

42 73551
2 F
19

Université Paris XII Val de Marne

UFR de Sciences

D.E.S.S.
**"Gestion des Systèmes Agro-Sylvo-Pastoraux
en Zones Tropicales"**

Promotion n° 4

Mémoire Bibliographique

LES TECHNIQUES D'ETUDE DU PROFIL CULTURAL

Patrick ZANTE

Année 1993-1994

Sous la direction de G. BELLIER

Directeur du D.E.S.S. : Pr. E. GARNIER-ZARLI

F 91499

Université Paris XII Val de Marne

UFR de Sciences

D.E.S.S
**"Gestion des Systèmes Agro-Sylvo-Pastoraux
en Zones Tropicales"**

Promotion n° 4

Mémoire Bibliographique

LES TECHNIQUES D'ETUDE DU PROFIL CULTURAL

Patrick ZANTE

Année 1993-1994

Sous la direction de G. BELLIER

Directeur du D.E.S.S. : Pr. E. GARNIER-ZARLI

SOMMAIRE

RESUME

I - INTRODUCTION GENERALE

II - LA METHODE DU PROFIL CULTURAL

2.1 La méthode originale: S. HENIN *et al.*

- 2.1.1 La méthode d'observation
- 2.1.2 Les éléments constitutifs
- 2.1.3 Les mesures annexes
- 2.1.4 Conclusion

2.2 L'application au monde tropical

- 2.2.1 La méthode d'observation
- 2.2.2 Les mesures annexes
- 2.2.3 Conclusion

2.3 La notation au labour

2.4 L'évolution du concept de description morphologique

2.5 La méthode GAUTRONNEAU - MANICHON

- 2.5.1 La description du profil cultural
- 2.5.2 Les applications de la méthode
- 2.5.3 Les adaptations de la classification morphologique

III - LES APPROCHES MORPHO-QUANTITATIVES

3.1 Procédure photographique *in situ*

3.2 L'analyse d'image

3.3 La tomographie

IV - LES MESURES COMPLEMENTAIRES

- 4.1 La perméabilité à l'air**
- 4.2 La méthode pénétrométrique**
 - 4.2.1 Les divers types de pénétromètres
 - 4.2.2 L'expression des résultats
 - 4.2.3 Les applications
- 4.3 L'examen des racines**

V - L'ANALYSE DE LA POROSITE

- 5.1 Les principes**
- 5.2 La méthode**
- 5.3 Exemples d'application**
- 5.4 Conclusion**

VI - CONCLUSION GENERALE

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

LISTE DES FIGURES

ANNEXE

RESUME

Mots clefs: profil cultural, analyse d'images, tomographie, perméabilité à l'air, pénétrométrie, description du système racinaire, porosité structurale, porosité texturale.

Cette recherche bibliographique sur les méthodes d'étude du profil cultural montre que cette approche de la description du sol travaillé est essentiellement française. Par contre, toutes les méthodes à caractère quantitatif ont été développées à la fois par les chercheurs francophones et anglo-saxons.

Après avoir exposé la première méthode de description proposée par HENIN (1960), nous étudions celle de MANICHON (1982), basée sur une partition verticale et latérale du profil cultural selon des critères définis par l'action anthropique.

Nous passons ensuite en revue quelques approches morpho-quantitatives comme la photographie *in situ*, l'analyse d'image et la tomographie, avant d'aborder la description de trois méthodes complémentaires que sont la perméabilité à l'air, la pénétrométrie et l'examen des racines.

Complémentaire de la description de la structure pratiquée dans l'approche morphologique de la description du profil cultural, l'étude de la porosité, telle qu'elle est proposée par STENGEL (1979), fait l'objet du dernier paragraphe.

LES TECHNIQUES D'ETUDE DU PROFIL CULTURAL

I - INTRODUCTION GENERALE

L'Egypte, la Syrie, la Perse étaient dans l'antiquité des régions productrices de céréales, fourrages, fruits, fibres textiles, oléagineux etc.....; drainage et irrigation se pratiquaient dès cette époque et les boeufs tiraient déjà la charrue.

Les agronomes romains, habiles compilateurs des sources hellènes, insistaient sur l'importance des labours et des fumures: "Cultiver n'est autre chose que diviser la terre et y susciter une fermentation par laquelle elle devient capable de produire de fortes récoltes" écrit Columelle, cité par DEMOLON (1946).

Il faut attendre B. Palissy, en 1553, pour que naisse l'idée que l'incinération des plantes permet un retour au sol de matières minérales indispensables à leur développement. Cette idée ne sera pas reprise par ses contemporains et ce n'est qu'à partir de la seconde moitié du XVIIIème siècle et surtout après la Révolution que l'essor de la chimie et de la physique permettra le développement de la biologie et de la physiologie, favorisant le progrès des sciences agronomiques.

Vers 1750, Duhamel du Monceau rompt avec les conceptions anciennes et met l'accent sur le travail du sol tandis que l'on construit le Petit Trianon et que Parmentier diffuse la culture de la pomme de terre. Mais il faut noter que c'est essentiellement la chimie qui a exercé son emprise sur l'agronomie avec Liebig, Boussaingault et Lawes à partir de 1850, la physique n'intervenant que par le biais de la climatologie (BOULAINÉ, 1988).

En 1946, DEMOLON (1946) note, dans un chapitre consacré à la "diagnose des causes d'infertilité et mode de travail du sol", que le plus souvent, c'est la constitution physique du milieu et non sa teneur en éléments fertilisants qui limite sa capacité de production. Il préconise ainsi l'examen du profil en place pour permettre de diagnostiquer les causes d'infertilité que le laboratoire ne peut révéler.

Il pose les bases de l'analyse morphologique et des effets du travail du sol sur la structure: "orienter le travail du sol (...) en l'adaptant à chaque milieu particulier en vue de conférer à celui-ci la structure qui assurera à la plante la couverture de ses besoins en air et en eau". La recherche doit se préoccuper "non seulement de la machine, mais des effets produits, c'est à dire de la qualité de son travail".

En 1952, dans leur guide pour l'étude expérimentale du sol, DEMOLON et LEROUX (1952), dans le chapitre consacré à la physique du sol, constatent le retrait du sol lors de la dessiccation et proposent des mesures du volume de l'espace lacunaire, mais ils ne font cependant pas état de méthode d'évaluation de la structure.

En 1954 DEMOLON et HENIN (1954) sont conduits à énoncer le principe suivant: "La capacité de production d'un sol dépend de son profil mais elle n'atteint son maximum que si le niveau de tous les facteurs nutritifs a été correctement ajusté, en fonction de sa constitution et des besoins de la culture". Se pose alors le problème de la définition de l'état physique du sol et de ses variations dans la couche cultivée, dans l'espace et dans le temps. Les mesures physiques seules ne pouvant pas apporter de réponse à la question, les auteurs sont amenés à rechercher des méthodes qualitatives permettant de décrire les couches de sol.

Görbing (Hanovre 1947) et Sereka (Berlin 1951) cités par HENIN *et al* (1960) ont, avec succès auprès des praticiens, examiné le sol pour en tirer une appréciation globale, mais leur méthode d'examen non systématisée n'a pas été diffusée.

C'est en 1960 que HENIN, FEODOROFF, GRAS et MONNIER (HENIN et al, 1960) définissent "une méthode d'examen de l'état du sol affecté par les méthodes de culture ou exploité par les racines des plantes cultivées": Le Profil Cultural est né.

Le profil cultural est alors défini par ses créateurs (HENIN et al., 1960) comme "l'ensemble constitué par la succession des couches de terre, individualisées par l'intervention des instruments de culture, des racines des végétaux et des facteurs naturels réagissant à ces actions". Il est pour la première fois identifié par rapport au profil pédologique.

II - LA METHODE DU PROFIL CULTURAL

2.1 La méthode originale: HENIN *et al*

La méthode d'observation préconisée par HENIN et ses collaborateurs (HENIN *et al.*, 1960, 1969) fait appel à l'observation directe du profil cultural et à des mesures annexes effectuées sur le terrain et au laboratoire.

Le but est de décrire l'ensemble des caractéristiques des couches du profil et d'évaluer les causes de leur différenciation pour tirer de cet examen des conclusions suffisamment sûres pour permettre de conseiller l'agriculteur sur ses pratiques culturales.

2.1.1 La méthode d'observation

Elle comporte les étapes suivantes:

- ouvrir une fosse d'observation d'environ 60 cm de profondeur
- l'ausculter de bas en haut à l'aide du manche d'un couteau, repérer par ce moyen les variations d'intensité et de tonalité, noter les limites de changements brusques, opérer de même horizontalement
- examiner chaque couche avec l'aide de la pointe d'un couteau, de haut en bas
- rechercher la semelle de labour en enfonçant la lame du couteau parallèlement à la surface, quelques centimètres sous le fond du labour: si la cassure est vive et que le sol présente des plans parallèles, il y a semelle de labour.

Pour chaque couche identifiée, on note:

- la profondeur, l'humidité et la texture
- la structure
- la matière organique
- les caractères pédologiques
- l'activité biologique
- l'enracinement

La figure 1 présente un exemple de fiche proposée par HENIN *et al.* (1960).

Profondeur	Humidité ±	Texture	Cailloux	Structure				Matières organiques			Accidents pédologiques			Activité biologique	Racines				
				Forme	Dimension	Compacité	Dureté	Nature	Aspect	Odeur	Taches	Concrétions	Divers		Quantité	Forme	Localisation	Etat sanitaire	

FICHE D'EXAMEN DE PROFIL CULTURAL

N°	Date	N° E. M. Lieudit parcellaire	Localité	Propriétaire
----	------	---------------------------------	----------	--------------

Nom local du sol :

Topographie : plateau — pente — dépression (1).

Etat du sol : humide — sec (1).

Culture et deux antécédents :

Etat de la végétation { couleur
densité
propreté

Façons culturales : Dernier labour — date

façons superficielles

Remarques :

(1) Rayer les mentions inutiles.

Fig. 1 : Fiche d'examen du profil cultural (HENIN S. et al., 1960).

2.1.2 Les éléments constitutifs

La description et la mesure des éléments constitutifs et des caractères distinctifs des couches mises en évidence lors de l'examen du profil ont pour but de rendre la méthode aussi objective que possible.

1) Texture et assemblage élémentaire

a) *La texture*

Les éléments grossiers: leur appréciation est visuelle et seul le tamisage permet de déterminer leur proportion avec exactitude.

La terre fine: l'analyse granulométrique en définit les classes.

b) *L'assemblage élémentaire*

C'est le "résultat de la façon dont les éléments colloïdaux cimentent les éléments les plus grossiers" (HENIN et al, 1969). Les méthodes d'étude vont de l'examen à la loupe sans préparation à l'examen morphologique des "plaques de terre" qui permettent de caractériser ces assemblages. "De la caractéristique de ces assemblages dépend la formation d'ensembles de plus grande dimension qui constituent le matériau soumis à l'action des outils de travail du sol; ce sont vraiment les éléments constitutifs du profil cultural et du profil pédologique" (HENIN et al, 1969). Les auteurs perçoivent bien l'importance des différences d'échelle et celle de l'examen des lames minces mais s'en tiennent à des méthodes qualitatives.

2) Structure

Elle est définie comme la façon dont sont associés les constituants élémentaires. Il s'agit de mesurer les conséquences des types d'association (porosité, cohésion) et de définir la forme des éléments (description de la structure).

a) *Mesures*

- la porosité: elle est définie à partir des mesures de densité apparente et de densité réelle.
- la cohésion et l'ameublissement: la cohésion résulte de la résistance des liaisons qui unissent les constituants d'un corps. Elle s'évalue par la mesure de la résistance à la pénétration dans le sol d'une tige métallique garnie d'une pointe (pénétrométrie). Cette mesure nécessite de nombreuses répétitions.

b) Description de la structure

Elle correspond à l'examen détaillé du profil cultural, elle reste qualitative. "La définition de formes générales précisées par leur taille et leur compacité est un procédé de description facile à retenir pour répartir les éléments structuraux en trois classes divisées en types et sous-types" (HENIN *et al.*, 1969):

- particulaire: éléments du squelette non associés entre eux
- continue: toute la couche du sol forme un bloc: type ciment, grès, poudingue
- fragmentaire: les particules grossières sont associées par un ciment argileux et les ensembles se détachent aisément les uns des autres: type arrondi, anguleux ou intermédiaire.

Lorsqu'il y a juxtaposition de deux types d'éléments structuraux, on indique leur présence en faisant ressortir l'impression générale dégagée par le profil.

Les liaisons entre éléments structuraux, les modalités de l'assemblage ne sont pas évoquées et la description reste qualitative.

3) Matière organique et activité biologique du sol

L'étude est ici prévue lors de l'examen du profil cultural pour ce qui concerne la répartition dans le sol et au laboratoire pour la partie quantitative.

- Observation dans le profil cultural:
on observe essentiellement les matières organiques libres, on note la proportion des résidus, leur disposition dans le profil et l'état de cette matière organique qui témoigne d'une bonne aération du milieu ou de phénomènes de réduction (odeur d'ensilage, de fumier, de vase).
- Etude quantitative et constitution:
on dose la matière organique totale, liée et libre, on analyse l'humus.
- Activité de la faune:
la plus visible est celle des vers de terre, on notera leur présence et leur activité.

4) Examen du végétal

a) Les racines

"L'examen du système racinaire constitue la clef de voûte de la méthode de diagnostic basée sur l'observation du profil cultural." (HENIN *et al.*, 1960). C'est en comparant l'état du système racinaire et la structure du sol que l'on peut apprécier l'influence de cette dernière sur les racines.

L'observation peut être qualitative ou quantitative (extraction et pesée). Pour établir un diagnostic, l'examen du système racinaire doit prendre en compte:

- la distribution générale des racines dans les couches individualisées lors de l'examen du profil cultural (densité, régularité)
- les déformations et leurs causes (formes particulières liées à des accidents du profil)
- l'état sanitaire des racines.

La description du système racinaire est conçue comme une aide au diagnostic devant révéler les contraintes physiques et comme un élément pouvant expliquer un mauvais développement de la plante.

b) La partie aérienne du végétal

Les jugements globaux, tels que le volume occupé par le végétal, la couleur des feuilles, étant insuffisants, ils sont complétés par l'étude des composantes du rendement; l'ensemble est rattaché à la fiche de description du profil cultural.

2.1.3 Les mesures annexes

Elles sont effectuées *in-situ* ou au laboratoire et sont une tentative de quantification des éléments constitutifs décrits lors de l'examen du profil.

Elles concernent:

- la granulométrie
- la stabilité structurale
- la densité apparente et la porosité
- l'humidité
- la pénétrométrie
- la matière organique
- l'enracinement.

2.1.4 Conclusion

On perçoit bien ici le but agronomique de la description du profil cultural qui doit servir à mettre en évidence les contraintes du sol qui pourraient expliquer en partie le comportement du peuplement végétal.

Cette méthode utilise des critères essentiellement morphologiques, même si elle inclut des mesures annexes pour quantifier certains éléments constitutifs de la description du profil cultural (granulométrie, porosité, cohésion...).

L'analyse des critères de description retenus (STENGEL, 1990) montre qu'il s'agit d'une juxtaposition entre description d'un état physique (épaisseur des couches, humidité, structure) et recherche d'indices des conséquences de cet état (hydromorphie, état de la matière organique, abondance et état des racines). HENIN *et al.*, (1960, 1969) ne proposent pas une méthode de description réduite à celle de la structure, définie comme "la manière dont sont assemblés les divers constituants", mais ils associent deux voies d'étude: la mesure des conséquences de l'association des constituants (porosité et cohésion) et la description de la forme des éléments structuraux, aspect qu'ils privilégient car directement accessible par l'observation du profil cultural.

2.2 L'application au monde tropical

Les préoccupations des agronomes travaillant dans les régions tropicales ne sont pas très différentes de celles de leurs collègues métropolitains puisqu'il s'agit pour eux de tester et de proposer différents modes de travail du sol pour améliorer les rendements et la productivité du travail par l'introduction de la mécanisation.

Afin d'analyser les mécanismes d'action du travail du sol dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale ouest-africaine et particulièrement au Sénégal, l'IRAT a utilisé la méthode d'étude du profil cultural mise au point par HENIN *et al.* .

Son utilisation dans les sols sableux des zones tropicales sèches a nécessité quelques adaptations de la méthode d'observation et des mesures (CHARREAU, NICOU, 1971).

2.2.1 La méthode d'observation

La division de l'année en deux périodes très contrastées conduit à effectuer deux séries d'observations:

- en saison des pluies: l'enracinement et son évolution
- en saison sèche: la structure et les limites des couches.

La gamme de textures très étroite rend son appréciation difficile et son caractère sableux à sablo-argileux ne favorise pas d'expression structurale nette. Les différences de cohésion sont par contre très marquées en sol sec.

2.2.2 Les mesures annexes

1) Granulométrie

La présence de pseudo-sables dans les sols rouges faiblement ferrallitiques minore les teneurs en argile mais ceci n'intéresse que les horizons profonds de ces sols.

2) Stabilité structurale

Les résultats obtenus par la mesure de l'indice d'instabilité structurale de HENIN (HENIN *et al*, 1960) dans ces sols à teneur en argile inférieure à 20% ne sont pas utilisables en raison d'une erreur relative trop importante.

POULAIN (1960) a tenté d'adapter la méthode aux sols sableux, mais son emploi n'a pas été systématique.

3) Densité apparente et porosité

Effectuées en début de saison des pluies, les mesures au cylindre sont très précises, avec un coefficient de variation qui s'établit entre 1 et 5 % pour huit répétitions (résultat obtenu par POULAIN, cité par CHARREAU, NICOU, 1971 dans un essai combinant différents traitements de labour à différents traitements de fumure minérale). Il faut cependant attendre que les pluies "rassoient" le labour pour obtenir ces performances. En saison sèche le cylindre s'enfonce mal et la mesure devient trop imprécise.

4) Humidité et perméabilité

Réalisées dans les mêmes conditions que les densités apparentes, le coefficient de variation atteint 5 à 15% sur l'humidité pondérale à 105°C, d'où la nécessité d'opérer un grand nombre de répétitions. Les méthodes Porchet, Müntz et Vergière ont été essayées pour déterminer la perméabilité du sol en place. La méthode Porchet fournit des résultats de perméabilité très élevés et inclut les couches sous-jacentes à la couche travaillée, les méthodes Müntz et Vergière exigent beaucoup de répétitions pour fournir des résultats fiables; les mesures de perméabilité ont donc été peu utilisées.

