La recherche européenne au service du cocotier/*European Research Working for Coconut*
8-10 septembre 1993/*September 8-10, 1993, Montpellier, France*

Traitements statistiques des essais de sélection. Stratégies d'amélioration des plantes pérennes
12-14 septembre 1994, Montpellier, France

Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest
25-28 janvier 1994, Cotonou, Bénin

Sustainable Land Management in African Semi-Arid and Subhumid Regions
November 15-19, 1993, Dakar, Sénégal

Rencontres cacao : les différents aspects de la qualité/*Cocoa meetings: the various aspects of quality*
30 juin 1995, Montpellier, France

Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides
13-17 novembre 1995, Montpellier, France

Interactions insectes-plantes
26-27 octobre 1995, Montpellier, France

Couplage de modèles en agriculture
14-15 juin 1995, Montpellier, France

Séminaire Riziculture d'altitude
29 mars-5 avril 1996, Antananarivo, Madagascar

Environnement et littoral mauritanien
12-13 juin 1995, Nouakchott, Mauritanie

A paraître

Chameaux et dromadaires, animaux laitiers
24-26 octobre 1994, Nouakchott, Mauritanie

LOUIS - JEAN
avenue d'Embrun, 05003 GAP cedex
Tél. : 04.92.53.17.00
Dépôt légal : 8 — Janvier 1998
Imprimé en France

Le CIRAD, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, est un organisme scientifique spécialisé en agriculture des régions tropicales et subtropicales. Il réalise, dans une cinquantaine de pays, des opérations de recherche, de développement agricole et de formation. Il emploie 1 800 personnes, dont 900 cadres. Son budget s'élève à près de 1 milliard de francs, dont plus de la moitié provient de fonds publics.

La détermination de gammes de conditions d'intervention avec un outil et une cellule motrice donnés, pour un état final du sol souhaité à partir d'un état initial, peut faciliter la définition du calendrier cultural, la maîtrise des coûts et le choix des matériels en fonction des itinéraires retenus. Le colloque sur le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux a été l'occasion pour divers organismes français et étrangers de présenter les résultats de leurs travaux dans ce domaine. Les différentes présentations ont concerné d'une part les méthodes de caractérisation des paramètres d'utilisation des matériels agricoles et les techniques de description de l'état du sol avant et après l'intervention des machines, et d'autre part les effets de ces interventions sur l'évolution des caractéristiques du sol à court et à moyen terme. Les discussions finales ont insisté sur l'intérêt de ce type d'approche et ont conclu à la nécessité de développer des programmes de travail qui prennent en compte des critères non seulement techniques mais aussi organisationnels pour aider au choix et à la décision des praticiens, des utilisateurs de matériels et des producteurs.



Centre de coopération internationale en recherche agronomique
pour le développement