5) Pénétrométrie

Elle est utilisée pour quantifier le développement de la cohésion des sols au fur et à mesure de leur perte d'humidité. BLONDEL (1964) trace la courbe travail effectué/profondeur d'enfoncement, la dérivée de la courbe exprime la force de résistance à la pénétration. C'est une mesure ponctuelle très sensible à l'hétérogénéité du sol, elle nécessite donc de nombreuses répétitions. Les coefficients de variation vont de 25 à 35% pour des mesures réalisées en fin de saison sèche avec 32 répétitions par traitement (essai POULAIN ci-dessus). L'indice d'ameublissement proposé par HENIN, cité par BILLOT (1982), est remplacé par le coefficient de cohésion W_x/W_t , le sol de référence, ici la parcelle non travaillée, exigeant un travail W_t supérieur à celui des parcelles travaillées W_x .

6) Enracinement

Des mesures quantitatives ont été effectuées selon deux types de méthodes utilisées en France, sans modification particulière:

- prélèvement de la totalité du système racinaire, technique sûre mais très longue
- prélèvements par sondages selon la procédure recommandée par MAERTENS (1964) qui consiste à enfoncer horizontalement un cylindre de 100 cm³.

2.2.3 Conclusion

Alors que les effets du travail du sol sont encore essentiellement exprimés par le rendement des cultures, l'analyse des mécanismes d'action du travail du sol sur la culture fait appel à l'observation des profils culturaux: le travail du sol modifie la densité apparente et la porosité, celle-ci agit sur la l'enracinement et l'améliore (TOURTE *et al.*, 1968). La rémanence d'action du travail du sol est jugée par la conservation du profil cultural et par l'évolution de deux mesures annexes: la densité apparente qui traduit les phénomènes de battance en saison des pluies et la pénétrométrie qui traduit la prise en masse en saison sèche.

Cette utilisation de la méthode proposée par HENIN *et al.*(1969) en milieu tropical n'a pas apporté de modification profonde notamment en ce qui concerne la description de la structure. Elle s'est généralement limitée à l'adaptation des méthodes de mesures annexes.

Ainsi, aussi bien outre-mer qu'en France, après l'enthousiasme des années 60, la méthode a-t-elle été délaissée:

- elle avait un fort aspect qualitatif et les outils disponibles pour la description de la structure notamment ne permettaient pas toujours de traduire ce que l'on observait. La méthode n'étant pas spécialement adaptée à la description des couches travaillées, (MANICHON, 1982) elle se résumait alors dans son utilisation pour le diagnostic au champ, à la délimitation d'horizons et à la recherche des symptômes indicateurs d'états défavorables à la culture (types d'éléments structuraux, état de la matière organique, forme et état des racines...).

- elle exigeait une grande expérience de la part de l'agronome qui devait s'engager dans l'interprétation et le diagnostic sans référentiel quantitatif.

2.3 La notation au labour

C'est une méthode utilisée vers 1970-1980 sur le site expérimental d'Auzeville à la station INRA de Toulouse (CHARPENTEAU *et al.*, 1981). Le dispositif est constitué de 10 rotations culturales à cycle court (1 à 5 ans) et d'une succession longue de 12 cultures. Les notations sont effectuées au moment du labour par des personnes différentes selon les années, en général les laboureurs, mais toujours selon la même grille de codification (fig. 2); Les notations concernent:

- les conditions de labour: résidus de récolte, humidité du sol
- les modalités de labour: type de labour, matériel utilisé, profondeur, facilité de travail (vitesse, résistance à la traction)
- les résultats du labour: état de la terre (lissage, émiettement), enfouissement des résidus de récolte.

Les données recueillies selon cette grille ont été analysées par CHARPENTEAU *et al.* (1981) et par HUTTER (1981) à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances multiples pour comparer l'influence de divers facteurs (précédent, irrigation, nombre d'outils, humidité du sol etc....) sur les variables de résultat du labour (lissage, émiettement, enfouissement des résidus) après transformation des variables quantitatives en variables qualitatives.

Grille de codification utilisée (d'après COCHARD & MARTY ; MM. LAURENT & DABASSE ont assuré le relevé des notes)

a) Humidité de surface (symbole : HS) : d'après l'aspect de la surface du sol

1. — très sec	} nuance claire ; aspect mat, poudreux ; sol « dur »
2. — sec	
3. — légèrement humide	
4. — humide ou plastique	
5. — très humide ou non	
	nuance plus foncée ; impression de fraîcheur, non plastique
	nuance foncée ; impression de fraîcheur ; peu à très plastique ; peu collant
	nuance foncée ; aspect mouillé ; mou ou boueux ; collant

b) Humidité de profondeur (symbole : HP) : jugée sur l'épaisseur de la couche travaillée

idem

c) Résidus de récolte (symbole : RR)

1. — nuls	pas de résidus ou très rares
2. — faibles	résidus dispersés çà et là (moins de 50 p. 100 de la surface)
3. — abondants	résidus couvrant le sol (plus de 80 p. 100 de la surface)

d) Type de labour (symbole : TL)

1. — dressé	bande de terre tournée d'un quart (90°)
2. — couché	bande de terre tournée d'un tiers (120°)
3. — renversé	bande de terre retournée dessus-dessous (180°)

e) Résistance à la traction (symbole : RES) : appréciée par le conducteur du tracteur relative au rapport de boîte enclenchée

1. — faible	le tracteur ne « force » pas
2. — moyenne	le tracteur force un peu
3. — forte	le tracteur force beaucoup

f) Lissage (symbole : LIS) : d'après l'aspect de la surface des bandes de labour

1. — nul	aspect rugueux, mat
2. — moyen	une partie plus ou moins importante présente un aspect lisse, brillant
3. — important	toute la surface présente un aspect lisse et brillant

g) Emission (symbole : EMI) : aspect du sol labouré

1. — nul ou grossier	bandes de labour apparentes, peu divisées
2. — moyen	quelques gros blocs ; beaucoup de grosses mottes
3. — important ou fin	pas de grosses mottes ; mottes et terre fine en proportions variables

h) Enfouissement des résidus de récolte (symbole : ENF)

1. — mauvais	beaucoup de résidus encore apparents
2. — moyen	quelques résidus encore apparents par-ci par-là
3. — bon	pas de résidus ou rares résidus apparents

Classes définies sur les variables quantitatives

i) Profondeur de labour (symbole : PL)

1. — moins de 20 cm
2. — de 20 cm à 30 cm
3. — plus de 30 cm

j) Vitesse d'avancement du tracteur (symbole : VIT)

1. — moins de 2,4 km/h
2. — de 2,5 à 2,9 km/h
3. — de 3,0 à 3,4 km/h
-
7. — de 5,0 à 5,4 km/h

Nombre d'outils rencontrés avant labour (NO)

— aucun	surtout derrière cultures dérobées ou non de Soja
— un	grobroyeur Maïs, Sorgho, Tournesol
— deux	rotovator derrière céréales, fourrage
	essentiellement grobroyeur puis rotovator derrière céréale

Type de charrues utilisées (TC)

- monosoc
- bisoc

Fig. 2 : Fiche de notation au labour (CHARPENTEAU J.L. et al, 1981)

Selon CHARPENTEAU *et al.* (1981) ce système de notations d'expert s'avère efficace pour caractériser, au niveau global, des différences entre parcelles ayant reçu des traitements différents et pour hiérarchiser les facteurs. Il ne peut pas expliquer les mécanismes des actions qui ne sont abordables que par l'étude analytique du comportement de la terre lors du labour.

HUTTER (1981) relève la bonne concordance entre les mesures quantitatives de contrôle (distribution de diamètre des mottes) et les notations utilisées ce qui conforte la validité du système de notation qui avait pourtant été établi a priori pour apprécier la "qualité" des travaux effectués et pas l'évolution du comportement du sol.

2.4 L'évolution du concept de description morphologique

L'application de critères pédologiques de description de la structure aux couches travaillées a longtemps limité l'utilisation de la méthode du profil cultural au diagnostic des contraintes physiques du développement racinaire et constituait un obstacle à son emploi pour juger des actions des outils sur le sol.

En effet, en pédologie, les études de structure ont une fonction de classification et de recherche d'indicateurs de fonctionnement (transferts d'eau, échanges sol-solution...) et elles sont abordées sous des approches morphologique (classification des formes, du micron à l'échelle décimétrique), énergétique (stabilité de l'assemblage) et physico-hydrrique (porosité) (COLLEUILLE, 1993).

En agronomie, par contre, ce sont les conséquences de l'état structural sur le développement de la végétation et les effets du travail du sol qui intéressent le praticien (STENGEL, 1990, ROGER-ESTRADE, 1993, De BLIC, 1993). Ainsi en 1982 MANICHON (1982a) distingue trois grandes approches de l'étude de la structure.

- L'approche privilégiant la phase solide:

Elle repose sur la notion d'horizon, apprécié par des données morphologiques, et sur celle d'agrégat, lié à l'analyse dimensionnelle du solide. Forme et dimension des éléments structuraux sont utilisés pour établir des classifications qui doivent permettre de décrire la structure du sol.

- L'approche associant phase solide et vides:

Elle cherche à permettre l'étude des relations sol-outil et sol-plante et à prendre en compte les actions anthropiques. Elle se traduit par deux attitudes:

La première reprend la classification morphologique en la complétant par la distribution dimensionnelle des agrégats obtenue par tamisage et par la mesure de propriétés physiques induites par la structure mais rarement reliables à l'étude morphologique car d'une autre dimension spatiale (densité, pénétrométrie, perméabilité...).

La seconde, choisie par DEXTER (1976), a pour but de quantifier "la géométrie interne du sol" par la mesure de l'arrangement des constituants du sol en donnant une égale importance aux particules et aux vides. Il agit par prise d'échantillons (monolithe de 30x30x18 cm imprégné à la paraffine) et ne s'occupe ni de la forme ni de la nature des éléments structuraux. Il mesure l'effet direct des outils sur le sol et propose un modèle d'implantation des racines (DEXTER, 1978).

- *L'approche ne portant que sur l'étude des vides:*

Elle est définie par RUSSEL (1971) pour qui la distribution de l'espace poral détermine un groupe de propriétés traduisant la structure du sol. La distribution dimensionnelle des pores traduit la dimension et la forme des agrégats. Aucune description de la phase solide n'apparaît dans cette démarche.

MANICHON (1982b) constate que l'utilisation de la méthode HENIN *et al.*, (1969) de description du profil cultural se réduit dans la pratique à la délimitation d'horizons et à la recherche des symptômes défavorables. Cette approche ne permet pas une étude systématique des relations Système de culture-Etat des couches travaillées qu'il se propose d'étudier car:

- l'apparition des symptômes est contingente des conditions d'humidité lors du dernier travail du sol
- l'apparition de certains symptômes n'est pas liée directement aux effets du système de culture
- l'absence de symptômes ou leur non généralisation rend le diagnostic pratiquement impossible, ce qui est devenu assez fréquent suite à l'amélioration des techniques de travail du sol (semelle de labour discontinuée suite à l'utilisation de charrues multiconps par exemple).

MANICHON va alors proposer " une méthode de caractérisation de l'état physique du sol dont l'utilisation au champ (va) permettre de dégager les bases d'un diagnostic des effets des systèmes de culture sur celui-ci" (MANICHON, 1982a et b).

2.5 La méthode GAUTRONNEAU - MANICHON

2.5.1 La description du profil cultural

L'objectif de MANICHON s'inscrit dans un cadre plus précis que celui de HENIN: il s'agit d'adapter la description de la structure aux couches travaillées et cet objectif l'amène à restreindre son champ:

- au seul état physique du sol
- aux seuls horizons soumis directement à l'action des outils.

Les principes de description du profil cultural sont ainsi posés par MANICHON (1982a):

- privilégier les critères rendant compte de l' action des machines, d'une part pour la stratification du profil, d'autre part pour la définition des éléments structuraux (porosité des mottes, leur dimension et leur arrangement).
- distinguer l'action des agents naturels de celle des outils.

Cette approche déterministe implique deux choix:

- retenir des critères morphologiques de description
- différencier dans un horizon les différentes unités morphologiques se distinguant par leur état structural.

De ces choix découle la partition verticale et latérale du volume de sol étudié, ce qui permet de prendre en compte la variabilité spatiale.

Le passage de l'horizon à l'unité morphologique implique des modalités particulières d'appréciation de l'état structural. Pour éviter la liste infinie de la classification exhaustive, MANICHON (1982) utilise une grille de description reposant sur deux paramètres:

- l'état interne des éléments structuraux d'origine anthropique
- l'assemblage de ces éléments structuraux.

La méthode, développée avec GAUTRONNEAU (GAUTRONNEAU, MANICHON, 1987) est la suivante:

1) Partition du profil

a) *Partition verticale*

Elle distingue les horizons anthropiques (H) des horizons pédologiques (P).

- les horizons anthropiques constituent le Ap (notés H1 à H7) et la couche H8.

- H0: surface du sol (la croûte de battance due à l'action d'agents climatiques ne forme pas un horizon)

- H1 à H4: horizons de reprise du labour

- H5: horizon labouré non repris

- H6 à H7: bases d'horizons labourés anciens

- H8: sous le fond du labour le plus ancien, horizon à caractères pédologiques mais localement ameubli par des outils profonds (sou-solage).

- Les horizons pédologiques: à partir du fond de Ap, ils sont notés de P1 à Pn.

b) *Partition latérale*

Dans les horizons anthropiques la variabilité spatiale de l'état structural est essentiellement liée aux interventions culturelles.

Trois types de positions sont alors définis:

- L1: passage de roue après reprise superficielle

- L2: passages de roue avant la dernière reprise

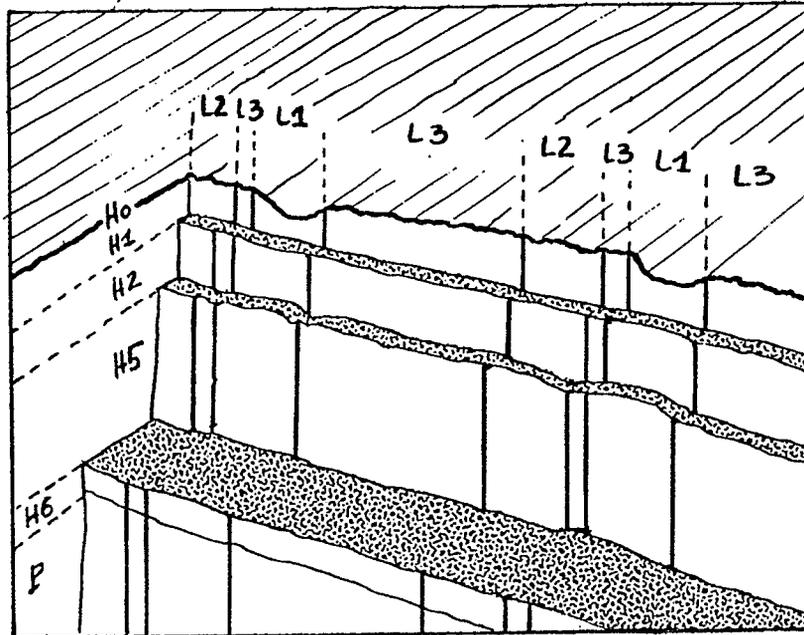
- L3: partie sans passage de roue.

Cette double partition définit des compartiments (fig. 3).

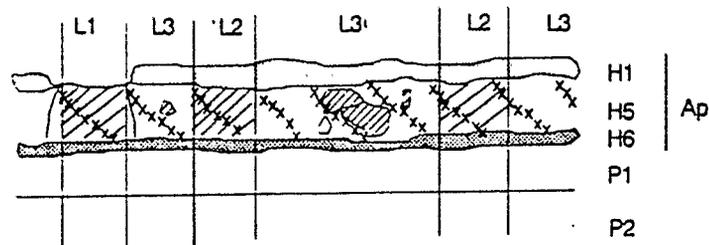
2) Etat structural

Les constituants de la structure sont les mottes, éléments structuraux formés par les actions de fragmentation et de compactage des outils.

La méthode a été établie après recherche de critères fiables, discriminants et relativement indépendants par rapport à l'objectif fixé. Elle comporte trois niveaux d'observation:



- La face d'observation après les partitions verticale et latérale



Nomenclature des différents horizons :

	H0	Surface du sol
Horizon labouré	H1-H4	Horizons de reprise du labour
Ap	H5	Horizon labouré non repris
	H6-H7	Bases d'horizons labourés anciens
	H8	Horizons partiellement ameublés par des outils profonds (sous soleuse)
	P1-P2	Horizons pédologiques

Partition latérale :

L1	Passages de roues après reprise superficielle
L2	Passages de roues avant reprise superficielle
L3	Sans passage de roues durant les travaux préalables à l'implantation de la dernière culture

Fig. 3 : Partition du profil cultural (GAUTRONNEAU Y. et al., 1987).

a) Etat interne des mottes

- Δ : cohésion élevée, faces de rupture lisses, de forme conchoïdale, sans porosité visible, résulte d'un compactage anthropique
- Φ : proche de Δ mais contient des amorces de fissures, résulte typiquement de l'action du gel
- Γ : agrégats discernables dans les mottes, cohésion plus faible, faces de rupture rugueuses, porosité visible

Ce système, basé sur une distinction morphologique des états des mottes, permet de les relier aux facteurs de structuration, de distinguer leurs effets et de les relier entre eux (fig. 4).

b) Mode d'assemblage des mottes

- **M** : Massif: le volume observé ne comporte qu'une seule motte
- **S** : Soudé: le volume observé comporte plusieurs mottes soudées, elles peuvent être facilement discernables (SF) ou difficilement discernables (SD)
- **F** : Fragmentaire: le volume comporte des mottes parfaitement individualisées, sans liaisons entre elles.

Les cavités sont notées par le suffixe **V** (>5 cm) et **v** (<5 cm)

Les fentes de retrait par le suffixe **R**.

L'état interne des mottes et leur mode d'assemblage (fig. 5) permet d'identifier les Unités Morphologiques (UM) .

c) Regroupement des modes d'assemblage

Les modes d'assemblage peuvent être regroupés en trois états-types:

- **o** : Ouvert, dominance de modes S et SF, pas de mottes décimétriques ni de cavités importantes, terre fine abondante
- **b** : Bloc, dominance de F et FV, mottes décimétriques, cavités importantes, peu de terre fine
- **c** : Continu, dominance de M et SD, faibles discontinuités structurales.

Une fiche de description regroupe l'ensemble des observations (fig. 6).

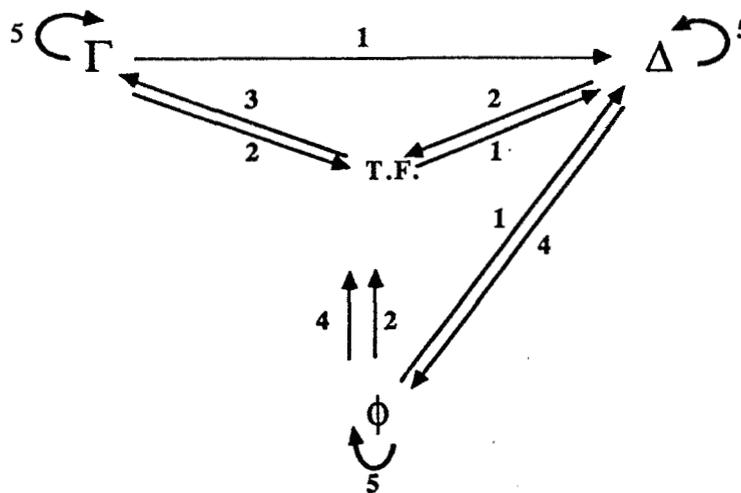
2.5.2 Les applications de la méthode

MANICHON (1987) illustre l'emploi de sa méthode pour la mise en évidence d'effets de compactage d'origines diverses dans les horizons travaillés.

TARDIEU et MANICHON ont appliqué cette analyse morphologique à l'étude de l'influence de l'état structural sur l'enracinement et l'alimentation hydrique du maïs (TARDIEU ,MANICHON, 1987a, 1987b, TARDIEU, 1987).

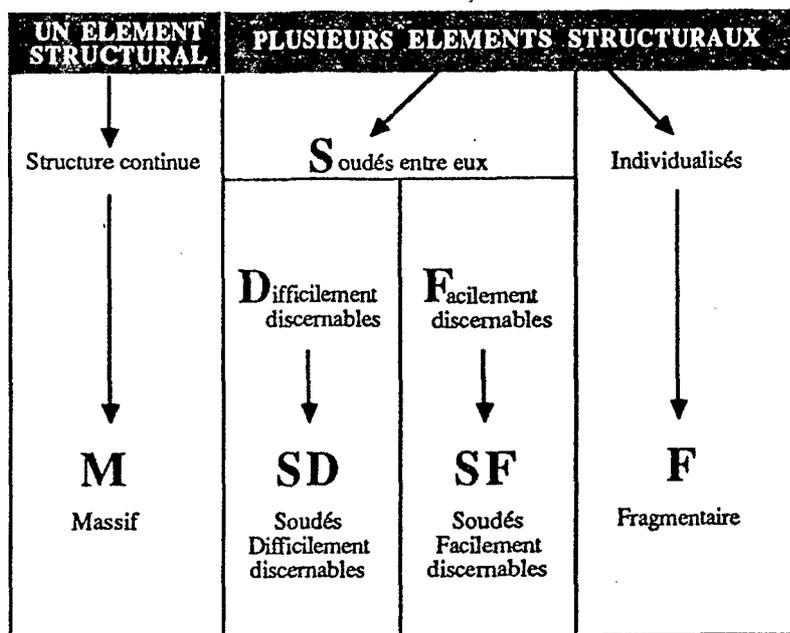
ETAT INTERNE	PRINCIPALES CARACTERISTIQUES
Δ delta	Aspect continu. Les faces de fragmentations sont peu rugueuses, de forme typiquement conchoïdale. Porosité structurale nulle. Résulte d'un compactage sévère d'origine anthropique (roues de tracteur) cohésion élevée en sec.
Φ phi	Proche de Δ , mais contient des amorces de fissures, révélées lors des essais de fragmentation (cas des matériaux ayant une certaine aptitude à la fissuration). Résulte typiquement, par exemple, de l'action du gel.
Γ gamma	Les agrégats, dont la morphologie est variable (en relation avec la texture et les agents naturels), sont discernables dans les mottes. Rugosité assez importante des faces de fragmentation des mottes. Porosité structurale non nulle assez variable. Cohésion plus faible que pour Δ .

Remarque : S'il n'y a pas de mottes, mais uniquement de la terre fine on note tf.



1. Création d'une structure continue : résultat de l'application d'une contrainte (pression humidité) sévère, d'origine anthropique (sauf prise en masse à la dessiccation).
2. Fragmentation par les outils.
3. Agglomération (interactions Climat-Texture-Faune...), contraintes modérées.
4. Fragmentation par gonflements et retraites (interaction Climat-Texture).
5. Fluctuations sans changement d'état interne.

Fig. 4 : L'état interne des mottes (GAUTRONNEAU Y. *et al.*, 1987).



Présence de cavités : suffixe **V** (> 5 cm)
ou **v** (1 à 5 cm)
Présence de fentes de retrait : suffixe **R**

+ dimension des mottes
+ rapport mottes/terre fine

ETAT TYPE	DEFINITION ET ORIGINE
o	Dominance de modes d'assemblage F et SF sans mottes décimétriques, ni cavités importantes. Terre fine abondante. Typiquement : bande "labour" fortement émietlée.
b	Dominance de M et FV mottes décimétriques, séparées par des cavités structurales importantes. Peu de terre fine. Typiquement : bande de "labour" peu fragmentée (grosses mottes).
c	Pas de discontinuités structurales notables, dominance de M et SD Typiquement : effet de compactage post "labour" sur terre très fortement émietlée.

Remarque : ne pas confondre "o, b, c" avec "O, B, C" (cf. chapitre VI).

Fig. 5 : Modes d'assemblage des mottes (GAUTRONNEAU Y. et al, 1987).

La cartographie des unités morphologiques, dont l'état structural est défini par l'état interne des éléments structuraux et par leur mode d'assemblage, couplée à la mesure de masse volumique à la sonde gammamétrique, a permis de modéliser trois états structuraux de la couche labourée, les états de type **o**, **b** et **c**.

Ces états types, issus d'un labour, ont été obtenus en jouant sur les compactages avant ou après labour et sur la date de ce dernier (TARDIEU et MANICHON, 1987a).

Ces états types sont utilisés pour étudier la croissance et la disposition du système racinaire du maïs (TARDIEU et MANICHON, 1987b). Les densités racinaires sont contrastées dans la couche labourée, dont l'état structural varie selon les traitements, mais aussi dans la couche non travaillée de **c**.

Ces résultats relatifs aux caractéristiques géométriques de l'enracinement, mis en correspondance avec les variations de teneur en eau du sol (TARDIEU F., 1987), montrent que l'état structural de la couche labourée influence la capacité des systèmes racinaires à extraire l'eau du sol. Dans les parcelles à état structural de type **c**, TARDIEU (1987) constate une moindre utilisation des réserves en eau du sol et une plus grande fréquence des stress hydriques. Une part importante de la variabilité spatiale du dessèchement est expliquée par les critères de caractérisation de l'enracinement.

Cette méthode de caractérisation morphologique est pertinente pour la compréhension du comportement hydrique de la couche travaillée (PAPY, 1986) car elle permet de décrire la variabilité spatiale de la structure et de ses niveaux d'organisation qui interviennent sur le comportement hydrique du sol. Elle permet également de juger les choix d'équipement de travail du sol par la qualité des profils culturaux qu'ils fabriquent (PAPY *et al.*, 1990). PAPY l'a également utilisée pour juger de l'effet de l'état structural initial sur le comportement au compactage de la couche labourée (PAPY, 1987): les mesures morphométriques pratiquées avant et après compactage de couches de type **o** et **b** montrent que, dans la gamme des tassements obtenus, l'état interne des éléments structuraux reste inchangé alors que les modes d'assemblage sont modifiés.

La description du profil cultural et la cartographie des unités morphologiques selon la méthode de MANICHON sont aussi utilisés par PELLERIN (1986) pour étudier l'effet de la date de labour sur l'état structural des sols argileux gonflants du Marais Poitevin. Le classement des états structuraux, observés après semis dans l'horizon labouré non repris, montre l'identité d'état structural après labours sur sol sec à deux dates différentes et les différences du labour tardif effectué après humectation du sol.

Ceci permet de montrer l'avantage des labours précoces qui créent une forte porosité inter-motière permettant le gonflement sans contrainte des éléments structuraux donc sans réduction de la porosité structurale intra-motière.

En milieu tropical cette méthode est utilisée dans l'étude de la dégradation du profil cultural (VALENTIN, 1988) pour mettre en évidence l'apparition de discontinuités et permettre les comparaisons et les suivis. Appliquée sur sols cultivés en canne à sucre (De BLIC 1987) elle permet aussi de mieux comprendre leur comportement (De BLIC, 1990).

2.5.3 Les adaptations de la classification morphologique

La classification de l'état interne des mottes proposée par H. MANICHON (1982a) étant surtout adaptée à la reconnaissance des mottes les plus compactes, elle a fait l'objet de modifications pour l'adapter à la description de l'hétérogénéité interne et de la fissuration.

1) Hétérogénéité interne des mottes

Pour tenir compte de l'hétérogénéité interne des mottes DE LEON GONZALEZ (1991) distingue sur la face de rupture des sous-ensembles d'états internes différents car il observe:

- des faces d'éléments structuraux d'apparence Δ
- des zones rugueuses de morphologie Γ

Il aboutit à la typologie morphologique représentée figure 7 dans laquelle :

- Les types Δ , Z et Y sont différenciés par la proportion d'états Δ visibles sur la face de rupture,
- les types X, Γ_c , Γ se différencient par la taille des éléments structuraux décelables qui les constituent. Les états Γ_c et Γ , qui représentent deux variantes plus ou moins tassées d'une même structure, sont différenciés par l'abondance des pores visibles.

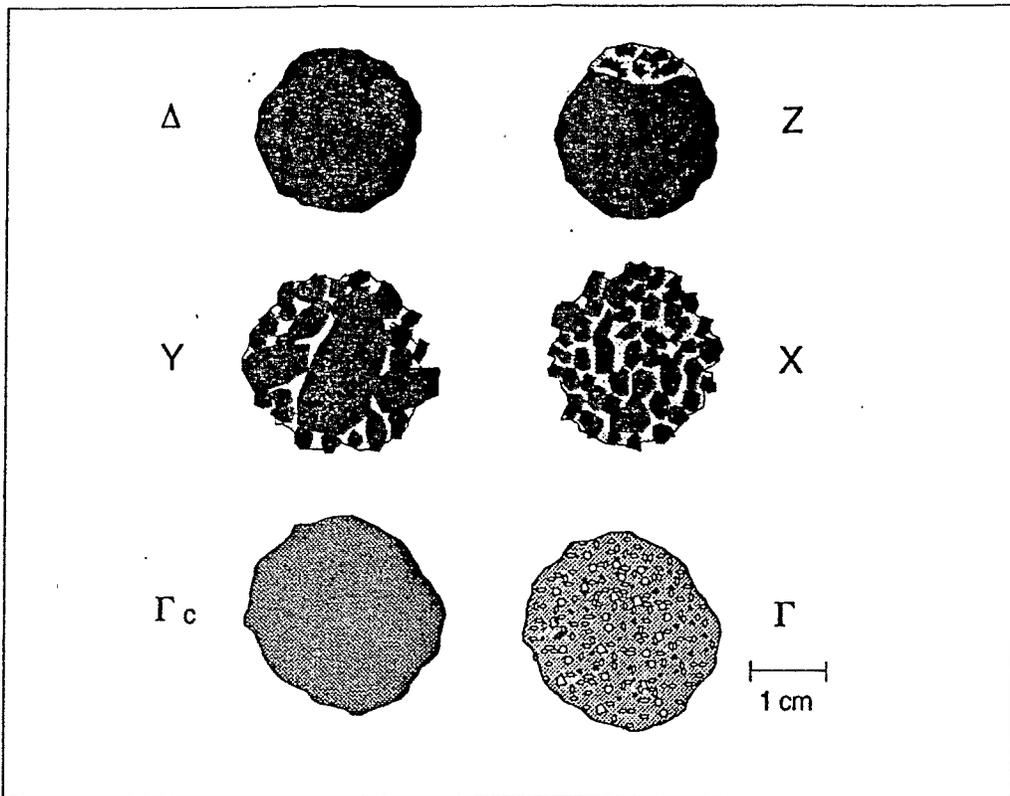


Fig. 7 : Typologie des mottes (DE LEON GONZALEZ, 1991).

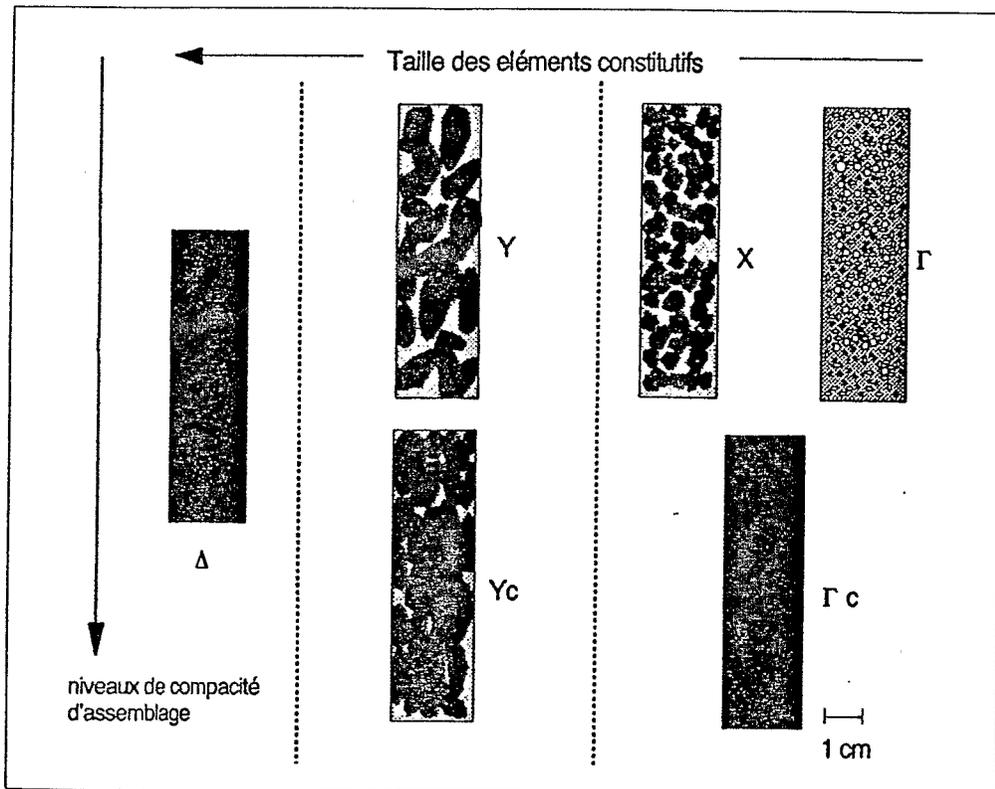


Fig. 8 : Typologie des massifs compactés (DE LEON GONZALEZ, 1991).

Lorsqu'il veut effectuer un classement morphologique des massifs d'agrégats compactés il le fait après le test de résistance mécanique, sur le plan de rupture des échantillons. La classification morphologique qu'il a élaborée pour les mottes naturelles doit à nouveau être adaptée: il n'y a pas de type **Z** mais il crée un type **Y_c** caractérisant un compactage serré des agrégats dans les massifs (fig. 8).

2) Niveaux de fissuration

COULOMB (1991) utilise les états internes Δ et Γ proposés par MANICHON dans sa thèse (1982a) mais introduit une notation intermédiaire entre Δ et Γ appelée "delta bis" et elle crée des classes intermédiaires entre l'état Δ et Φ pour distinguer plusieurs niveaux de fissuration (tableau ci-dessous).

Ces deux exemples montrent que le principe de description de l'état structural selon trois niveaux (état interne des mottes, modes d'assemblage des mottes et leur regroupement en états-types) est pertinent puisqu'il peut être adapté aussi bien à l'étude de la fissuration *in situ* (COULOMB, 1991) qu'à la description de faces d'échantillons constitués à partir de classes d'agrégats (DE LEON GONZALEZ, 1991).

Cependant, si la caractérisation morphologique du profil cultural présente l'avantage de décrire l'organisation spatiale des éléments structuraux et de fournir des critères de stratification pour les observations, elle demande à être complétée par une approche quantitative des critères de description qui permet de valider la typologie et d'aborder les relations état structural - fonctionnement du sol.

III - LES APPROCHES MORPHO - QUANTITATIVES

L'étude des pratiques culturales, et notamment l'analyse des modifications de l'état du sol suite aux travaux du sol, est un champ privilégié pour l'application de la méthode de description morphologique du profil cultural: elle permet d'appréhender la variabilité spatiale de la structure du sol à l'échelle de la couche labourée. Par contre l'analyse des modifications de l'état du sol oblige à définir un état initial et un état final et à mesurer les changements intervenus entre ces deux états.

Si les techniques de mesure des particules et des pores de taille inférieure à 300 μm sont connues, la quantification des pores et de la structure de taille supérieure est souvent obtenue par mesure de la densité apparente et de la perméabilité. Ces méthodes ne renseignent pas sur la géométrie des arrangements, qui peut être fort variable pour un même résultat.

Mesurer l'effet d'un travail du sol sur la structure et la porosité de l'horizon superficiel oblige à rechercher des techniques, si possible simples, pour quantifier la géométrie interne du sol et suivre ses variations à l'échelle macroscopique.

Deux attitudes sont possibles: essayer de pratiquer les mesures au champ ou prélever des échantillons et effectuer les mesures au laboratoire, démarche plus particulièrement anglo-saxonne.

3.1 Procédure photographique *in situ*

Pour étudier l'évolution de l'état structural du sol sous l'action de la charrue, COULOMB (1991) combine à l'analyse de la porosité la description du profil cultural en la complétant par une approche quantitative qui permet:

- d'obtenir à l'échelle de la motte des données quantifiables concernant la surface occupée par les différents types d'éléments structuraux, leur taille, leur localisation dans le plan
- de standardiser les documents résultant de l'observation
- de limiter la durée d'observation sur le terrain.

Pour ce faire COULOMB (1991) photographie le profil cultural à partir d'un rail parallèle à la face verticale du profil en prenant un cliché tous les 6,5 cm. La photo inclus une règle graduée pour matérialiser l'échelle. Elle fait une interprétation stéréoscopique des centres des photos pour limiter les contours des éléments structuraux sur transparent, ces contours, identifiés et associés à l'échelle sont transférés sur papier blanc. Ce document est digitalisé par une caméra vidéo CCD associée à une carte 512x512 pixels qui permet d'obtenir une image en 256 niveaux de gris, réduite en image à 2 niveaux de gris (noir, blanc). Le logiciel de traitement d'image PC-scope permet d'obtenir pour chaque objet: l'identification, le périmètre, la surface, la plus grande longueur, la plus petite longueur, les coordonnées du barycentre.

La précision de la méthode sur l'estimation des surfaces est de l'ordre de $\pm 5\%$ mais peut atteindre $\pm 13\%$ pour les surfaces les plus petites correspondant aux mottes de moins de 5 cm de longueur.

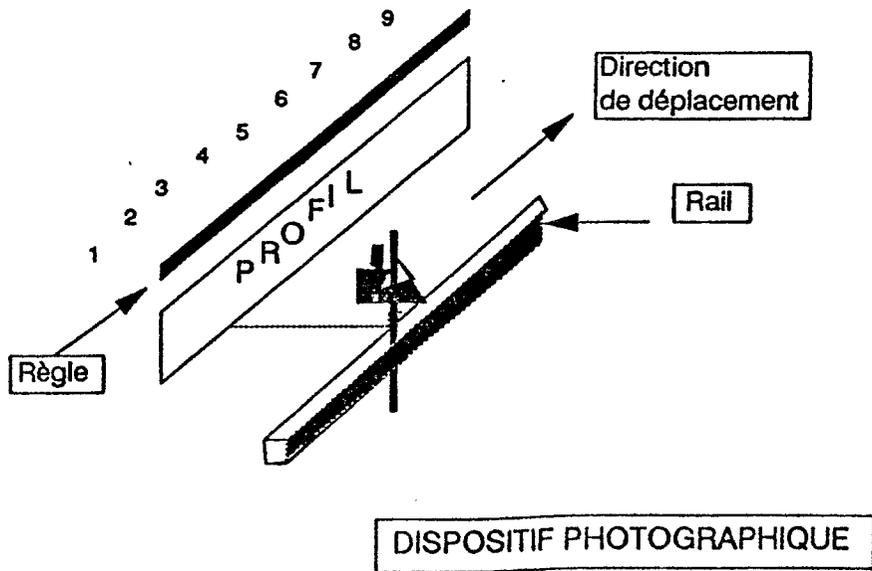
Cette méthode de caractérisation des objets par le nombre est justifiée par COSTER et CHERMANT (1989) cités par COULOMB, qui ont montré que le biais est plus important lorsque l'on caractérise une distribution d'objets sphériques par le nombre plutôt que par une dimension (longueur, surface, volume).

La méthode permet de comparer la variabilité des états structuraux (mottes) du sol, avant et après labour, sur la base de critères quantitatifs définis par les surfaces occupées par ces éléments structuraux (classés selon leur état interne et selon leur forme) et la surface des vides (internes au labour ou en contact avec la surface) (fig. 9).

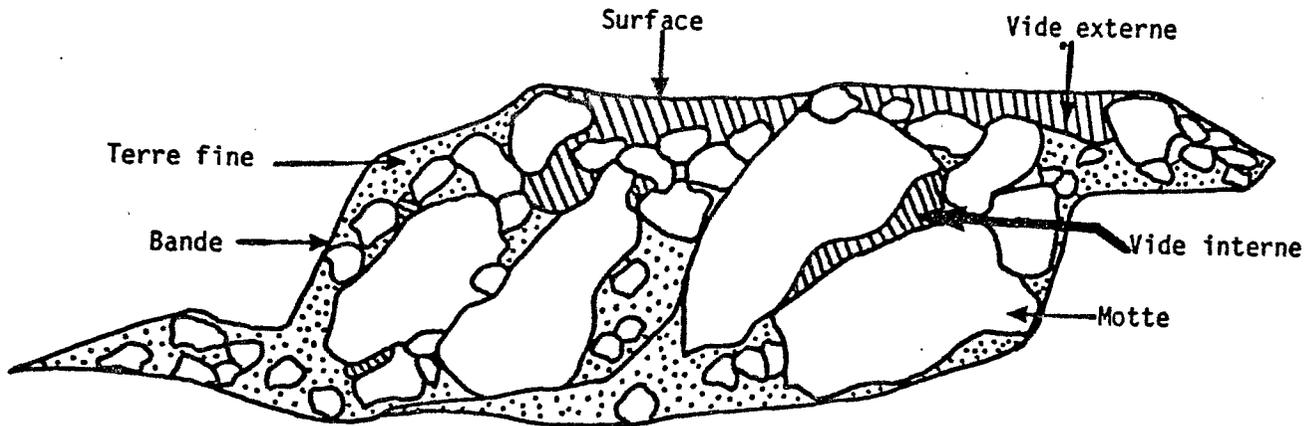
Cependant, extrêmement lourde à mettre en oeuvre, elle pourrait peut-être être simplifiée au niveau de l'acquisition des données et de leur traitement.

3.2 L'analyse d'images

S'intéressant à la structure interne du sol et à sa variation sous l'effet du labour, DEXTER (1976) prélève des blocs par enfoncement de boîtes en tôle de 30x30 cm et 18 cm d'épaisseur immédiatement après labour. Les blocs sont imprégnés sur place dans les boîtes avec de la paraffine puis démoulés et sciés à la scie à métaux. L'expérience montre que la paraffine remplit les pores jusqu'à 1 mm de diamètre et que des sections parfaites sont obtenues pour des humidités comprises entre la saturation et le séchage à l'air.



Dispositif utilisé pour la réalisation des documents photographiques



Définition du contour de la bande de labour et de ses éléments constitutifs

Fig. 9 : Dispositif photographique et contour de la bande de labour (COULOMBI, 1991).

Sur ces coupes il effectue des mesures d'angle d'incidence selon des directions verticales, à 45° et horizontales par rapport à une ligne de base choisie parallèle à la surface du labour, à une profondeur donnée (fig. 10). Il met en évidence l'isotropie de la distribution des angles vides-agrégats et différencie les types de travail du sol.

La porosité linéaire est définie sur la ligne de base par la longueur occupée par la paraffine par rapport à la longueur de cette ligne de base; elle nécessite la lecture de 1000 points soit 1000 mm pour obtenir une précision suffisante. Elle renseigne sur la porosité globale le long de la ligne mais pas sur la structure de la ligne. Celle-ci est analysée par l'étude du précédant selon la théorie des communications qui permet de générer des simulations de labour.

Ces techniques "manuelles" d'analyse sont maintenant supplantées par l'analyse numérique d'image.

MURPHY *et al.* (1977 et 1977) constatent que si l'analyse d'image est appliquée à la mesure des pores sur des lames minces, les images obtenues au microscope conviennent pour l'étude des pores de dimension inférieure à 150 μm . En utilisant des photographies à haut contraste à différentes échelles et des mesures d'orientation, d'irrégularité et de reconnaissance de forme, ils mettent en évidence les changements morphologiques induits par le compactage et l'hydromorphie de surface.

RINGROSE-VOASE (1987) utilise aussi des photographies de blocs mais imprégnés à la résine fluorescente pour élaborer une méthode quantitative de description de la structure utilisant le système ANOPOR développé par RINGROSE-VOASE et BULLOCK (1984).

S'intéressant à la modélisation des régimes hydriques dans les sols, BOUMA (1990) cherche à prendre en compte l'effet des macropores sur le transport de l'eau et des solutés dans le sol. Pour cela il utilise la caractérisation morphométrique des macropores pour déterminer les Volumes Représentatifs Élémentaires (VRE) ou des sous-ensembles homogènes à partir de lames minces.

Cependant ces techniques font appel à des méthodes d'imprégnation des échantillons longues et exigeant un matériel spécifique. MORAN *et al.* (1989 et 1990) proposent une méthode rapide et simple d'analyse de la structure des pores basée sur l'imprégnation au champ et l'analyse d'image (fig. 11, 12 et 13).

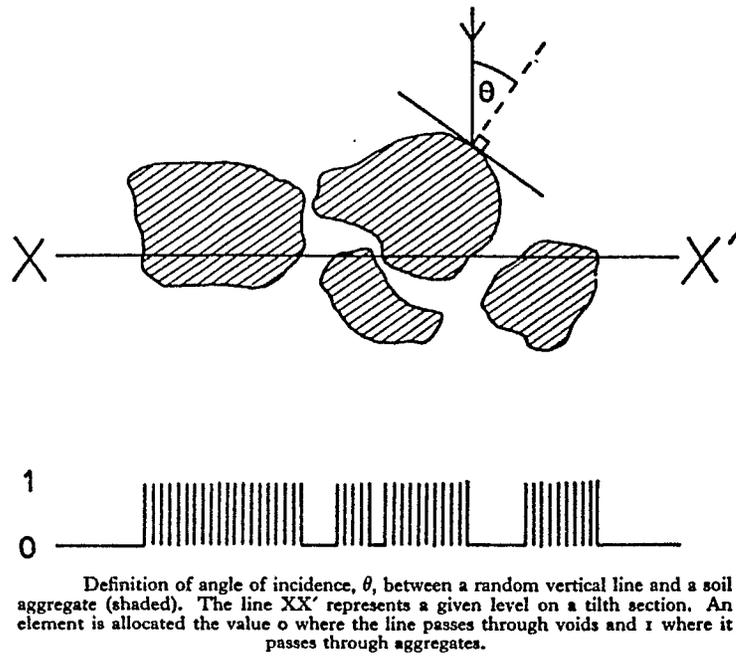


Fig. 10 : Définition de l'angle d'incidence (DEXTER, A. R., 1976).

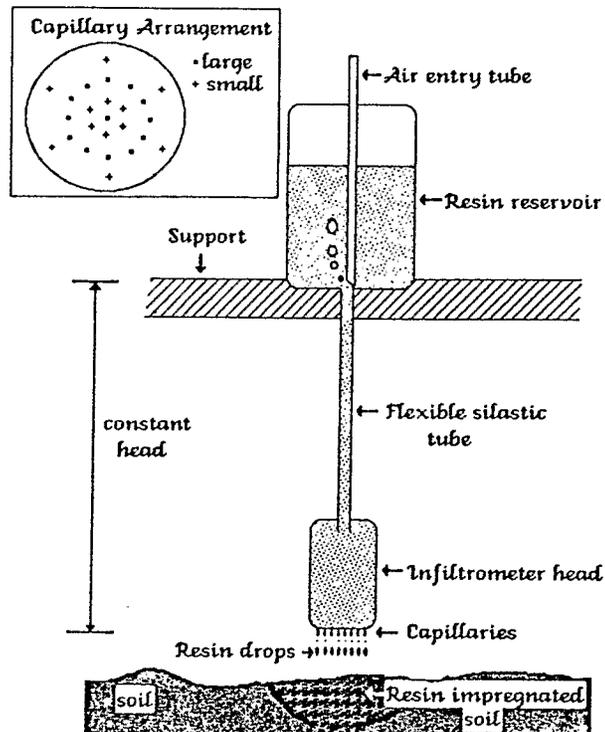


Fig. 11 : Infiltromètre à résine (MORAN C.J. *et al.*, 1987).

Les échantillons sont partiellement imprégnés *in situ* avec une résine époxy: l'imprégnation et la préparation de la face à digitaliser sont achevées au laboratoire à l'humidité au prélèvement, ce qui supprime le temps de séchage souvent très long et les transformations dues au retrait. L'imprégnation au champ se fait sur sol non remanié par un infiltromètre à niveau constant. La taille des échantillons imprégnés est de 100 à 200 mm de diamètre en surface, de 300 à 400 mm à une profondeur de 250 à 300 mm. Au laboratoire ces blocs sont sciés verticalement et placés face sciée dessous dans la résine pour parfaire l'imprégnation sous vide. Un second sciage est effectué dans la partie imprégnée au laboratoire, un film de résine est appliqué sur la face pour remplir les pores qui seraient restés vides. L'échantillon est découpé en bloc de 150 mm de large, 250 de long et 30 à 60 mm d'épaisseur. Il est prêt pour la digitalisation et l'analyse d'image.

Les échantillons n'étant pas déshydratés il est important de les digitaliser rapidement après l'imprégnation. Le cycle complet, du prélèvement au stockage de l'image digitalisée dure 4 à 5 jours, à comparer aux mois nécessaires avec les techniques de remplacement eau-acétone, de déshydratation et d'imprégnation lente.

L'utilisation d'une formule de résine appropriée (composition en annexe) autorise l'imprégnation d'échantillons sur une large gamme d'humidités. L'altération de la porosité due au retrait durant le séchage est éliminée. L'imprégnation *in situ*, avant prélèvement de l'échantillon, minimise les déformations.

Cette méthode produit des images à deux composants: les pores et le solide. Elle a été améliorée pour permettre d'une part de prélever et de digitaliser des monolithes de 70 cm de hauteur et d'effectuer des mesures de racines *in situ* (McBRATNEY *et al.*, 1992) et, d'autre part (MORAN *et al.*, 1992a et 1992b), de travailler sur des images à trois composants: la macroporosité connectée à la surface, la macroporosité non connectée et la partie solide. L'utilisation de résines de couleurs différentes pour l'imprégnation verticale *in situ* et pour l'imprégnation au laboratoire permet cette distinction.

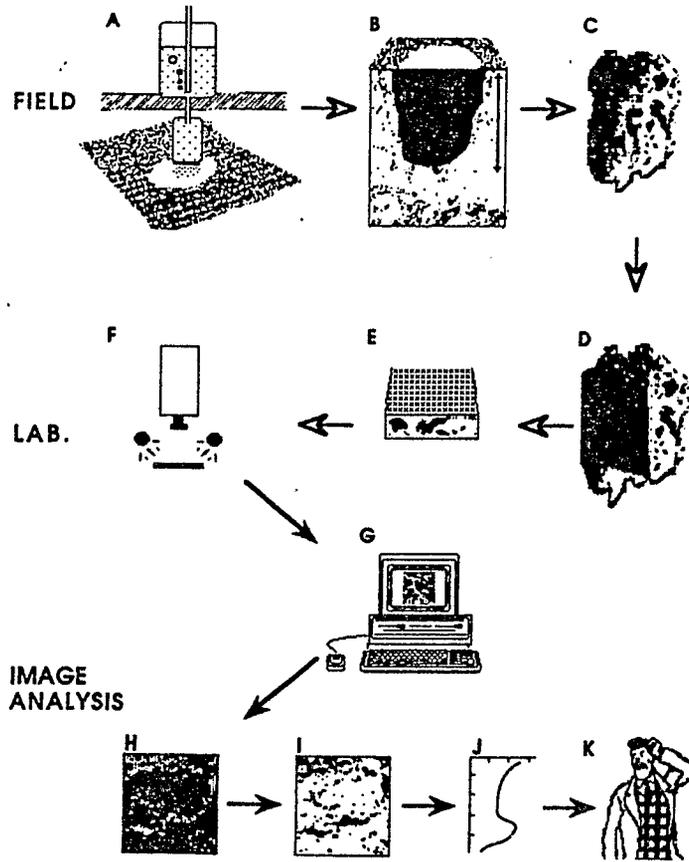
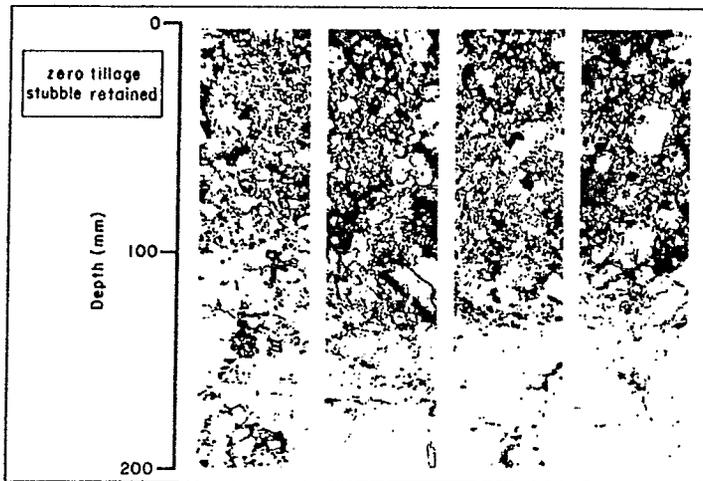


Fig. 12 : Chaîne de traitement par analyse d'image (McBRATNEY M.C. *et al.*, 1992).



Digital images of vertical sections through pore structure from the ZR treatment. Black, field impregnation; grey, laboratory impregnation; white, solid.

Fig. 13 : Images de blocs polis (MORAN C.J. *et al.*, 1992).

3.3 - La tomographie

Une autre approche de la distribution spatiale de la macroporosité sur échantillons de sol consiste à utiliser la Tomographie Assistée par Ordinateur (CAT) appliquée à l'atténuation des rayons gamma (PHOGAT, AYLMORE, 1989). Les auteurs ont utilisé des échantillons de sol de 84 mm de diamètre et 40 mm de hauteur. Ils ont mis en évidence la réduction de la macroporosité d'échantillons humidifiés sous lame d'eau par rapport à ceux humidifiés par remontée capillaire. Cette technique permet de suivre les changements de macroporosité induits durant des cycles d'humectation-dessiccation sur colonnes de sol. L'utilisation d'une double source permettrait l'enregistrement des variations de teneur en eau et de densité apparente.

L'application de la tomographie associée cette fois aux rayons X et à un traceur (solution de KI à 1%) est utilisée par ANDERSON *et al.* (1992) pour identifier l'influence de la structure sur le mouvement des solutés. Des prélèvements sont effectués *in situ* mais les échantillons analysés sont reconstitués à partir de trois classes d'agrégats (0,25-0,50, 0,50-1,00 et 1,00-2,00 mm). L'expérience montre une distribution non homogène des vitesses à travers une section de cylindres de 76,2 mm de diamètre. Des vitesses plus faibles près des parois laissent supposer un effet de bordure important pour les cylindres contenant les agrégats des classes 0,25-0,50 et 0,50-1,00 mm.

La tomographie RX est depuis peu appliquée à des échantillons non perturbés pour l'étude de la macroporosité (WARNER *et al.*, 1989, ANDERSON *et al.*, 1991). Après avoir montré que l'exploitation des données par seuillage unique des niveaux de gris ne permettait pas de discriminer des pores inférieurs à 5 mm, PEYTON *et al.* (1991) ont mis au point une méthode qui évalue séparément chaque pore par une procédure itérative. PEYTON *et al.*, (1992) ont appliqué cette méthode à des échantillons non perturbés de 76,2 mm de diamètre et 76,2 mm de hauteur ce qui leur permet d'effectuer des mesures de périmètre et de diamètre équivalent de macropores (> 0,5 mm) pour mettre en évidence des différences de porosité entre un sol de forêt et un sol sous prairie permanente.

IV - LES MESURES COMPLEMENTAIRES

Un certain nombre de mesures physiques, appliquées *in situ* ou au laboratoire sur échantillon non perturbé ou remanié, viennent souvent accompagner l'examen des profils culturaux. Parmi ces méthodes nous en avons retenu deux pour leur originalité, leur utilisation traditionnelle ou leur complémentarité à l'analyse morphologique des éléments structuraux.

La description du profil cultural est, du moins en France, souvent pratiquée dans un but agronomique par des agronomes. L'examen du système racinaire, prévu par HENIN *et al.* (1969), accompagne donc souvent celui de la structure proprement dite; en conséquence il nous paraît important d'évoquer également des méthodes de description du système racinaire.

4.1 La perméabilité à l'air

Constatant la complexité de la notion de structure du sol étudiée dans une optique agronomique, sa variabilité spatiale et temporelle, la difficulté de trouver un critère pertinent de caractérisation, HINSINGER et METTAUER (HINSINGER *et al.*, 1989, METTAUER *et al.*, 1989) se proposent de développer pour l'agronomie la mesure de la perméabilité à l'air des sols.

Un premier article (HINSINGER *et al.*, 1989) montre que l'on peut faire reposer la définition de la perméabilité à l'air sur la loi de Darcy, généralisable au cas des gaz et de l'air moyennant le respect de certaines hypothèses concernant l'écoulement (phase gazeuse continue d'écoulement laminaire dans un milieu isotherme). Ces conditions peu limitatives sont prises en compte lors des mesures (débits faibles, teneur en eau constante et température connue).

La perméabilité à l'air permet d'apprécier la circulation des fluides d'une part et la fraction continue de la porosité d'autre part.

La méthode de mesure peut être à pression variable ou à pression constante. Le perméamètre à pression constante de Van Groenewoud paraît fiable et le seul compatible avec les hypothèses concernant l'écoulement.

Cependant la formulation de la perméabilité à l'air exige que la pression de l'air à la sortie de l'échantillon soit égale à la pression atmosphérique ce qui n'est plus le cas lorsque la mesure est effectuée *in situ*.

Pour les mesures *in situ* il est nécessaire de coupler le perméamètre à des mesures de pression de l'air à la base du cylindre ou à des micro-tensiomètres. Effectuées à pF3, les mesures de perméabilité à l'air sont, d'après METTAUER et HINSINGER (1989), un critère pertinent pour juger des possibilités de colonisation racinaire de la porosité continue dans la mesure où le développement racinaire se fait très généralement dans des pores de diamètre supérieur à 30 micromètres. Liée à la pénétrométrie elle permet de rendre compte de l'ensemble des modalités de colonisation racinaire. La répétition possible des mesures à faible coût permet l'étude de la variabilité spatiale et temporelle de la structure du sol et de ses effets sur l'enracinement. Les auteurs ne proposent cependant pas de résultats obtenus par eux-mêmes.

Quant à ROSEBERG et McCOY (1992) ils utilisent la perméabilité à l'air sur échantillons non perturbés pour juger de l'effet du travail du sol et de la circulation des engins sur la macroporosité et la continuité des macropores.

4.2 La méthode pénétrométrique

La pénétrométrie est l'un des tests simples à mettre en oeuvre développé pour essayer de quantifier les paramètres physiques du sol aux liens nombreux et complexes. Résultat synthétique de ces liens, elle ne peut cependant pas être considérée comme la mesure d'un paramètre physique stricto-sensu (DEXTER, 1988).

La pénétrométrie est définie comme "la mesure de la résistance opposée par le sol à l'enfoncement d'un outil normalisé" (BILLOT, 1982).

Les applications de la pénétrométrie à l'étude de la structure des sols travaillés ont surtout été développées par les agronomes ou les physiciens du sol s'intéressant à la semelle de labour ou au tassement des sols par les roues des engins.

L'évolution de la mesure a porté sur le type d'outil et sur la méthode de mesure; BILLOT (1882) donne la chronologie suivante:

C'est vers 1840 que Gasparin propose une "bêche dynamométrique" pour mesurer la "ténacité" des terres. Cette bêche de 2,7 kg s'enfonce dans le sol lorsqu'on la laisse tomber de 1 m de hauteur; en sol caillouteux elle est remplacée par un trident.

En 1913, Bernstein semble être le premier à s'intéresser à la portance des sols en y enfonçant des aiguilles.

En 1933, Proctor normalise un test utilisant aussi des aiguilles mais à pointe de diamètre plus large que la tige.

En 1936, Demolon et Hénin mettent au point une sonde dynamométrique enregistreuse qui permet d'obtenir des courbes de résistance en fonction de la profondeur de mesure alors qu'Hénin propose un "indice d'ameublissement", rapport entre le travail fourni pour faire pénétrer la pointe à une certaine profondeur dans un sol infiniment meuble et dans le sol étudié.

En 1942, Shaw, Haise et Farnsworth utilisent un pénétromètre pour étudier les changements physiques dans les sols de l'Ohio sous l'effet de différentes techniques culturales et à différentes humidités.

Puis l'ASAE normalise une pointe de pénétromètre (ASAE 313.1) qui doit être enfoncée dans le sol à la vitesse de 0,03 m/s pour donner le "cône index"(CI) caractéristique d'un état du sol sur lequel est effectuée la mesure. La pointe est constituée par un cône de 30° d'angle au sommet et de 1/2 pouce carré de section.

4.2.1 Les divers types de pénétromètres

Deux types sont essentiellement utilisés: à enfoncement progressif et par percussion. Un troisième type, le pénétromètre à plaque, est utilisé par Guérif (BOIFFIN *et al.*, 1990).

1) Pénétromètre à enfoncement progressif

Ces pénétromètres sont poussés dans le sol manuellement ou mécaniquement. La force est transmise par un dispositif de mesure mécanique (ressort en compression), hydraulique (manomètre) ou électronique (capteur extensométrique) (BILLOT, 1982).

L'effort lu ou enregistré pour différentes profondeurs de pénétration est rapporté à la section maximum de la pointe: c'est la résistance à la pénétration (RP) ou le Cône Index (CI).

Ces pénétromètres vont du modèle "de poche" type CN 970 de Soil Test, UTI de Agridry Rimik, au modèle monté sur l'attelage trois points d'un tracteur (NESMITH *et al.*, 1987) en passant par le pénétromètre automatique enregistreur du CEEMAGREF (BILLOT, 1982) monté sur un chariot muni d'un rail horizontal.

2) Pénétromètre dynamique ou à percussion

De construction très simple, il est manuel et ne permet pas l'enregistrement automatique des mesures.

Il est constitué d'une tige munie à son extrémité d'une pointe conique et comportant une butée ou enclume. Une masse métallique cylindrique coulisse autour de la tige. On la remonte manuellement et on la laisse tomber: le choc sur l'enclume provoque l'enfoncement de la pointe dans le sol.

Plutôt utilisée en sols résistants (sols secs des pays méditerranéens et sols tropicaux) la pénétrométrie par percussion a fait l'objet d'une mise au point par le Comité Technique de Pédologie de l'Orstom (ORSTOM, 1973).

La normalisation proposée par l'Orstom pour rendre les résultats comparables entre eux est la suivante (fig. 14):

- pointe conique d'angle au sommet de 90°, sans partie cylindrique à l'arrière de l'angle de travail. Angle arrière entre 90 et 180°. Diamètre de la pointe: 20 mm
- tige cylindrique de diamètre compris entre 1/2 et 2/3 du diamètre de la pointe.

4.2.2: L'expression des résultats

Les résultats s'expriment par la résistance à la pénétration (RP) ou le cône index (CI).

- dans le cas du pénétromètre à enfoncement progressif l'effort lu ou enregistré pour différentes profondeurs de pénétration, rapporté à la section maximale de la pointe, traduit la résistance à la pénétration qui correspond à une pression.

- dans le cas du pénétromètre à percussion on calcule la résistance à la pénétration par une formule empirique dite "formule des Hollandais" (BILLOT, 1982), confirmée par STOLF (1992) comme étant celle qui convient le mieux au calcul de la résistance à la pénétration:

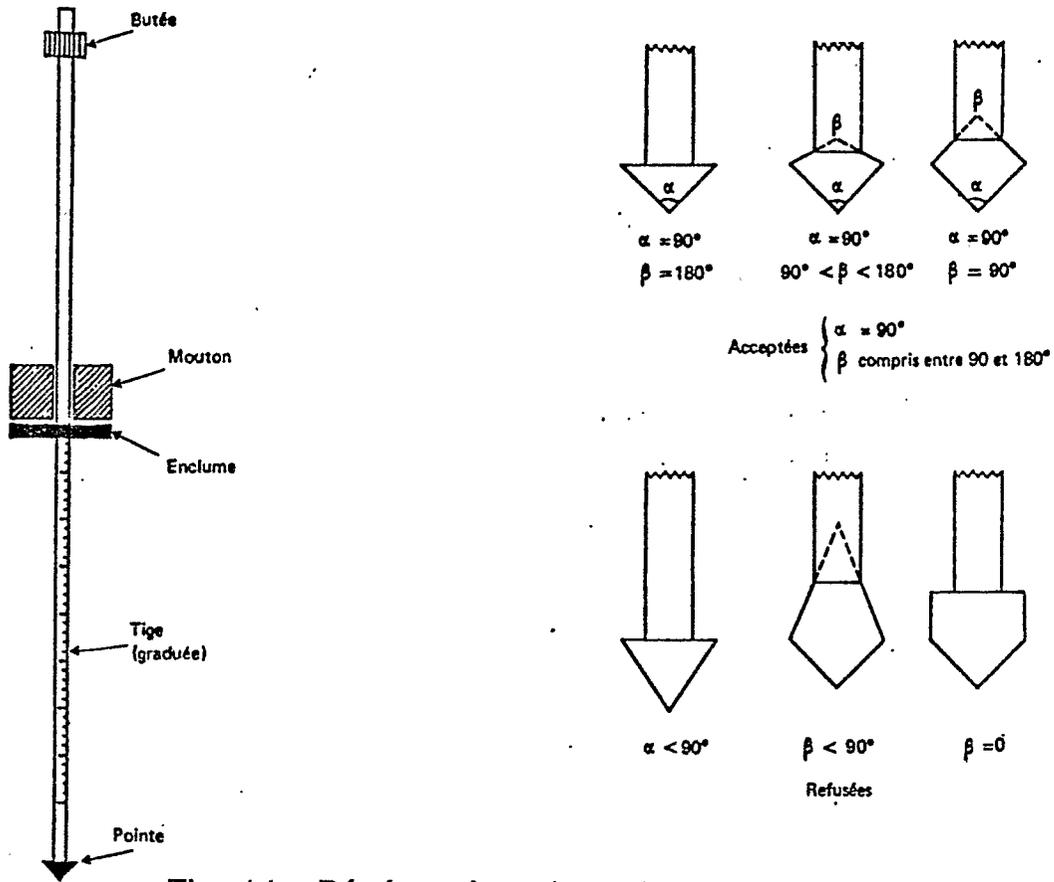
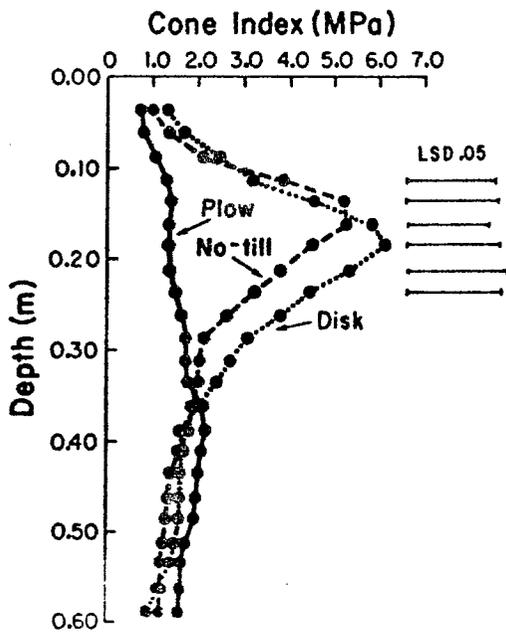


Fig. 14 : Pénétrömètre dynamique (ORSTOM, 1973).



Cone index in the row 30 d after planting in 1985.

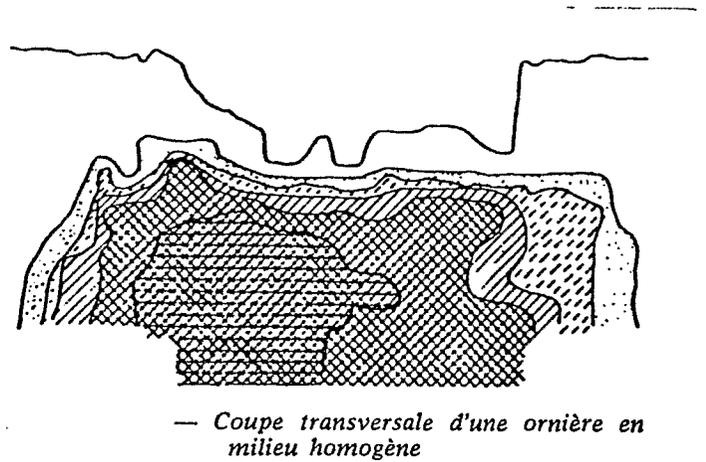


Fig. 15 : Présentation des mesures pénétrométriques : à G. courbe élémentaire (NeSmith *et al.*, 1987), à D. cartographie (BILLOT J.F., 1982).

$$RP = n.M^2.h / 2(M+m).S.\Delta Z$$

où:

- RP: résistance à la pénétration en kg/cm² (1 kg/cm² = 100 kPa)
n: nombre de coups
M: masse de la masselotte en kg
h: hauteur de chute de la masselotte en cm
m: masse de la tige du pénétromètre en kg
S: section maximale de la pointe en cm²
 ΔZ : enfoncement correspondant en cm

Les résultats sont représentés (fig. 15 et 16):

- par la courbe élémentaire, exprimant RP selon la profondeur ou
- par cartographie, soit sous forme de lignes isobares, soit sous forme de mosaïque de surfaces élémentaires.

La résistance du sol à la pénétration étant très sensible à l'humidité, il est nécessaire de s'efforcer d'effectuer les mesures dans les mêmes conditions pour pouvoir les comparer.

HENDERSON *et al.* (1988) montrent sur treize échantillons de sols des plaines sableuses de l'ouest australien que RP n'est que légèrement affecté quand l'humidité ne baisse pas à moins de 70% de la capacité au champ. Cependant il n'y a pas de méthode pour prédire la réponse de RP aux changements de densité apparente ou d'humidité.

Constatant les difficultés à comparer les résultats des mesures pénétrométriques, FRITTON (1990) propose une procédure standard en six étapes pour corriger les données. Il préconise l'adoption d'un seul standard de pénétromètre précisant que l'angle du cône, l'importance du confinement, le nonconfinement et les effets de la profondeur sont les modalités les plus importantes à standardiser.

4.2.3 Les applications

1) Compactage et passages d'engins

De nombreux auteurs s'intéressant à l'effet du passage des engins agricoles ont utilisé la pénétrométrie.

BILLOT (1982) montre la limitation en profondeur du compactage occasionné par les passages de tracteurs lors des préparations superficielles du sol, comparé à celui très profond du passage d'un appareil de traitement. Le relevé pénétrométrique transversal d'une ornière montre l'action dissymétrique des barrettes d'un pneu large.

Etudiant le compactage par les roues de tracteur JORGE *et al.* (1992) pratiquent des mesures de résistance pénétrométrique dans les 50 premiers centimètres de sol 11 jours après irrigation, sur sol relativement sec. Dans les 10 premiers centimètres la résistance moyenne à la pénétration pour le sol compacté (1,6 MPa) est plus importante que sur le témoin (1,4 MPa). Les mesures montrent en outre dans les deux cas la présence entre 10 et 20 cm d'une semelle de labour.

HADAS *et al.* (1986 et 1988) montrent par des cartes isobares de résistance à la pénétration l'effet du passage d'un tracteur à différentes vitesses. Ils mettent en relation des cartes isobares de RP et les rendements en blé pour deux types de trafic (fig.17).

MARSILI et SERVADIO (1992) utilisent les tests pénétrométriques à différentes profondeurs pour montrer l'influence de deux types de pneus, radial standard et extra-large, à deux teneurs en eau différentes. Le pneu extra-large réduit la RP surtout quand l'humidité est la plus forte.

LIEBIG *et al.* (1993) s'intéressent à l'effet du passage des tracteurs dans les interbillons de champs cultivés en maïs et soja. Ils travaillent sur des échantillons non perturbés de 8,2 cm de diamètre et parmi d'autres mesures ils utilisent la pénétrométrie sur des échantillons amenés à une teneur en eau équivalente à -0,5 kPa. La résistance (strength) du sol ainsi mesurée est un indicateur de compactage plus sensible que la densité apparente.

Enfin en France, Guérif (BOIFFIN, 1990) lors d'études au champ du compactage par les pneumatiques établit la relation déformation-contrainte lors de la mise en oeuvre du pénétromètre à plaque en effectuant des tests de portance à divers stades d'humidité. La portance augmentant avec la dessiccation, la présence d'une couche sèche en surface diminue les pressions transmises en profondeur ce qui réduit la déformation du sol. Selon l'auteur les interactions entre couches successives de compressibilités différentes sont un élément primordial à prendre en compte pour comprendre le compactage des sols.

2) Effets du labour

BILLOT (1982) met en évidence l'action complexe d'une succession d'outils au moyen de relevés pénétrométriques en utilisant la représentation cartographique.

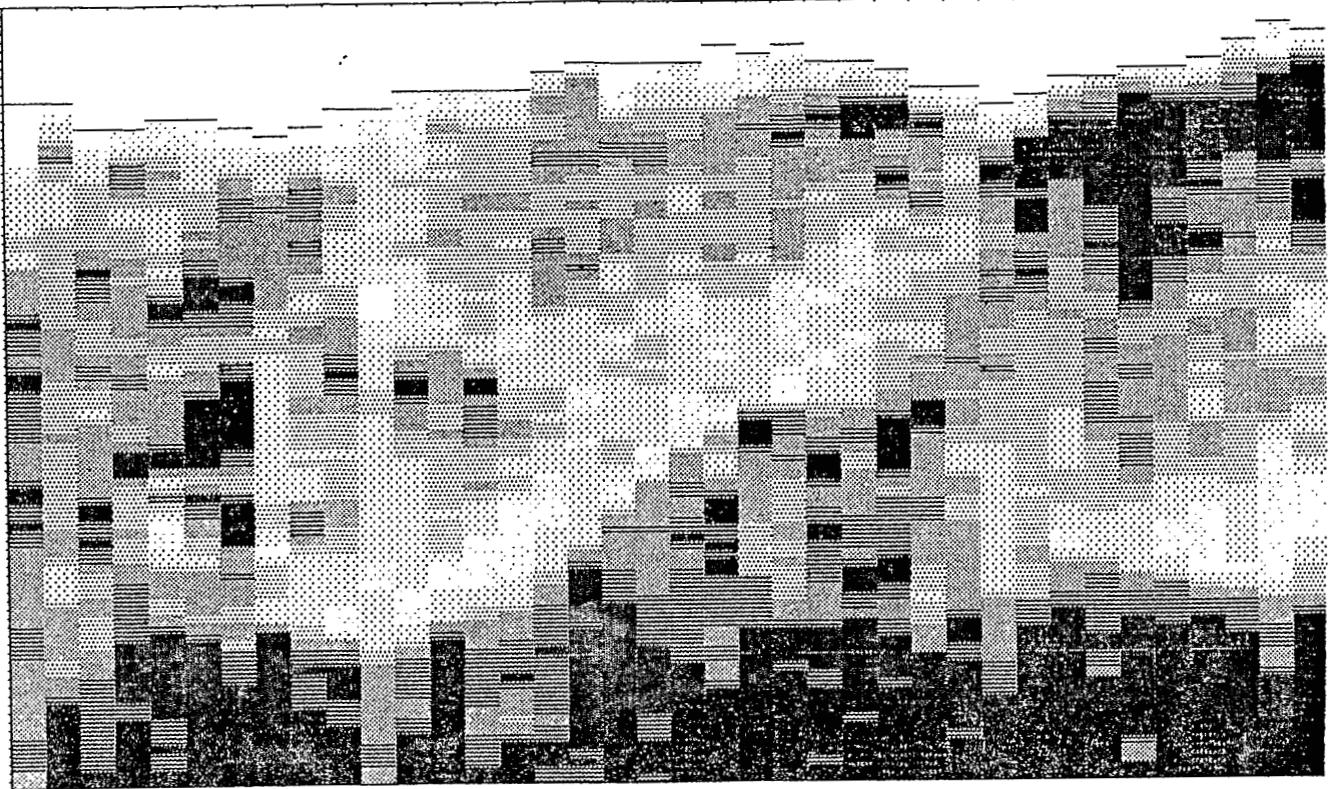
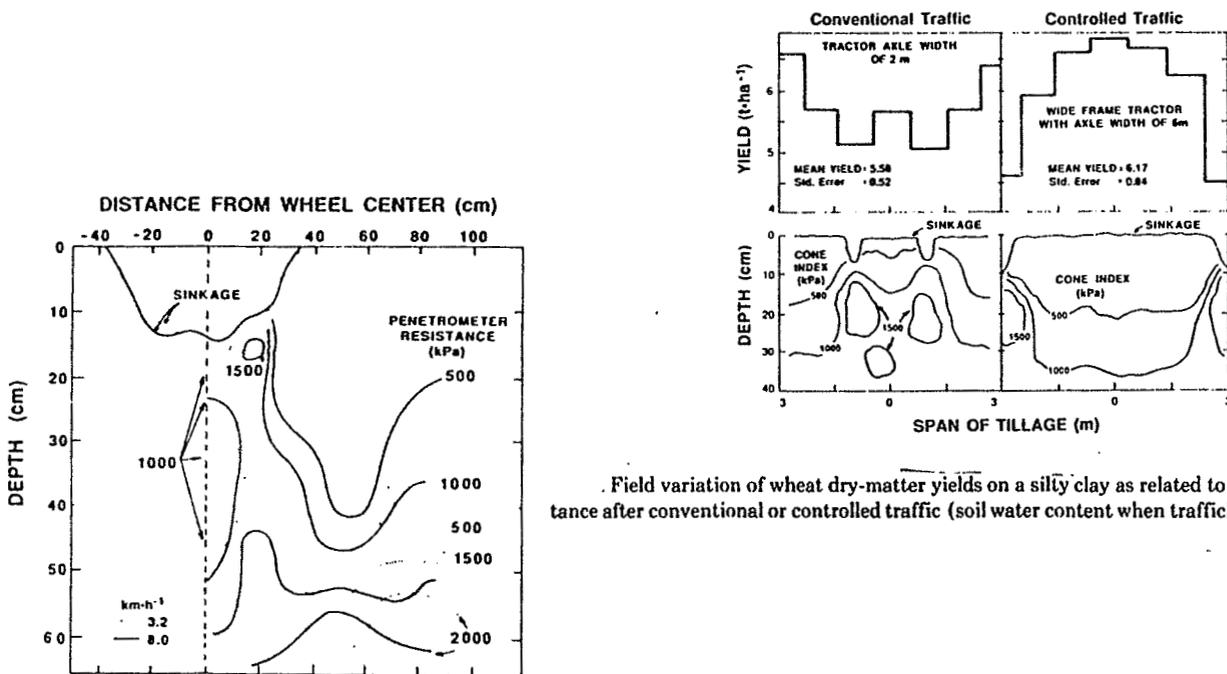


Fig. 16 : Cartographie automatique de RP (BILLOT J.F., 1982).



Field variation of wheat dry-matter yields on a silty clay as related to penetrometer resistance after conventional or controlled traffic (soil water content when trafficked was 28%, w/w).

Isopenetration resistance lines measured in a silty loam at a water content of 20% (w/w) after one pass of a tractor traveling at speeds of 3.2 and 8.0 km h⁻¹ (from Hadas et al., 1986).

Fig. 17 : Pénétrométrie et rendement (HADAS A. et al., 1988).

En Australie, la dégradation des sols à blé, cultivés depuis plusieurs dizaines d'années, oblige à rechercher des pratiques culturales à faible impact sur le sol. Dans la partie expérimentation au champ de leur étude, BURCH *et al* (1986) utilisent la pénétrométrie et montrent que les trois traitements testés se différencient entre 2 et 70 cm de profondeur par la résistance à la pénétration. Un horizon compacté entre 10 et 15 cm de profondeur, commun aux trois traitements, traduit la longue histoire culturale du site.

HENDERSON, (1989) montre, sur des sols uniformément sableux, l'utilité du pénétromètre pour obtenir de façon rapide l'estimation de la sévérité du compactage en fond de labour. Il établit des relations entre la résistance à la pénétration et la croissance ou le rendement en blé avec l'idée de développer un "service à la ferme" pour prédire quelles parcelles répondront de façon économique au labour profond.

Aux Etats Unis, l'introduction de la double culture du soja et du blé dans les plaines de Géorgie oblige à des pratiques culturales réduites voir au zéro-labour. Les études menées au champ (NeSMITH *et al.* , 1987) avec un pénétromètre hydraulique monté sur tracteur testent trois préparations du sol avant la première culture (soja) et montrent que l'utilisation des disques avant la deuxième culture (blé) est le facteur prépondérant du compactage. Le labour avant la première culture est la meilleure façon de décompacter le sol (fig.17).

Pour CASSEL et NELSON (1985) le but de l'étude est d'évaluer quantitativement la variabilité spatiale et temporelle de plusieurs propriétés physiques du sol suite à plusieurs opérations culturales. Les grandeurs physiques mesurées sont: le Cône Index (C.I.), la teneur en eau pondérale, la densité apparente, la conductivité hydraulique à saturation, et le tassement du sol. Ces mesures sont faites à trois dates: au semis, 15 jours après, 50 jours après. Les différences significatives dues aux différents types de labour sont mises en évidence par la densité apparente, le Cône Index et l'humidité. Les variations temporelles et spatiales les plus importantes se situent dans la couche 0-14 cm.

3) Applications diverses

La pénétrométrie est également utilisée dans des applications particulières telles que:

- l'estimation de la dureté des croûtes de surface des sols:

VALENTIN (1988) utilise un dynamomètre à ressort. Cette technique peut être améliorée en utilisant un pénétromètre automatique à aiguille d'AgriDry Rimik PTY. Ltd, qui mesure la résistance à la pénétration d'une aiguille de 1 à 3 mm de diamètre poussée par un moteur par pas de 0,2 mm sur une profondeur de 10 cm.

Plus récemment, FOLORUNSO *et al.* (1994) ont utilisé la pénétrométrie pour étudier la variabilité spatiale de la résistance de la surface de sols Californiens. Les mesures de RP sont faites à des intervalles de 0,1 mm sur 10 mm de profondeur par un pénétromètre à tige à pointe plate de 1,59 mm de diamètre avançant à 8 mm/mn. (ROLSON *et al.*, 1991).

- L'enregistrement de la taille des agrégats: OLSEN, (1992) utilise un petit pénétromètre horizontal à tige de 5 mm de diamètre. Les essais menés au laboratoire montrent que si la taille des agrégats n'est pas directement mesurable, un paramètre dérivé de RP permet d'en rendre compte.

- L'étude de la cohésion du sol: la pénétrométrie est aussi utilisée pour essayer de quantifier le développement de la cohésion au fur et à mesure que les sols perdent leur humidité (CHARREAU, NICOU, 1971). BLONDEL (1964) trace la courbe travail effectué/profondeur d'enfoncement, la dérivée de la courbe exprime la force de résistance à la pénétration. C'est une mesure ponctuelle très sensible à l'hétérogénéité du sol, elle nécessite donc de nombreuses répétitions. Les coefficients de variation vont de 25 à 35% pour des mesures faites en fin de saison sèche avec 32 répétitions par traitement. L'indice d'ameublissement proposé par HENIN cité par BILLOT (1982) est remplacé par le coefficient de cohésion W_x/W_t , le sol de référence, ici la parcelle non travaillée, exigeant un travail W_t supérieur à celui des parcelles travaillées W_x .

4.3 L'examen des racines

Tout praticien s'étant essayé à la description du profil cultural est très vite confronté à la description du système racinaire.

Deux techniques semblent dominer (fig. 18 et 19):

- La méthode par lavage et tri suivi du séchage et de la pesée des racines. Elle est appliquée sur le prélèvement de la totalité du système racinaire ou sur des carottages représentatifs.

- La méthode de cartographie horizontale et verticale proposée par TARDIEU et MANICHON en 1986 (TARDIEU, MANICHON, 1986).

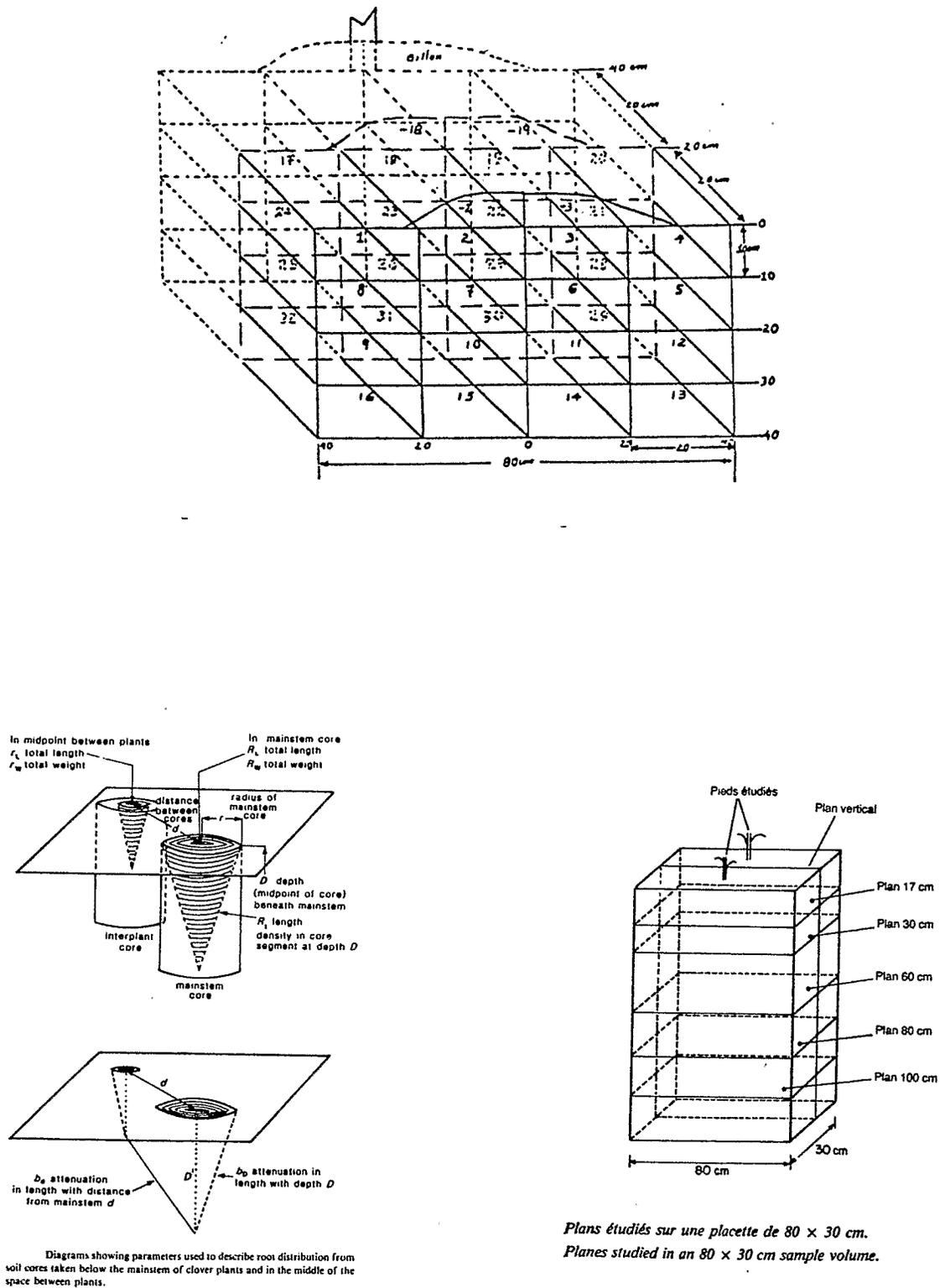


Fig. 18 : Etude des racines: En haut, prélèvement de monolithes (ALFONSO LINARES C. A., 1987), à G, prélèvement de carottes (PEARSON C.J. et al., 1985), à D, cartographie *in situ* (TARDIEU F. et al., 1986).

Pour juger de l'amélioration du profil cultural dans les sols sableux d'Afrique de l'Ouest CHARREAU et NICOU (1971) ont effectué des mesures quantitatives de l'enracinement selon deux types de méthodes:

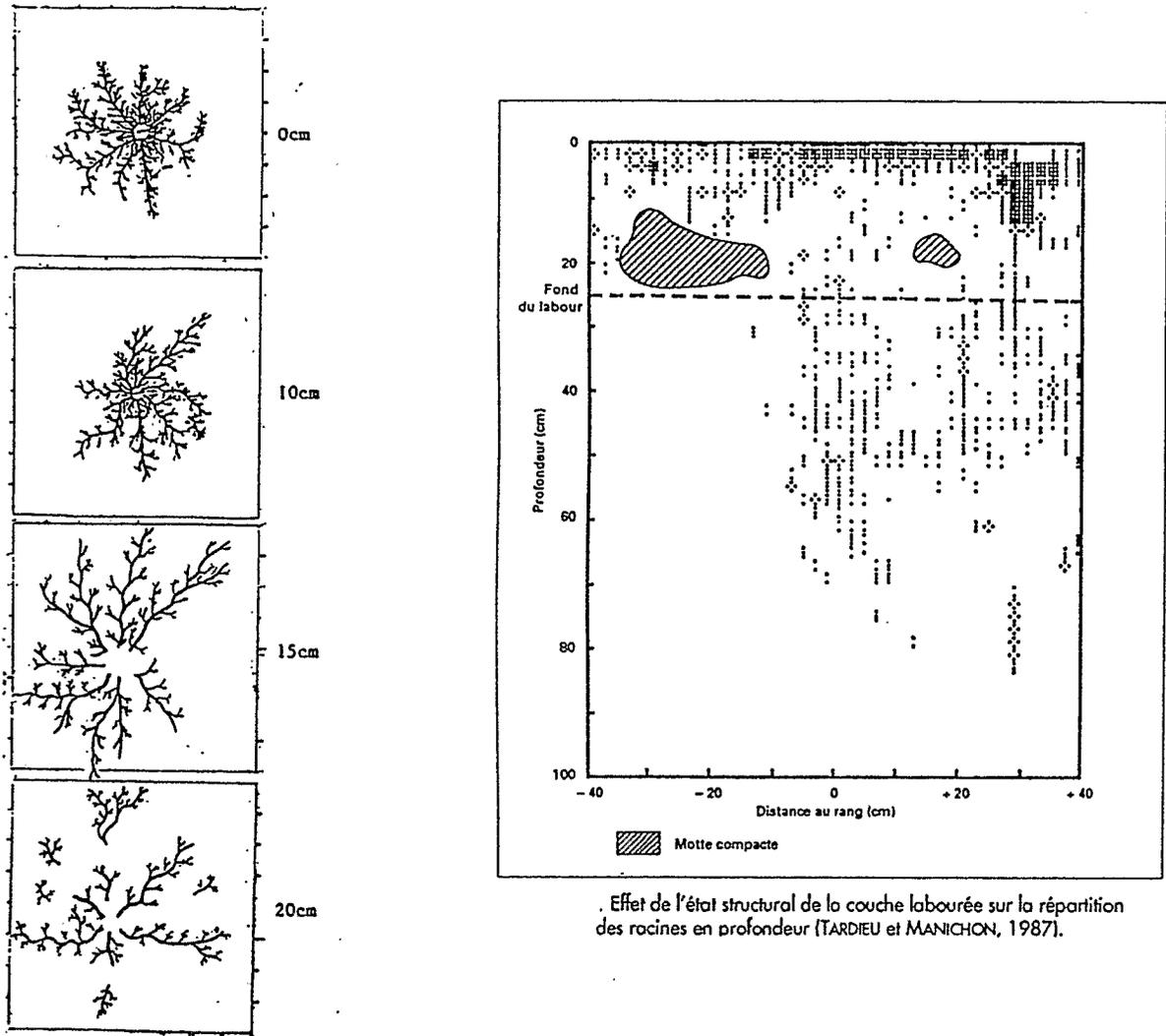
- prélèvement de la totalité du système racinaire, technique sûre mais très longue
- prélèvements par sondages selon la procédure recommandée par MAERTENS (1964) qui consiste à enfoncer horizontalement un cylindre de 100 cm³; au laboratoire on sépare les racines de la terre par lavage. Les conditions de prélèvement sont standardisées pour chaque culture. Bien que les coefficients de variation soient très importants (30 à 40%) les différences entre traitements peuvent être significatives.

CALLOT *et al.* (1983) caractérisent la morphologie de l'enracinement par son type (fasciculé ou pivotant) et par le nombre d'ordre et l'importance des ramifications; ils préconisent la méthode du lavage. S'intéressant à la nutrition minérale des plantes, ils privilégient la surface développée et la longueur des racines plutôt que leur masse comme paramètres utilisés pour apprécier l'importance du contact sol-racines, estimateur des possibilités d'alimentation minérale des plantes. Pour les prélèvements pour lame mince destinés à l'étude de l'interface sol-racine au M. E. B. ils préconisent une pré imprégnation *in situ* et une inclusion finale au laboratoire.

PEARSON et JACOBS (1985) pratiquent la méthode du lavage et du tri sur carottages de sol pour étudier l'enracinement de *Trifolium subterraneum* selon différentes densités de plantation. Les prélèvements sont effectués par des cylindres de 35 mm de diamètre, autour de la tige principale et entre deux plantes; ils sont découpés en sections de 10 cm de hauteur (fig. 18). La distribution des racines est décrite à partir de la mesure de leur longueur et de leur masse en fonction du temps à partir de l'émergence. La distribution spatiale est fonction de la profondeur sous la surface du sol et de la distance entre le point inter-plant et le plant.

TARDIEU et MANICHON (1986) s'intéressent plutôt à l'influence de la structure sur l'enracinement; ils proposent une méthode d'étude de la répartition horizontale et verticale des racines inspirée des méthodes cartographiques proposées par HENIN *et al.* (1969) et par BOHM (1976).

Lorsque l'objectif est de caractériser le système racinaire d'un peuplement et non d'un seul pied, il est nécessaire d'effectuer un échantillonnage dans la parcelle.



Effet de l'état structural de la couche labourée sur la répartition des racines en profondeur (TARDIEU et MANICHON, 1987).

Cartographie sur plan vertical d'une placette de type « O ».
 (a) Cartographie des impacts de racines.
 (b) Cartographie des états structuraux.

Mapping of a « O » sample volume.
 (a) Root mapping.
 (b) Soil structure mapping.

Fig. 19 : représentations du système racinaire: - en haut à G., représentation horizontale (ALFONSO LINARES C.A., 1987), - en haut. à D., cartographie (TARDIEU F. et al., 1987), - en bas, relation avec les éléments structuraux (TARDIEU F. et al., 1987).

Selon cette méthode, l'échantillonnage est stratifié sur une évaluation de l'état de croissance des pieds (hauteur et diamètre) et de la disposition spatiale de ceux-ci. On choisit des placettes aux pieds disposés régulièrement et à l'état de croissance régulier.

L'unité d'échantillonnage est un parallélépipède de hauteur égale à la profondeur maximale d'enracinement et dont la base, limitée latéralement par le milieu des inter-rangs, est la surface de sol sur laquelle sont situés deux pieds contigus (fig. 18).

La méthode consiste à repérer la position des impacts de racines sur des plans de ce volume: un plan vertical situé entre les deux plantes et des plans horizontaux situés pour le maïs à 17, 30, 60, 80 et 100 cm de profondeur. Chaque plan est observé à travers une grille à maille carrée de 2 cm de côté.

Une simple notation présence-absence d'impact est généralement suffisante pour les traitements de données effectués. On peut affiner en donnant une note de densité pour chaque case. Avant de passer à des analyses statistiques poussées, on peut traduire ces relevés par des cartes que l'on peut alors mettre en correspondance avec celles des états structuraux définis par la méthode de description du profil cultural de GAUTRONNEAU et MANICHON (1987).

Par rapport à d'autres méthodes le temps passé sur le terrain est ici supérieur: il faut à TARDIEU et MANICHON (1986) 7 heures pour relever les 5 plans horizontaux et le plan vertical mais l'exploitation directe à l'ordinateur est immédiate: on évite le travail long et fastidieux de lavage et de tri des racines des méthodes de prélèvement par carottage (BOHM, 1979, PEARSON *et al.*, 1985, ALFONSO-LINARES, 1987).

Si on se limite à l'observation du plan vertical le temps est réduit à 3 heures. Un autre avantage important est mis en avant par les auteurs: le calcul de la fonction de répartition des distances entre chaque point d'un plan horizontal étudié et la racine la plus proche met en évidence des zones de concentration racinaire et des zones non colonisées qui correspondent aux obstacles structuraux à la pénétration racinaire. Cette interprétation n'est pas possible avec les méthodes fondées sur le calcul d'une distance moyenne entre les racines qui repose sur une hypothèse de régularité de répartition des racines. Dans les conditions d'observation des auteurs, il est nécessaire d'effectuer de 4 à 16 répétitions pour obtenir une précision de 10% sur les observations.

Pour étudier l'enracinement du tabac, ALFONSO LINARES (1987), pratique la méthode du monolithe (monolithes de 20x20x10 cm obtenus par découpage dans un volume de 40x40x80 cm, fig. 18). Les racines sont triées par lavage et tamisage puis elles sont séchées à 60 °C et pesées. Dans un deuxième temps, il applique la méthode cartographique de TARDIEU (1984) et TARDIEU et MANICHON (1986). Les deux méthodes aboutissent aux mêmes conclusions.

V - L'ANALYSE DE LA POROSITE

Complémentaire de la description de la structure, la description de l'espace poral présente pour l'agronome les mêmes difficultés que celles de la structure. Les variables habituellement utilisées (masse volumique, porosité totale, indice des vides) quantifient le volume poral et contribuent, avec la connaissance des teneurs en eau, à établir le bilan des phases solide-liquide-gaz dans un matériau constitué par l'assemblage des particules constitutives du sol.

La mesure de la perméabilité à l'air, encore peu développée, permet cependant l'estimation d'une phase particulière de cette porosité: la macro porosité continue.

L'exploitation des courbes de rétention d'eau (courbes de pF) et de retrait permet d'aborder la répartition de l'espace poral de cet assemblage en micro et macro porosité pour estimer la distribution dimensionnelle des pores.

On voit bien que, dans une optique d'étude des effets du travail du sol, toute une partie de la porosité provoquée par ce travail n'est pas prise en compte par les méthodes de mesure précédentes.

Cette constatation a orienté les travaux menés par l'INRA à la station de Sciences du Sol d'Avignon avec pour objectif de séparer les deux facteurs de variation du volume poral:

- les facteurs anthropiques et climatiques d'une part (travail du sol, compactage, pluie)
- la constitution du sol et sa teneur en eau (texture, gonflement-retrait) d'autre part.

D'après STENGEL (1979) une première partition morphologique de l'espace poral a été définie par CHILDS (1969) sous les termes de "textural pore space" et de "structural pore space".

C'est en 1973 que MONNIER, STENGEL et FIES (1973) proposent une méthode permettant d'évaluer la porosité texturale d'échantillons de sols naturels et calculent la porosité structurale par la différence entre la porosité totale et la porosité texturale.

Nous ne présenterons ici que cette méthode car elle est directement liée à la description morphologique du profil cultural.

5.1 Les principes

Posés par STENGEL (1979) et MONNIER et STENGEL (1982), ils sont fondés sur l'hypothèse que le volume poral du sol est constitué de deux ensembles de pores d'origine différente: la porosité texturale et la porosité structurale.

- La porosité texturale: c'est le volume de pores ménagé par l'assemblage des particules constitutives du sol. Il dépend de la répartition relative de ces particules et de leur hydratation pour les matériaux gonflants.

- La porosité structurale: elle est définie par les pores qui délimitent les éléments structuraux observables à l'oeil ou sous un faible grossissement. Ils sont dus au travail du sol, au climat ou aux organismes vivants du sol.

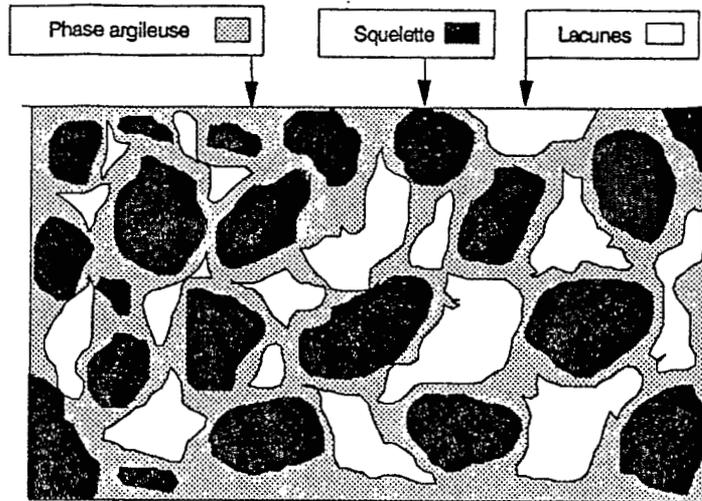
5.2 La méthode

Elle est basée sur la constatation que si, dans un volume de sol, on extrait par rupture des volumes décroissants, la porosité moyenne mesurée décroît jusqu'à atteindre une limite. Cette limite correspond à des agrégats continus dont la porosité est la porosité texturale. La porosité structurale est obtenue par différence avec la porosité totale.

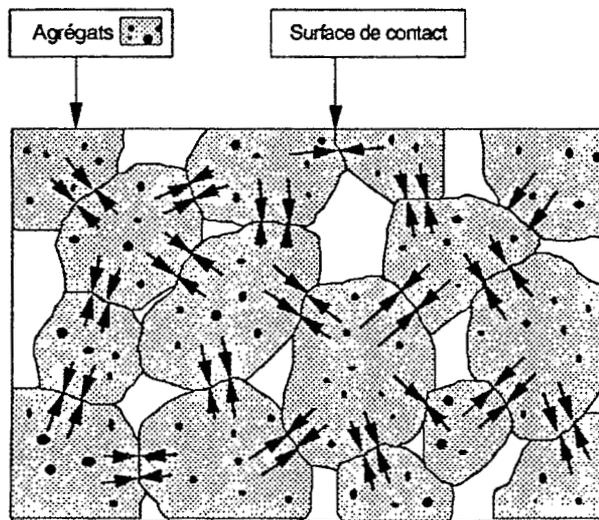
Cette méthode, praticable à différentes teneurs en eau, ne pose pas de problème avec des matériaux considérés comme rigides; par contre, en sol gonflant, il est nécessaire d'établir la courbe de retrait du sol pour connaître les variations de la porosité texturale en fonction de l'humidité.

5.3 exemples d'application

STENGEL (1990) montre l'utilité de ce concept dans l'analyse des systèmes de porosité appliquée à l'étude des actions mécaniques sur le sol. (fig. 20). Dans la gamme des pressions couramment appliquées au sol par les engins agricoles, il apparaît que la porosité texturale est très peu modifiée dans les sols à texture fine; par contre elle peut l'être sensiblement dans les sols sableux (BOIFFIN *et al.*, 1990).



Assemblage des constituants élémentaires, échelle texturale.



Organisation structurale

Fig. 20 : Porosité texturale et structurale (d'après STENGEL P. in DE LEON GONZALEZ, 1991).

Dans ses travaux relatifs au compactage ou à l'effet des pneumatiques GUERIF (1982) utilise l'indice des vides structuraux défini par $e_s = e_T - e_a$ (e : indice des vides = volume des vides / volume de solide avec e_T : indice des vides total, e_a : indice des vides des agrégats, équivalent à la porosité texturale) pour étudier l'influence de différents facteurs (teneur en eau, pression appliquée, teneur en matières organiques etc....) sur le compactage. De même pour déterminer la résistance en traction des agrégats terreux (GUERIF, 1988 a et b) celui-ci distingue deux niveaux d'organisation pour définir la résistance mécanique, un niveau textural à l'échelle de l'assemblage des constituants granulométriques et un niveau structural ou global qui dépend des propriétés de l'assemblage (GUERIF, 1990).

DE LEON GONZALEZ (1991) adopte également cette partition de la porosité totale pour étudier les changements induits dans l'espace poral par l'application de contraintes entraînant des déformations mécaniques du sol. Il utilise la porosité structurale exprimée en indice des vides structuraux comme variable quantitative traduisant un état de compacité et examine les conséquences sur la morphologie des massifs compactés en utilisant une classification morphologique adaptée de celle établie par GAUTRONNEAU et MANICHON (1987).

Etudiant les modifications de l'état du sol au cours du labour, COULOMB, (1991) s'intéresse à la fois aux éléments structuraux qu'elle analyse par la description du profil cultural et la classification morphologique qui lui est associée (MANICHON, 1982; GAUTRONNEAU et MANICHON 1987) et par l'analyse de la porosité.

Cependant si elle base son analyse de la porosité sur la partition porosité texturale-porosité structurale, elle le fait dans le cadre de la stratification morphologique des éléments constitutifs d'une bande de labour et caractérise l'espace poral total par des mesures de densité. Avant labour, elle mesure la densité apparente du sol à l'aide d'une sonde gamma LPC-INRA sur la couche 0-35 cm divisée en 7 tranches. Après labour, la surface du sol très irrégulière ne permet plus d'utiliser cette sonde. COULOMB (1991) évalue alors la densité globale à partir du volume de chaque bande de labour et de la masse de terre travaillée. Le volume est calculé d'après la surface occupée par la bande de labour sur les photos effectuées pour caractériser l'état structural. La surface est définie par le tracé successif des tangentes aux éléments structuraux situés en contact avec l'air extérieur qui n'ont pas d'autre point de contact avec la section travaillée (fig. 9). La masse est fonction de la largeur, de la profondeur de travail et de la densité du sol avant labour. Connaissant les densités texturales des mottes elle obtient une estimation de l'indice des vides structural, total, interne aux mottes, et entre mottes.

5.4 Conclusion

Cette partition de la porosité globale du sol en porosité texturale et structurale constitue incontestablement un apport important en physique du sol. Contrairement à l'étude de la porosité globale elle permet une première interprétation des comportements du sol liés à la phase solide.

Elle est bien adaptée à l'expression des relations entre intensité des sollicitations (charges et pressions appliquées) et déformation résultante et à l'étude des effets du travail du sol.

Son inconvénient est de ne pas prendre en compte la morphologie de l'espace poral et, appliquée à l'étude *in situ* des effets du travail du sol, de poser le problème de l'échantillonnage dans sa prise en compte de la variabilité spatiale (COULOMB, 1991). Ce dernier inconvénient semble toutefois pouvoir être contourné en liant l'analyse de la porosité à celle de la description du profil cultural.

VI - CONCLUSION GENERALE

Cet aperçu partiel des techniques d'étude du profil cultural montre la grande variété des domaines concernés et la diversité des approches qui traduisent la complexité du sujet et l'absence de méthode faisant autorité.

L'étude du profil cultural revient en fait à caractériser la structure du sol et la porosité et à traduire leur évolution sous l'effet des outils et du climat.

La première approche proposée par HENIN *et al.* (1960) était essentiellement fondée sur le repérage de symptômes défavorables aux cultures afin d'effectuer un diagnostic et de suggérer les corrections à apporter: c'est la naissance du concept de "profil cultural". Les critères de description employés correspondent à cet objectif et, à la description de l'état physique du sol (épaisseur des couches, structure), sont juxtaposés des indicateurs de fonctionnement du milieu poreux (racines, hydromorphie). Les mesures annexes proposées doivent contribuer à la quantification des indicateurs. Cependant, la caractérisation des éléments structuraux par assimilation à des formes géométriques régulières telles qu'on les décrit en pédologie, n'est pas adaptée à la description des formes observées dans les couches travaillées.

C'est pour étudier l'influence des systèmes de culture sur le profil cultural que MANICHON (1982a) élabore une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Cette méthode établit une partition horizontale et verticale du volume de sol selon des critères définis par les actions anthropiques (couches travaillées, passage des roues) et ne décrit plus la structure d'après la forme des éléments mais selon deux niveaux d'observation: l'état interne des mottes et leur mode d'assemblage. Cette méthode permet la cartographie de la coupe de sol observée. Bien que longue et demandant une certaine expérience, elle donne de bons résultats pour l'étude des effets des techniques culturales (PAPY, 1987) ou pour l'analyse des relations état structural - enracinement (TARDIEU, 1987).

Cette méthode a l'avantage de fournir des critères de stratification pour les observations et de décrire l'organisation spatiale des éléments structuraux. Cependant, à ce stade de l'évolution des méthodes de description du profil cultural il reste toujours difficile de relier les observations morphologiques à des mesures quantitatives nécessaires pour juger de l'effet des pratiques culturales sur le sol.

Ce besoin de quantifier l'évolution des critères susceptibles d'être modifiés par le labour est abordé par l'analyse d'image, qui permet l'analyse des unités morphologiques ou des vides, et par l'analyse de la porosité.

COULOMB (1991) photographie la face observée du profil cultural, analyse les photographies au laboratoire pour délimiter les contours des unités morphologiques puis les digitalise pour effectuer le traitement numérique des images ainsi obtenues. D'autres chercheurs, généralement anglo-saxons, préfèrent la digitalisation de blocs plus ou moins importants. Ces blocs sont le plus souvent imprégnés *in situ* par des résines colorées ou sensibles aux U.V et, après traitement approprié, leur image digitalisée est traitée pour étudier la porosité ou la morphologie structurale.

Complémentaire de la description de la structure pratiquée dans l'approche morphologique de la description du profil cultural, celle de la porosité a fait l'objet d'une analyse proposée par STENGEL (1979) et MONNIER et STENGEL (1982).

Tout comme MANICHON (1982b) pour la structure, les auteurs se sont attachés à séparer l'influence des facteurs anthropiques et des facteurs inhérents à la constitution du sol sur les variations de porosité. Ceci les a amenés à différencier la porosité texturale, due à l'assemblage des particules élémentaires constitutives du sol, de la porosité structurale due au travail du sol et aux facteurs climatiques. Cette analyse de la porosité est bien adaptée à la mesure des déformations résultant des contraintes physiques appliquées au sol (compactage, effet des pneumatiques) qui, en sols non sableux, affecte uniquement la porosité structurale, mais elle ne renseigne pas sur la morphologie de l'espace poral.

On perçoit ici que l'utilisation combinée de la description morphologique du profil cultural et de l'analyse de la porosité permet d'étudier l'effet des techniques sur la structure du sol. Une utilisation simplifiée de la description morphologique du profil cultural, associée à l'analyse d'images prises sur blocs imprégnés aux résines fluorescentes ou directement *in situ*, devrait également permettre de mesurer les transformations des éléments structuraux et de l'espace poral des couches travaillées du sol.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON S. H., PEYTON R.L., WIGGER J.W., GANTZER C. J., (1992):
Influence of aggregate size on solute transport as measured using
Computed Tomography. *Geoderma*, 53,387-398.
- ANDERSON S.H., PEYTON R.L., GANTZER C.J., (1990):
Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray
Computed Tomography. *Geoderma*, 460,13-29.
- BILLOT J. F., (1982):
Les applications agronomiques de la pénétrométrie à l'étude de la
structure des sols travaillés. *Sciences du sol*, n° 3, 187-202.
- BLIC Ph. de, (1987):
Analyse of a cultivation profile under sugarcane: methodology and
results. In "Land development and management of acid soils in
Africa", IBSRAM proceedings n° 7, 275-285, Bangkok.
- BLIC Ph. de, (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, 385-399, Bangkok.
- BLIC Ph. de, (1993):
L'organisation macrostructurale du sol: intérêt et limites d'une
approche morphologique, méthode d'étude. 1^{er} colloque AOCASS, 6-
10/12/1993, Ouagadougou.
- BLONDEL D., (1964):
Etude de l'évolution du profil cultural sous une rotation
quadriennale et de l'influence du travail du sol sur les cultures.
CRA Bambey, 43 p.
- BOHM W., (1976):
in situ estimation of root length at natural soil profiles. *J. Agric.
Sci. Camb.*, 69, 415-418.
- BOHM W., (1979):
Methods of studying root systems. Springer Verlag, Berlin-
Heidelberg, 188 p.
- BOHM W., MADUAKOR H., TAYLOR H.M., (1977):
Comparison of five methods for characterising soybean rooting
density and development. *Agron. J.*, 69, 415-419.

- BOIFFIN J., GUERIF J., STENGEL P., (1990):
Les processus d'évolution de l'état structural du sol: Quelques exemples d'études expérimentales récentes. In "La structure du sol et son évolution", Laon, France, 9/1/90, Les colloques de l'INRA n°23, Ed. INRA, Paris, 216 p.
- BOULAIN J., (1988):
Histoire des Pédologues et de la Science des sols, INRA, 285 p.
- BOUMA J., (1990):
Using morphometric expressions for macropores to improve soil physical analysis of field soils. *Geoderma*, 46, 3-11.
- BURCH G.J., MASON I.B., FISCHER R.A. MOORE I.D., (1986):
Tillage effect on soils: Physical and hydrolic responses to direct drilling at Lockhart N.S.W. . *Aust. J. Soil Res.*, 24, 377-391.
- CASSEL D.K., NELSON L.A., (1985):
Spatial and temporal variability of soil physical properties of Norfolk loamy sand as affected by tillage. *Soil and tillage Res.*, 5, 5-17.
- CHARPENTEAU J.L., HUTTER W., RELIER J.P., (1988):
Etude du système de notations au labour sur un dispositif avec rotations. *Agonomie*, 1, (2), 127-138.
- CHARREAU C., NICOU R., (1971):
L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *Bull. agro. n° 23*, IRAT, Paris, 254 p.
- CHILDS E.C., (1969):
An introduction to the physical basis of soil water phenomena. John Wiley and sons, 92-96.
- COLLEUILLE H., (1993):
Approches physique et morphologique de la dynamique structurale des sols. Application à l'étude de deux séquences pédologiques tropicales. Thèse Univ. Paris VI, 353p.
- COSTER M., CHERMANT J.L., (1989):
Précis d'analyse d'images CNRS Plus, 545 p., CNRS Paris.
- COULOMB I., (1991);
Analyse quantitative du comportement du sols au labour, rôle de l'état structural initial. Thèse INA PG, Paris, 230 p + annexe 73 p.

- COULOMB I., CANEILL J., MANICHON H., (1993a):
Comportement du sol au labour: méthode d'analyse et évaluation des conséquences de l'état initial du sol sur l'état transformé par le labour. *Agronomie*, 13, 45-56.
- COULOMB I., CANEILL J., MANICHON H., (1993b):
Comportement du sol au labour: évolution de l'état structural du sol au cours du labour. *Agronomie*, 13, 457-465.
- DE LEON GONZALEZ F., (1991):
Morphologie, propriétés physiques et conditions de formation des éléments structuraux de la couche labourée: contribution à l'interprétation du profil cultural. Thèse, INA-PG, Paris, 133 p + annexes.
- DEMOLON A., (1946):
L'évolution scientifique et l'agriculture française. Flammarion, 329 p.
- DEMOLON A., HENIN S., ():
Place des facteurs physiques dans le syndrome caractérisant un sol au point de vue de sa capacité de production. *CR Ac. des Sc.*, T. 238, 1635-1638.
- DEMOLON A., LEROUX D., (1952):
Guide pour l'étude expérimentale du sol. Gauthier-Villars, 251 p.
- DEXTER A. R., (1978):
A stochastic model for the growth of roots in tilled soil. *J. Soil Sc.*, 29, 102-116.
- DEXTER A.R., (1976):
Internal structure of tilled soil. *Journal of Soil science*, vol. 27, 267-278.
- DEXTER A.R., (1988):
Advances in characterisation of soil structure. *Soil Tillage Research*, 11, 199-238.
- FIES J.C., ZIMMER D., (1982):
Etude expérimentale de modifications de l'assemblage textural d'un matériau sablo-argileux sous l'effet de pressions. *Bulletin du G.F.H.N.*, 12, 39-54.
- FOLORUNSO O.A., PUENTE C.E., ROLSTON D.E., PINZON J.E., (1994):
Statistical and fractal evaluation of the spatial characteristics of soil surface strength. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol 53, 58, 284-294.

- FRITTON D.D., (1990):
A standard for interpreting soil penetrometer measurements. Soil Science, vol. 150, n°2, 542-551.
- GAUTRONNEAU Y., MANICHON H., (1987):
Guide méthodique du profil cultural. CEREF GEARA, 69 p.
- GUERIF J., (1988a):
Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux: revue bibliographique et mise au point technique. Agronomie, 8, (4), 281-288.
- GUERIF J., (1988b):
Résistance en traction des agrégats terreux: influence de la texture, de la matière organique et de la teneur en eau. Agronomie, 8, (5), 379-386.
- GUERIF J., (1982):
Compactage d'un massif d'agrégats: effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. Agronomie, 2, (3), 287-294.
- HADAS A., LARSON W.E., ALLMARAS R.R., (1988):
Advances in modelling machine - soil - plant interactions. Soil Tillage Res., 11, 349-372.
- HADAS A., WOLF D., RAWITZ E., (1986):
Prediction of draft requirement - soil compaction relations in tilling moist soils. Soil Tillage Res., 8, 51-64.
- HENDERSON C., (1989):
Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform sandy soils. Aust. J. Soil Res., 40, 497-508.
- HENDERSON C., LEVETT A., LISLE D., (1988):
The effect of soil water content and bulk density on the compactibility and soil. Penetration Resistance of some Western Australian sandy soils. Aust. J. Soil Res., 26, 391-400.
- HENIN S., (1976):
Cours de physique du sol. 2 tomes. Editest-ORSTOM.
- HENIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., (1960 et 1969):
Le profil cultural. Principes de physique du sol. Société d'Édition des Ingénieurs Agricoles, Paris (1960).
Le profil cultural. Principes de physique du sol. 2^{ème} édition (1969), Masson et Cie, 332p.

HINSINGER P., METTAUER H., (1989):

De l'application de la perméabilité à l'air des sols en agronomie. 1
Notion de perméabilité à l'air: Théorie et méthodologie, mise au
point bibliographique. Agronomie, 9, 3-12.

HUTTER W., BOISGONTIER D., LACAZE Ch., CHABBERT M., GRILLIERES S.,
(1981):

Itinéraire du travail du sol comme révélateur du comportement du
sol dans un dispositif expérimental de longue durée avec rotations.
Agronomie, 1 (1), 49-57.

JORGE J.A., MANSELL R.S., RHOADS F.M., BLOOM S.A., HAMMOND L.C.,
(1992):

Compaction of a fallow sandy loam soil by tractors tyres. Soil
Science, vol 153, n°4, 322-330.

LIEBIG M.A., JONES A.J., MIELKE L.N., DORAN J.W., (1993):

Controlled wheel traffic effect on soil properties in Ridge Tillage.
Soil Sc. Soc. Am. J., 57, 1061-1066.

MAERTENS C., (1964):

Influence des propriétés physiques des sols sur le développement
radiculaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée
des cultures. Sciences du sol, n° 2.

MANICHON H., (1982a):

Influence des systèmes de culture sur le profil cultural:
élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation
morphologique. Thèse Doc. Ing. INA-PG, 214 p + annexes.

MANICHON H., (1982b):

L'action des outils sur le sol: appréciation de leurs effets par la
méthode du profil cultural. Sciences du Sol, n°3, 203-219.

MANICHON H., (1987):

Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence
d'effets de compactage des horizons travaillés 39-52. In "Soil
Compaction and Regeneration", G. Monnier, M.J. Goss, Edit., A.A.
BALKEMA, Rotterdam, 167 p.

MARSILI A., SERVADIO P., (1992):

Tests of agricultural soil compaction using two different types of
tyres. Revista di Ingegneria Agraria, Rome, 23, (4), 193-199.

McBRATNEY A.B., MORAN C.J., (1990):

A rapid method of analysis for soil macropore structure II: a
stereological model, statistical analysis and interpretation. Soil
Sci. Soc. Am. J., 54, 509-515.

- McBRATNEY A.B., MORAN C.J., STEWART J. B., CATTLE S.R., KOPPI A.J., (1992):
Modification of a method of rapid assessment of soil macropore structure by image analysis. *Geoderma*, 53, 255-274.
- METTAUER H., HINSINGER P., (1989):
De l'application de la perméabilité à l'air des sols en agronomie: 2 Intérêt de la perméabilité à l'air pour la caractérisation de la structure du sol et des modalités d'enracinement. *Agronomie*, 9, 143-150.
- MONNIER G., STENGEL P., (1982):
Structure et état physique du sol. *Encyclopédie Tech. Agric.*, Ed. Techniques, Paris, 1140-1141.
- MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C., (1973):
Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agr.*, 24, (5), 533-545.
- MORAN C.J., McBRATNEY A.B., (1992a):
Acquisition and analysis three-component digital images of soil pore structure. I: Method. *J. Soil Sci.*, 43, 541-549.
- MORAN C.J., McBRATNEY A.B., (1992b):
Acquisition and analysis three-component digital images of soil pore structure. II: Application to seed beds in a fallow management trial. *J. Soil Sci.*, 43, 551-566.
- MORAN J. C., McBRATNEY A.B., KOPPI A.J., (1989):
A rapid method for analysis of soil macropore structure. 1 specimen preparation and digital binary image production. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 53, 921-928.
- MURPHY C. P., BULLOCK P., BISWELL K. J., (1977):
The measurement and characterisation of voids in soil thin sections by image analysis. Part 2: applications. *Journal of Soil Science*, 28,509-518.
- MURPHY C. P., BULLOCK P., TURNER R. H., (1977):
The measurement and characterisation of voids in soil thin sections by image analysis. Part 1: principles and techniques. *Journal of Soil Science*, 28,498-508.
- NESMITH D.S., RADCLIFFE D.E., HARGROVE W.L., CLARK R.L., TOLLNER E.W., (1987):
Soil compaction in double-cropped wheat and soybeans on an Ultisol. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, vol 51, 183-186.

OLSEN H.J., (1992):

Sensing of aggregate size by means of a horizontal mini penetrometer. *Soil and Tillage Res.*, 24 (1) 79-94.

ORSTOM, (1973):

Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols. Comité Technique de Pédologie, n°2, ORSTOM Paris, 108 p.

PAPY F., (1986):

Effet de l'état structural d'une couche labourée sur sa rétention en eau. *Agronomie*, 6 (6), 555-565.

PAPY F., (1987):

Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural. *Agronomie*, 7, (2), 111-121.

PAPY F., (1988):

Effet de l'état physique initial d'une couche labourée sur son comportement hydrique et structural. 153-168. In " Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère" (CR de l'ATP "eau"), R. CALVET Ed., INRA, 362 p.

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", les colloques de l'INRA, n° 23, 157-186.

PEARSON C.J., JACOBS B.C., (1985):

Root distribution in space and time in *trifolium subterraneum*. *Austr. J. Agric. Res.*, 36, 601-614.

PELLERIN S., (1986):

Effet de la date de labour sur l'état structural de l'horizon labouré dans les sols argileux gonflants du marais poitevin. *Agronomie*, 6, (7), 683-692.

PEYTON R.L., ANDERSON S.H., GANZER C. J., (1991):

Measurement of soil structure, water movement and solute transport using Computer Tomography. Tech. Rep. to US Geol. Survey. Reston, V.A. Grant 14-08-0001-G1643, 76 p.

PEYTON R.L., HAEFFHER B.A., ANDERSON S.H., GANTZER C.J., (1992):

Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores. *Geoderma*, 53, 329-340.

- PHOGAT V. K., AYLMOORE L. A. G., (1989):
Evaluation of soil structure by using Computer Assisted Tomography. *Aust. J. of Soil Science*, 27,313-323.
- POULAIN J. F., (1960):
Observation sur certaines caractéristiques des sols ferrugineux tropicaux (sol Dior). Les principaux facteurs de leur fertilité. Rapport de stage, ORSTOM, 2T., 175p.
- RINGVOASE-VOASE A.J., (1987):
A scheme of the quantitative description of soil macrostructure by image analysis. *Journal of Soil Science*, 38,343-356.
- RINGVOASE-VOASE A.J., BULLOCK P., (1984):
The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *Journal of Soil Science*, 35,673-684.
- ROGER-ESTRADE J., (1994):
Influence des caractéristiques géométriques des outils et de la répartition spatiale des compactages sur l'état du profil cultural, proposition pour un modèle. Thèse INA-PG, Paris.
- ROLSTON D.E., BEDAIWY M.N.A., LOUIE D.T., (1991):
Micropenetrometer for in situ measurement of soil surface strength. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 55,481-485.
- ROSEBERG R.J., McCOY E.L., (1992):
Tillage and traffic indice changes in macroporosity and macropore continuity: air permeability assessment. *Soil Sc. Soc. Am; J.*, 56 (4), 1261-1267.
- RUSSEL E. N., (1971):
Soil Structure: its maintenance and improvement. *J. Soil Sc.*, 22-137.
- STENGEL P., (1979):
Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30, (1), 27-51.
- STENGEL P., (1990):
Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. in "La structure du sol et son évolution" Laon, 9/1/1990, les colloques de l'INRA n°53, INRA Paris, 216 p.

STOLF R., (1992):

Theory and test of formulas for transforming impact penetrometer data in soil resistance. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 15 (3), 229-235.

TARDIEU F., (1987):

Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. 3: disponibilité des réserves en eau du sol. *Agronomie*, 7, (4), 279-288.

TARDIEU F., MANICHON H., (1987a):

Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. 1: modélisation d'états structuraux-types de la couche labourée. *Agronomie*, 7, (2), 123-131.

TARDIEU F., MANICHON H., (1987b):

Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. 2: croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie*, 7 (3), 201-211.

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.

TOURTE R., CHARREAU C., NICOU R., POULAIN J.F., (1968):

Le rôle des facteurs mécaniques (travail du sol) dans la création et l'amélioration du profil cultural en zone tropicale sèche; incidence sur la production agricole. Colloque "fertilité des sols tropicaux", Tananarive, 19-25 nov. 1967, IRAT Paris, T2 1547-1569.

VALENTIN C., (1988):

Dégradation du profil cultural: croûtes superficielles, érosion et semelle de labour. First training workshop on site selection and characterization, Ibadan, 22/2/1988. Technical notes IBSRAM, 233-264.

WARNER G. S., NIEBER J.L., MOORE I. D., GEISE R. A., (1989):

Characterizing macropores in soil by Computed Tomography. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 53,653-660.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Fiche d'examen du profil cultural
- Figure 2 : Fiche de notation au labour
- Figure 3 : Partition du profil cultural
- Figure 4 : L'état interne des mottes
- Figure 5 : Modes d'assemblage des mottes
- Figure 6 : Fiche d'observation du profil cultural et exemple de cartographie
- Figure 7 : Typologie des mottes
- Figure 8 : Typologie des massifs compactés
- Figure 9 : Dispositif photographique et contour de la bande de labour
- Figure 10 : Définition de l'angle d'incidence
- Figure 11 : Infiltromètre à résine
- Figure 12 : Chaîne de traitement par analyse d'image
- Figure 13 : Images de blocs polis
- Figure 14 : Pénétrromètre dynamique
- Figure 15 : Présentation des mesures pénétrométriques
- Figure 16 : Cartographie automatique de RP
- Figure 17 : Pénétrrométrie et rendement
- Figure 18 : Les méthodes d'étude des racines
- Figure 19 : Représentations du système racinaire
- Figure 20 : Porosité texturale et structurale

ANNEXE

Formulation des résines

1) D'après MORAN C.J., McBRATNEY A.B., KOPPI A.J., (1989)

La résine utilisée pour l'infiltration au champ est un mélange d'époxy (références CIBA-GEIGY Australie):

- la viscosité désirée est obtenue par l'addition en proportions égales d'un diluant (CIBA-GEIGY Dy 026) et d'une base (CIBA-GEIGY LC 191).
- Le durcisseur est utilisé à 570 g par kg de diluant si la base n'est pas utilisée et à 330 g par kg de base si le diluant n'est pas utilisé. Les concentrations peuvent varier selon la vitesse d'infiltration dans le sol. Les auteurs utilisent un mélange à 50/50 de base et de diluant. Ce mélange est sous forme de gel en 3 à 4 heures et solide en 24 heures.
- Une teinture fluorescente est ajoutée au mélange (CIBA GEIGY Oracet Yellow, 8GF, à 0,1% du mélange total).
- Une résine opaque assure que la détection de la fluorescence et par conséquent la contribution aux niveaux de gris, est limitée à la surface examinée. Le mélange utilisé est le suivant: LC 191, 170 g; DY 026, 170 g; LC 249,160 g; DWO 131, 5 g et Oracet yellow 8GF 0,5 g.
- Pour éviter la surchauffe due à la nature exothermique de la réaction lors du mélange, le plus simple est de refroidir la résine avant l'addition du durcisseur.

2) D'après MORAN C.J., McBRATNEY A.B., (1992)

- L'imprégnation au champ pour la méthode deux composants est faite par le mélange suivant: résine base LC 191, 170 g; diluant DY 026 170 g; durcisseur LC 249 160 g; pigment blanc DWO 131, 5 g et pigment fluorescent sous UV Oracet yellow 8GF 0,5 g.
- Dans la méthode trois composants, l'imprégnation au champ est la même que ci-dessus, l'imprégnation est complétée au laboratoire en utilisant une teinture fluorescente aux UV différente. Deux à trois gouttes de SANCOL sont utilisées au lieu de l'Oracet yellow.

3) D'après MORAN C.J., McBRATNEY A.B., *et al.* (1992)

- Le tableau ci-dessous donne la formulation pour l'infiltration au champ et l'imprégnation au laboratoire: