

L'action des outils sur le sol :

Appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural

Hubert MANICHON

Chaire d'Agronomie
Institut national agronomique Paris-Grignon
16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris Cedex 05

SOMMAIRE

L'étude des interactions Sol-Outils intéresse de nombreuses disciplines ; c'est le point de vue l'Agronome qui est présenté ici. Il s'agit, pour celui-ci, de définir les états du sol souhaitables pour la plante, ainsi que les moyens de les obtenir.

On illustre, dans cette note, les apports du concept de profil cultural pour :

- caractériser, dans cette optique, l'état du sol, à l'échelle du peuplement végétal ;*
- élaborer des diagnostics et des références sur les relations Sol-Outils.*

L'étude du comportement du sol — c'est-à-dire de ses changements d'état — sous l'action des outils suppose de savoir appréhender et mettre en relation plusieurs groupes de variables. Le premier définit l'outil lui-même et caractérise sa construction, à l'aide de données géométriques (DALLEINE, 1977-1980) qui ne sont pas toujours aisées à choisir (cas de la forme des versoirs - FAURE, 1969). Le second concerne son déplacement et met en cause l'interface Sol-Outil et, au champ, la cellule motrice. Pour le dernier — le sol — tout dépend du point de vue auquel on se place :

— **Le mécanicien**, pour concevoir une machine de travail du sol ou comparer les performances mécaniques de plusieurs outils, s'intéresse principalement à la mesure de l'**effort de traction** nécessaire pour déplacer l'engin. Il étudie ses variations selon la forme des pièces, leur vitesse de déplacement, leur profondeur d'action... Ces études sont parfois menées au champ (BINESSE, 1970 ; SPOOR, GODWIN, 1978), mais le plus souvent, pour l'essentiel, en bacs de terre (PAYNE, 1966 ; GODWIN, SPOOR, 1977 ; STAFFORD, 1979). Les modèles de comportement proposés sont établis dans une gamme restreinte d'états du sol (voire sur des matériaux artificiels - PERUMPRAL, DESAI, 1979). Les pièces travaillantes sont de formes simples, elles sont étudiées individuellement (et non en association).

Par ces simplifications, par rapport à la réalité de la relation Outil-Sol, on vise à se placer dans les conditions d'utilisation des lois classiques de la mécanique du sol (continuité et isotropie de la terre). L'état initial du sol est alors défini (GILL, VANDENBERG, 1977 ; COOPER, 1971) par les paramètres de l'équation de rupture des sols de COULOMB (cohésion, angle de frottement interne) en leur associant parfois la densité. On ne s'intéresse, en fait, à l'état transformé qu'en tant que ses caractéristiques sont différentes et que l'on mesure ainsi l'efficacité du travail de l'outil.

— **Pour l'agronome**, le sol n'est plus seulement support des engins ou générateur d'efforts résistants et siège de déformations. Il s'agit :

- **de porter un jugement de valeur sur son état, dans ses relations avec le peuplement végétal** : la caractérisation du sol doit pouvoir être utilisée dans une démarche de diagnostic sur les relations Plante-Milieu et de pronostic sur les relations Climat-Sol, elle en constitue donc un élément essentiel ;
- **d'utiliser ce jugement pour juger à leur tour les itinéraires techniques** (SEBILLOTTE, 1978) **et les systèmes de culture** : l'état du sol est alors l'un des révélateurs de leurs effets sur le milieu.

Dans ce point de vue, l'étude des relations Sol-Outil est donc finalisée par celle des réactions du peuplement végétal au milieu. On en déduit immédiatement des conséquences pour la caractérisation du sol :

- Elle doit se faire à l'échelle de la parcelle cultivée (ou d'une fraction homogène), définie par son système de culture et son milieu physique ;
- Elle doit privilégier l'appréciation de la porosité : ce paramètre physique est essentiel pour rendre compte de l'implantation et du fonctionnement des racines, de la circulation des fluides, et des variations des propriétés mécaniques de la terre (WIERSUM, 1957 ; MAERTENS, 1964 ; BARLEY, GREACEN, 1967 ; BLANCHET et al., 1974).

Les points de vue du mécanicien et de l'agronome, tels que nous les avons schématisés, paraissent donc assez éloignés : le premier vise à analyser les modes d'action des pièces travaillantes, le second doit juger les états transformés en référence à un **objectif** qui dépend de la plante et du climat (MANICHON, 1980).

Il est clair qu'une synthèse entre ces points de vue, complémentaires, serait souhaitable. Comme elle n'existe pas dans l'état actuel, l'agronome est obligé de prendre en charge certains aspects de la relation Sol-Outil. Avant d'en donner quelques exemples, nous devons préciser les méthodes utilisées pour caractériser dans cette optique, l'état du sol.

I. — CARACTERISATION DE L'ETAT PHYSIQUE DU SOL AU CHAMP.

● Au plan physique, le sol est un système poreux. Ce caractère résulte de l'organisation de ses constituants solides à différents niveaux. On distingue (MONNIER, STENGEL, 1982) :

- Un niveau textural, fortement lié à la constitution du matériau ;
- Un niveau structural, beaucoup plus contingent.

Seul ce dernier retiendra notre attention ici. Il est défini (HENIN, 1976) par « la manière dont sont assemblés les divers constituants du sol... (et) par les conséquences de (cet) assemblage (porosité et ameublissement) ». A cette définition correspondent donc deux types de caractérisation :

- L'un consiste à effectuer une description morphologique de l'état structural ;
- L'autre consiste à mesurer des grandeurs physiques (porosité, résistance pénétrométrique, par exemple).

● S'agissant d'études **au champ**, et pour atteindre les objectifs que nous avons retenus pour l'agronome, plusieurs raisons militent en faveur d'une démarche comportant une approche descriptive. Nous en retiendrons deux principales :

— La nécessité, pour pouvoir comprendre le déterminisme d'un état donné, de **distinguer** les effets des différents facteurs (naturels ou anthropiques) qui, combinés, ont été à l'origine de celui-ci. Ces facteurs se manifestent souvent par l'apparition de traits morphologiques aisément identifiables, mais ne correspondent pas, pour autant, à des valeurs déterminées de paramètres physiques mesurables, ou à des gammes de variation disjointes de ceux-ci.

— La très grande anisotropie des couches travaillées du sol, qui oblige à multiplier les sites de mesure. Cette anisotropie existe dans le sens vertical (distinction entre horizons travaillés et couches sous-jacentes), mais aussi au sein d'un même horizon (tassements localisés par les roues des engins, bandes de labour...). Elle est donc très variable selon l'itinéraire technique utilisé dans la parcelle, sa caractérisation **en tant que telle** est un élément déterminant pour l'étude de la relation Pratiques culturales-Etat du sol.

On est donc incité à effectuer une schématisation de l'état du sol, à décrire le « profil cultural » (HENIN *et al.*, 1969). La réalisation de ces mesures physiques gagne souvent en pertinence lorsque la schématisation ainsi opérée est utilisée comme base d'échantillonnage.

La description d'un profil cultural peut prendre diverses formes, selon qu'elle est systématique ou se base sur des indicateurs, selon aussi le volume auquel on la rapporte. Nous distinguerons trois attitudes principales.

1. LE RELEVÉ DE SYMPTÔMES DITS « DEFAVORABLES ».

Il ne s'agit pas d'une description complète du profil cultural, mais du seul relevé de la présence de symptômes tels que : croûtes de battance, lissages créés par les pièces travaillantes des outils, « semelles » compactées, ou bien pseudo-gleys, bouchons de pailles... L'expérience a montré qu'ils étaient de bons indicateurs de certains traits de comportement du sol ou de la végétation (DALLEINE *et al.*, 1971 ; DALLEINE, 1977, 1980 ; BOIFFIN, MANICHON, 1976 ; CANEILL, MANICHON, 1982), parce qu'ils correspondent à des conditions fortement limitantes.

Cet aspect a fait le succès de la méthode auprès des praticiens et des techniciens agricoles, par sa valeur pédagogique. Son intérêt pour rendre compte de réactions morphologiques nettes de certains enracinements en liaison avec leur rendement a été vérifié lors d'enquêtes, entre autres sur betteraves (GRAS *et al.*, 1971 ; REMY, MARIN-LAFLECHE, 1974 ; METTAUER *et al.*, 1978, par exemple).

Mais ce mode de description, qui conserve toute sa valeur pour les tournées exploratoires d'un observateur averti, peut se révéler insuffisant. Ne serait-ce que parce que l'évolution de certains matériels de travail du sol a rendu moins fréquente qu'il y a quelques dizaines d'années la création d'accidents structuraux alors fort répandus. Le cas de la charrue est assez typique : l'accroissement du nombre de ses corps diminue la surface directement tassée, à chaque passage, par les roues du tracteur circulant en fond de raie ; ainsi les semelles de labour généralisées sont moins fréquentes. Elles sont remplacées par des tassements parfois plus intenses, mais **discontinus** plus difficiles à mettre en évidence, et dont il faudrait quantifier la répartition spatiale. Leur effet, tant sur la circulation des fluides que sur les racines, est plus délicat à évaluer.

2. L'HORIZON PRIS COMME UNITE DE DESCRIPTION.

Agissant ainsi, on considère que les facteurs principaux du déterminisme de l'état structural varient dans le seul sens vertical. Cette démarche est très proche, dans son principe, de celle de description des profils pédologiques.

Décrire et qualifier l'état structural d'horizons travaillés, même lorsqu'ils peuvent être considérés comme homogènes, pose cependant des problèmes particuliers. En effet,

les dénominations structurales utilisées en Pédologie (NIKIFOROFF, 1941 ; BRYSSINE, 1954 ; Glossaire de Pédologie, 1969 ; HODGSON, 1974 — et reprises pour partie par HENIN et al., 1969 —) ont pour objectif essentiel de rendre compte des interactions Climat-Propriétés texturales ; elles privilégient alors, à juste titre, des critères tels que la forme et la dimension des éléments structuraux, révélateurs des processus de structuration liés aux agents naturels. S'agissant de couches récemment travaillées, leur utilisation est malaisée du fait des perturbations créées par les outils à ces arrangements. De plus, on aboutit à des descriptions beaucoup trop imprécises, **lorsque l'on étudie une gamme de variation d'états structuraux au sein d'un même milieu physique** : la comparaison des situations repose finalement encore, de fait, sur les critères de présence d'accidents structuraux typiques que nous avons évoqués ci-dessus. Il faut donc remplacer les descriptions d'inspiration pédologique par d'autres qui, moins distantes des facteurs de différenciations étudiés, permettront des classifications plus précises.

Il s'agira, par exemple (cf. § II-1), du degré de fragmentation des bandes de labour et de la porosité des mottes.

3. LA PRISE EN COMPTE DE LA VARIABILITE INTRA-HORIZON.

Une étape supplémentaire est franchie dans le sens d'un accroissement de la précision de la description et de son objectivité lorsque l'on s'attache, non pas à caractériser chaque horizon par un qualificatif structural « moyen », mais à prendre en compte en tant que telle la variabilité d'état qui y existe. En effet, la simple stratification verticale en horizons que nous venons d'envisager n'est suffisante que si les itinéraires techniques n'ont pas engendré de différenciation notable en leur sein : c'est le cas de façons nombreuses, réalisées avec des outils de faible largeur, et lorsque l'on observe l'état final (après semis) de la préparation des terres.

Déjà, dans le cas du non-travail répété pendant plusieurs années dans une parcelle, il faut distinguer les emplacements où se sont exercées des pressions (roues des engins) de ceux qui en sont indemnes. On peut alors pratiquer, dans cette stratification simple, l'analyse des systèmes de porosité (STENGEL, 1976, 1979). Ceci a contribué à établir, pour cet itinéraire technique particulier (absence d'ameublissement du sol par les outils), un diagnostic prévisionnel de compatibilité avec le milieu physique, basé sur la connaissance des comportements physiques intrinsèques de la terre (STENGEL, 1980 ; MONNIER et al., 1981).

Dans les autres cas, l'existence d'une grande variabilité de l'état structural, d'échelle décimétrique ou métrique, est la règle dans les horizons travaillés. Elles est renforcée par l'évolution actuelle des itinéraires techniques (outils de grande largeur, diminution du mouton d'interventions). **On est donc conduit à réaliser une cartographie de chaque horizon** (MANICHON, 1978) en y relevant la position et la surface (mesurée sur la face d'observation verticale de la fosse) **d'unités morphologiques** se distinguant par leur état structural.

Au changement d'échelle résultant du passage de l'horizon aux unités morphologiques — la surface de celles-ci est de l'ordre de 100 à 200 cm² — doit correspondre un perfectionnement des modalités d'appréciation de l'état structural. Dans le souci de définir un système de description simple et d'utilisation immédiate au champ, nous avons proposé (MANICHON, 1982) non pas une classification exhaustive (qui aurait dû comporter un nombre de variantes très élevé), mais une grille de description, reposant sur l'évaluation indépendante de deux paramètres. Nous les définirons avant de donner un exemple de stratification établi sur ces bases.

a) Etat interne des éléments structuraux d'origine anthropique :

Les éléments structuraux sont les agrégats naturels lorsqu'ils ont été individualisés, par exemple, par les agents climatiques. Ce sont aussi (cas des couches travaillées récemment) les mottes créées par les outils : ces mottes sont alors des surstructures d'origine anthropique. Leur état interne est apprécié visuellement et tactilement en les fragmentant selon une procédure proche de celle utilisée par HODGSON (1974).

Nous avons ainsi défini trois états typiques, qui semblent avoir une valeur assez générale pour les matériaux ne comportant pas d'éléments grossiers. Ils recouvrent, pour un matériau et une humidité donnés, des gammes ordonnées de porosité structurale intramottière :

● **L'état « Δ »** : il correspond aux cas où les contraintes (couples Humidité-Energie) subies par le matériau ont été suffisamment sévères pour entraîner la coalescence des agrégats. Les faces de fragmentation sont peu rugueuses, d'aspect continu, de forme typiquement conchoïdale, la porosité structurale est très faible ou nulle.

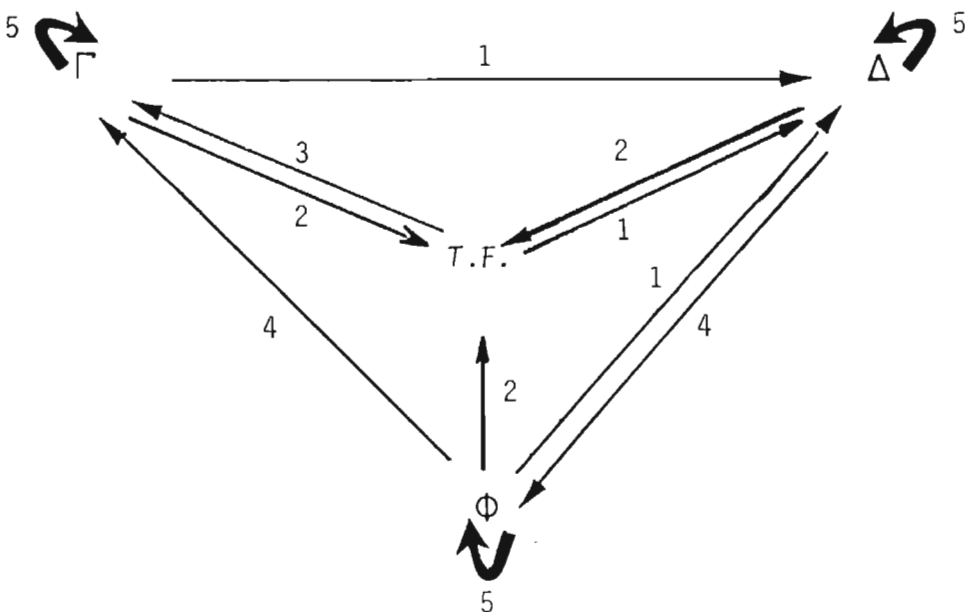


FIGURE I. — Schéma hypothétique des inter-relations entre états internes-types
Relationships between typic internal states of clods (hypothetic)

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).
Compaction (mainly anthropic).
2. Fragmentation par les outils.
Tool action (fragmentation).
3. Agglomération (interactions Climat-Texture-Faune...), contraintes modérées.
Aggregation (climate-texture).
4. Fragmentation par gonflements et retraits (interaction Climat-Texture).
Swelling and shrinkage.
5. Fluctuations sans changement d'état interne (contraintes modérées).
Minor modifications.

DEFINITION INDICATIVE DES ETATS INTERNES :

- Γ : Agrégats visibles/Aggregates are visible in the clod. (Structural porosity is increasing from Δ to Γ).
- Δ : Aspect continu/Massive and compact.
- Φ : Présence de fissures dans un massif continu/Cracks in a massive clod.
- T.F. : Terre Fine/Very fine aggregates (as a result of tools action).

● **L'état « Φ »** : il est proche de « Δ », mais s'en distingue par l'existence d'amorces de fissures, révélées lors des essais de fragmentation. Cet état n'existe que pour les matériaux possédant une certaine aptitude à la fissuration.

● **L'état « Γ »** : il est assez directement en relation avec les processus naturels de structuration. Les caractéristiques des agrégats associés dans ces mottes (forme, dimensions) sont variables selon le milieu physique et les contraintes antérieurement subies, mais les agrégats sont discernables. Ceci se traduit par une rugosité assez importante des faces de fragmentation des mottes, et une porosité structurale (résultant des défauts de contact entre agrégats) relativement grande.

Ces états-types sont aisément identifiables visuellement, ce qui permet à la description de l'état physique de gagner en objectivité. Mais, de plus, il est possible de suggérer, à partir de leur définition, un schéma de leurs inter-relations (fig. I). Il en ressort que **leurs poids respectifs dans une situation donnée** résultent de diverses actions antagonistes, chacune possédant sa dynamique propre, dépendant :

- du système de culture appliqué à la parcelle ;
- des caractéristiques du milieu physique : climat, constitution et comportements physiques intrinsèques du matériau.

Un tel critère (dont il convient de préciser les modalités pratiques d'évaluation) fournirait un indicateur de l'évolution de l'état physique du sol sous l'action des systèmes de culture, qui intégrerait — en les distinguant — les interactions Climat-Texture.

b) Assemblage des éléments structuraux :

Une unité morphologique peut être constituée d'un ou plusieurs éléments structuraux ; si plusieurs éléments coexistent, ils peuvent être adhérents entre eux ou libres : ceci définit quatre types d'assemblage de base (fig. II), correspondant — pour un état interne donné — à une échelle croissante de porosité structurale. Des variantes sont fournies par la notation de présence de cavités importantes (plus de 5 mm) entre éléments structuraux. Enfin, la description de l'unité peut être précisée par l'appréciation de la dimension des mottes et des rapports d'abondance des mottes et de la terre fine. Ceci n'est possible que pour les états SF et F.

Nombre d'éléments dans l'unité	Un seul	PLUSIEURS ÉLÉMENTS STRUCTURAUX ASSEMBLES		
		Éléments adhérents entre eux ("soudés")		Éléments libres
LIAISONS ENTRE ÉLÉMENTS				
DENOMINATION	M (Massif)	SD S. à éléments soudés à contours difficilement discernables	SF S. à éléments soudés à contours facilement discernables	F S. fragmentaire à éléments individualisés
POROSITÉ		Croissante de M à F		
PRÉSENCE DE CAVITÉS (>5mm)		SDV	SFV	FV
DESCRIPTION DES MOTTES ET DL LA TERRE FINE		Très délicate ou impossible	Notation de la dimension des mottes, des rapports d'abondance Mottes/Terre Fine	

FIGURE II. — Types d'assemblages des éléments structuraux
Typical assemblages of clods

- M : Massive.
- SD : Clods are very difficult to separate and describe.
- SF : Clods are adherent, but can be separated and described.
- F : Clods are individualized.
- V : Presence of big holes between clods
(Structural porosity is increasing from M to F).

Au moment de sa description, l'état du profil cultural peut avoir subi une certaine évolution sous l'action des agents naturels, depuis sa création par les façons culturales.

D'après les résultats actuellement acquis, il semble que cette évolution — qui dépend des agents en cause, du matériau et de son état d'origine — concerne préférentiellement le niveau d'assemblage :

- Adhérence des mottes conduisant progressivement à une prise en masse (passage de F à SF, de SF à SD...) sous l'action de l'eau ;
- Apparition de fentes de retrait au sein d'états massifs ou contournant les éléments structuraux constitutifs des unités SD ou SF : ces traits sont, par rapport à l'état initial, des surstructures d'origine climatique.

Le niveau d'assemblage apparaît ainsi plus contingent que l'état interne des éléments structuraux.

c) Exemple de description :

La réalisation pratique des observations consiste à établir une stratification de chaque horizon du profil cultural basée sur la distinction d'unités morphologiques — chacune étant définie par une combinaison des deux critères précédents. L'établissement d'une cartographie précise de l'horizon permet d'évaluer l'importance des différents états (mesure de la surface occupée par chaque unité sur la face d'observation). On en tire une caractérisation de l'horizon qui permet, mieux que par un qualificatif moyen, de rendre compte des interactions Outils-Sol. La comparaison de plusieurs situations porte alors sur la « composition » de l'horizon comme sur la dimension des unités morphologiques (en relation avec l'hétérogénéité de l'horizon). La considération de la localisation des unités dans l'horizon permet d'affiner l'interprétation ; ceci est illustré par l'exemple de la figure III.

Ce n'est pas à une simple comparaison de situations que l'on aboutit, mais à une compréhension — au moins partielle — du déterminisme de chacune. Celle-ci procède d'une connaissance, à différents niveaux, de l'organisation du sol, à laquelle on ne peut avoir accès par les **seules** mesures physiques, hors les cas les plus simples déjà évoqués.

Nous devons cependant souligner une difficulté importante (qui se présente quelle que soit la méthode d'évaluation de l'état physique choisie), qui est celle d'obtenir des informations représentatives de l'ensemble de la parcelle.

Lorsqu'il s'agit, comme dans l'exemple précédent, d'une parcelle expérimentale de faible largeur, où tous les travaux ont été réalisés dans le même sens, les estimations des poids respectifs des différents états structuraux sont assez faciles à obtenir. Dans un champ cultivé de grandes dimensions, ces estimations sont plus délicates et nécessiteraient de nombreux sites d'observation. C'est là que des cartographies de mesures pénétrométriques (BILLOT *et al.*, 1977) qui peuvent être multipliées grâce à la rapidité des mesures, sont susceptibles de rendre de grands services, s'il est possible de les mettre en correspondance au champ avec les observations morphologiques sans lesquelles elles sont très délicates à interpréter (CAPDEVILLE, 1979 ; MANICHON, 1982). Ceci nécessite des mises au point méthodologiques, entreprises en collaboration entre l'I.N.A.-P.G. et le CEMAGREF. Cette utilisation conjointe du pénétromètre et de l'approche morphologique devrait être très riche.

II. — ÉTABLISSEMENT DE RELATIONS ENTRE LES OUTILS ET LES TRANSFORMATIONS DE L'ÉTAT DU PROFIL.

Les processus de transformation du sol par les outils sont singulièrement complexes au champ :

- L'ensemble Tracteur-Outil exerce des contraintes dont la répartition spatiale est inégale et discontinue (roues, dents...) ;

TRAITEMENT	ETATS STRUCTURAUX % DE L'HORIZON H50 (3)										dont unités avec cavités (V)	Dimension moyenne des unités morphologiques (cm ²)
	M Δ (4)		SF Δ	SFV Δ	FV Δ	M Γ	SD Γ	SF Γ	SFV Γ	FV Γ		
	I	II										
A Tassement préalable au labour (1)	17.1	19.5	9.1	15.8	7.1	2.9	19.0	2.6	1.8	5.0	27.9	159
B Sans tassement préalable (2)	16.8	5.6	5.5	6.0	-	8.6	37.4	16.2	-	3.9	9.9	202

FIGURE III. — Exemples de descriptions morphologiques (Manichon, 1982)

Morphologic descriptions (examples)

- (1) Tassement homogène avant labour ramenant la densité de la couche à labourer au voisinage de la densité texturale. Labour à l'état « fragile » (au sens de BAVER et al., 1972), suivi de herse rotative et vibroculteur.
- (2) Identique à « A », sauf tassement préalable.
- (3) H50 : horizon limité par le fond des reprises de labour et le fond du labour actuel. Les faces observées sont perpendiculaires aux travaux (longueur : 310 cm).
- (4) La cartographie des profils permet de distinguer 2 types d'unités M Δ : celles qui sont directement liées aux interventions post-labour (roues des tracteurs des travaux superficiels et du semis) (M Δ I), et celles qui ne peuvent l'être (M Δ II).

Bref commentaire :

Une forte compacité du sol modifie son comportement mécanique sous l'action de la charrue (NICHOLS, REED, 1934) ; les blocs formés sont plus gros, après retournement de la bande de terre par le versoir, leur agencement ménage entre eux des cavités plus ou moins importantes accroissant la fréquence des discontinuités. Les états M Δ II, SF Δ , SFV Δ , FV Δ résultent de ces comportements. La comparaison de A et B montre que le tassement, avant le dernier labour, a multiplié par 3, au moins, l'importance de ces états.

— A : Severe compaction before ploughing.

— B : Without compaction.

The different soil conditions are expressed as % of ploughed horizon (under seed-bed).

- Le volume de sol soumis à ces contraintes ne se comporte pas de façon homogène : les réactions de chaque volume élémentaire sont déterminées par son humidité, son état structural et l'énergie qui lui est appliquée directement par les pièces en mouvement ou par le déplacement des zones voisines.

Nous avons vu quelles méthodes d'appréciation de l'état physique étaient susceptibles de caractériser les résultats de l'interaction Sol-Outil. Notre ambition ne peut être cependant d'étudier ces processus en tant que tels : nous ne visons qu'à établir entre les comportements du sol et l'emploi des outils des correspondances qui, même exprimées en termes de tendances peu précises, sont cependant indispensables à l'Agronome :

- pour établir des diagnostics sur les itinéraires techniques pratiqués par les agriculteurs ;
- pour conseiller ceux-ci dans l'emploi des outils, à partir de prévisions de comportement du sol.

I. — DIAGNOSTIC SUR LES ITINERAIRES TECHNIQUES.

Les résultats que nous présentons sont extraits d'enquêtes réalisées dans les sols limoneux du Béarn (MANICHON, SEBILLOTTE, 1973-1975) dans des parcelles soumises à la culture continue du maïs, ou de passé prairial récent. Par leur constitution physique, les sols étudiés sont très sensibles aux dégradations et, du fait d'un climat très pluvieux, sont fréquemment travaillés en conditions humides. Ceci guide les choix à faire pour la caractérisation des profils et des itinéraires, en vue d'étudier leurs relations. Il s'agit ici d'une approche statistique, utilisable lorsque les cas observés sont nombreux. Il est vraisemblable que l'utilisation du système de description que nous avons présenté au § 1-3 — non encore élaboré au moment de ces observations — aurait permis des interprétations plus détaillées, même avec un effectif enquêté plus restreint.

1.1. PROFILS CULTURAUX

La porosité de la couche travaillée est la caractéristique la plus variable d'une situation à l'autre. On en rend compte par la combinaison de deux critères (degré de fragmentation des bandes de labour, porosité des mottes), amenant à définir une classification à 6 modalités (« états-types »). Cette appréciation résumée de l'état du profil s'est révélée fortement reliée aux comportements de la végétation (fig. IV)).

1.2. ITINERAIRES TECHNIQUES.

La variabilité interparcellaire est très grande. Il est donc indispensable d'opérer des regroupements, sur la base — qui s'impose dans ce milieu — du caractère plus ou moins dégradant pour le sol des différentes interventions. Nous l'avons fait en définissant, pour chaque étape, des variables exprimant l'humidité de la couche travaillée ou (et) l'énergie appliquée (voir le détail de ces modalités à la figure V). Notons que même ainsi schématisés, les itinéraires sont très variables au sein de la population (49 combinaisons différentes pour 110 parcelles) : ceci traduit, dans une région assez homogène, la diversité des moyens de travail et **surtout de conditions d'utilisation de ces moyens**, ce dont on doit tenir compte pour l'élaboration de références.

1.3. RELATIONS ITINERAIRES TECHNIQUES-ETATS DES PROFILS.

a) Méthode :

Le modèle statistique utilisé est un modèle de régression qualitative (DAUDIN, 1978 ; DAUDIN, MEYNIEL, 1980) additif et sans interactions (analogue aux modèles du même type en analyse de variance), dans lequel :

- **Les variables explicatives** sont celles qui définissent les itinéraires techniques ;
- **Les variables à expliquer** sont les états-types.

Les résultats des calculs sont : la part de variance « expliquée » par le modèle et les estimations des paramètres de régression entre les différentes modalités des variables explicatives et des variables à expliquer. Par sommation de ces paramètres pour un itinéraire

ETAT DES PROFILS (1)

	C0	C1	FG0	FG1	FF1	FF2	
EFFECTIFS	26	16	18	34	7	9	110
Abondance moyenne des racines (2)	1.5	1.7	1.8	2.1	2.4	2.6	
Rendements moyens (q/ha) (3)							
1970	65.8		70.8		76.1		
1973	59.1		67.8		76.9		

FIGURE IV. — *Etat des profils culturaux et réactions du maïs*
(Enquêtes sur la monoculture du maïs en Béarn)

Soil structure (ploughed horizon) and Maize (abundance of roots, grain-yield)

(1) C : Etat continu.

FG : Fragmentation grossière des bandes de labour (mottes 10-20 cm).

FF : Fragmentation fine des bandes de labour (mottes inférieures à 10 cm).

0, 1, 2 : Echelle de notation croissante de la porosité des mottes (évaluation visuelle).

(2) Par évaluation visuelle (échelle de notation = 0 à 3) dans l'horizon labouré (lit de semence exclu).

(3) Chiffres à considérer avec prudence, vu le déséquilibre des effectifs entre classes d'états, et l'existence de causes de variation des rendements entre parcelles autres que l'état physique du sol. On note cependant des classements cohérents et des écarts moins importants entre états en 1970 (été humide) qu'en 1973 (été sec). Ceci rejoint de nombreuses observations, notamment celles de MAERTENS (1964)

— **TA** : Interventions avant le labour de l'année (récolte du précédent, traitement des résidus de récolte, apports d'engrais et amendements) :

Operations before ploughing:

ND : Non dégradantes/no compacting effect.

D : Dégradantes (engins lourds ou(elt) sol humide)/Compacting effect.

— **HL** : Humidité au labour (évaluée par mesures et confrontation aux relevés climatiques - Tous les labours ont lieu au printemps) :

Soil water-content during ploughing (increasing from S to H).

S (Sec) : Inférieure ou égale à l'humidité à la capacité au champ (HCC).

MH (Moyennement humide) : Supérieure à HCC, en cours de ressuyage.

H (Humide) : Très supérieure à HCC (travail au sein d'une période très pluvieuse).

— **HF** : Humidité moyenne au cours des travaux postérieurs au labour (mêmes classes que ci-dessus).

Soil water-content during post-ploughing operations.

— **EN** : Modalités des travaux postérieurs au labour (travaux du sol, apports d'engrais, désherbages, jusqu'au semis).

Energy applied to soil during post-ploughing operations (as a combination of number of operations and weight of implements) (increasing from A to E).

MODALITES	A		B		C		D		E	
Nombre de passages	3/5	6/8	3/5	9/12	6/8	3/4	6/8	9/12	6/8	9/12
dont outils lourds	0	0	1	0	1	2	2	1	≥ 3	≥ 2

FIGURE V. — *Critères de définition des itinéraires techniques* (Manichon, 1982)
Chosen criteria for defining groups of tillage operations

N.B. — Outils légers : herses, vibroculteurs, épandeurs centrifuges portés.

Outils lourds : disques, cultipackers.

raire donné, on calcule les probabilités conditionnelles qui le relient aux différents états-types ; on en déduit une table de correspondance entre les itinéraires et les états les plus probables (« états calculés ») et l'on compare ceux-ci avec les états observés.

Comme dans toute démarche statistique, les liaisons calculées dépendent de la population dans laquelle on opère.

b) Résultats et discussion :

Appliquée à l'ensemble des parcelles (fig. VI), cette procédure est décevante, la part de variance expliquée étant faible (modèle A). Il est donc indispensable de stratifier pour réduire la variance totale. Ceci n'apporte rien pour la sous-population des maïs sur prairie (modèle B), mais se révèle pertinent pour les maïs continus (modèle C), surtout lorsqu'on réduit encore la variance en éliminant les parcelles dont le passé cultural ne correspond pas strictement à cette définition (interruption récente de la culture continue du maïs par une céréale d'automne) : le modèle D fournit 85 % d'accords entre états du profil calculés et observés. La variable « HL » (humidité du labour) n'apparaît pas significative, sa suppression amène un léger accroissement du taux d'accords (modèle E). On déduit de ce dernier modèle une table de correspondance entre itinéraires et états (fig. VII) dans laquelle la répartition de ces derniers apparaît bien ordonnée par rapport aux modalités des variables explicatives. On dispose alors d'un modèle de prévision des effets probables des itinéraires que l'on peut appliquer aux autres populations, déduisant de « l'effet suivant » (SEBILLOTTE, 1980) une analyse de « l'effet précédent ».

MODELES	POPULATION DE PARCELLES	VARIANCE TDOTALC	VARIANCE MODELE /V. TOTALE (%)	ACCORDS ENTRE CLASSEMENTS CALCULES & OBSERVES (%)
4 VARIABLES EXPLICATIVES (TA+HL+HF+EN) (*)	A Toutes parcelles (110) (**)	86.9	18 (HS)	50.0
	B Maïs/Prairie (59)	45.6	16 (NS)	47.5
	C Maïs continu (51)	37.9	42 (HS)	74.5
	D Maïs continu apuré (40)	28.6	55 (HS)	85.0
3 VARIABLES (TA+HF+EN)	E Maïs continu apuré	28.6	51 (HS)	87.5

(*) Voir la signification des sigles en figure V.

(**) Effectif de parcelles.

FIGURE VI. — Régressions qualitatives entre itinéraires techniques et profils culturaux (Manichon, 1982)

Qualitative regressions between soil tillage and soil tilth

- A : Complete population.
- B : Meadow-maize rotation.
- C, D, E : Continuous maize (different samples).
- Variance totale : Total variance.
- Var. modèle/Var. totale (%): Model var./Total variance (%).
- Accords entre classements calculés et observés (%): Correspondance between calculated and observed classifications.

		TRAVAUX AVANT LABOUR (TA)									
		NON DEGRADANTS					DEGRADANTS				
		Travaux postérieurs au labour (EN)					Travaux postérieurs au labour (EN)				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
HUMIDITE TRAVAUX POST- LABOUR (HF)	S	FG1	FG1	FG1	C1	CO	FG1	FGO	FGO	CO	CO
	MH	FG1	FG1	C1	C1	CO	FGO	FGO	CO	CO	CO
	H	FG1	CO	CO	CO	CO	CO	CO	CO	CO	CO

FIGURE VII. — Table de correspondance itinéraires-état (Modèle E)
(Manichon, 1982)

Corresponding-table between groups of tillage operations and soil tilth (continuous maize)

Ne pouvant présenter ces résultats ici, nous nous contenterons de quelques remarques méthodologiques sur la manière d'aborder, par voie d'enquête, les relations Sol-Outils : on n'a de chance réelle de les expliciter que :

- si la cause **dominante** de variation de l'état du sol réside bien dans l'action des outils, opérant à partir d'états initiaux (au temps d'origine des itinéraires étudiés) peu variables (cas des parcelles de monoculture de maïs) ;
- si les critères retenus pour appréhender les façons culturales et les états des profils sont cohérents, et choisis en fonction du milieu. Il est vraisemblable que ceux qui ont été utilisés dans l'exemple précédent seraient insuffisants lorsque le résultat de l'interaction Propriétés texturales-Climat est antagoniste de l'action dégradante des outils (action bénéfique du gel, par exemple) : il faudrait alors intégrer le climat dans le modèle explicatif par des effets directs sur le sol, en plus de ses rôles sur les conditions de travail. L'observation d'états intermédiaires (en sortie d'hiver notamment) peut aussi se révéler nécessaire.

Nous retiendrons donc que des références sur les relations itinéraires techniques-Etat du profil cultural doivent être établies au niveau d'un système de culture pratiqué dans un milieu, et que les liaisons seront plus ou moins étroites selon les cas.

2. — PREVISION DES COMPORTEMENTS DU SOL SOUS L'ACTION DES OUTILS ET CONSEILS AUX PRATICIENS.

Dans le domaine du travail du sol, la formulation de conseils aux praticiens pour le choix et l'utilisation des machines suppose que l'on soit capable de répondre à deux types de questions :

- Le premier a trait à la définition de l'état qu'il est souhaitable de conférer au sol, compte tenu du végétal à implanter, des interactions Climat-Sol... (MANICHON, 1980). Nous n'en parlerons pas plus ici, sauf pour souligner l'apport du concept de profil cultural aux raisonnements que doit mener l'Agronome ;
- Le second concerne la définition des moyens à utiliser pour obtenir cet état. En d'autres termes, il s'agit de **définir les voies utilisables pour amener le profil cultural de son état actuel à l'état souhaitable**, dans le délai de temps imposé par la date de semis de la culture à implanter. Ces voies sont multiples ; elles combinent, à des degrés divers, les outils et l'action du climat. Pour les concevoir et choisir entre elles en tenant compte de diverses contraintes (organisationnelles...), il serait nécessaire de disposer de modèles de prévision des comportements du sol sous l'action des outils. Or ce n'est pas le cas, la complexité des processus

en cause et le niveau des connaissances interdisant d'élaborer des modèles complets des interactions Sol-Outil-Cellule motrice. On ne peut que proposer des modèles qualitatifs, très simplifiés, en rassemblant l'expérience acquise par les observations au champ, confrontée aux connaissances théoriques fragmentaires dont on dispose.

C'est ainsi que SPOOR (1975), par exemple, définit les **conditions optimales** (consistance de la terre) et les **moyens** (outils) pour atteindre un objectif donné. Celui-ci est défini par le **résultat d'une action élémentaire** (émiettement, retournement, formation de mottes...).

Sans nier l'intérêt d'une telle approche, il nous semble qu'il est souhaitable de la compléter en adoptant une attitude qui, dans son principe même, soit plus proche de sa finalité de conseil. Elle consiste à prendre pour point de départ les états initiaux du sol et à établir pour ceux-ci des prévisions de transformation sous l'action d'un outil donné.

Un état initial est défini par la combinaison de deux critères :

— **L'état hydrique** : Le rôle de l'humidité de la terre dans son comportement mécanique est, à juste titre, mis en avant. Il ne semble pas cependant que la connaissance de la position de l'humidité actuelle par rapport à des limites de consistance déterminées par des procédures standardisées (ATTERBERG, 1911) soit une donnée suffisante pour une prévision au champ (MULLINS, FRASER, 1980). Entre autres, les valeurs de ces limites varient avec l'énergie appliquée au matériau (FAURE, 1981), donc vraisemblablement avec l'outil et ses réglages. Nous retiendrons cependant, au vu des observations au champ, mais sans pouvoir indiquer de limites précises, qu'un même matériau présente successivement au cours de son humectation trois états de consistance :

- « rigide », caractérisée par une forte cohésion ;
- « fragile », où l'affinement est particulièrement aisé ;
- « plastique », pour lequel il est possible de former des mottes de pression.

— **L'état structural** qui, comme nous l'avons déjà souligné (cf. fig. III), interfère sur le comportement mécanique de la terre.

Dans l'exemple que nous présentons ici (fig. VIII), ces deux critères constituent les deux entrées du tableau de prévision. Nous n'avons retenu que trois états structuraux initiaux typiques. Les deux premiers (MI et $M\Delta$) correspondent à des situations fréquentes de déchaumage, ou de première façon culturale au printemps ; le dernier ($F\Delta$) à l'état de la couche superficielle, lorsqu'une première intervention culturale a déjà eu lieu. Il s'agit d'exemples.

L'utilisation pratique de ce tableau apparaît clairement :

- au moment où l'on doit prendre la décision d'utiliser l'outil, l'état initial du sol correspond à l'une ou l'autre des cases du tableau. Si la prévision qui lui est attachée ne semble pas conduire vers l'état recherché, la lecture du tableau renseigne sur l'avantage qu'il y aurait, par exemple, à attendre une modification de l'état hydrique avant d'agir. On peut aussi prévoir qu'à partir d'un état donné, plusieurs interventions seront nécessaires pour atteindre l'objectif visé si l'état hydrique n'évolue pas, à moins que l'on puisse choisir un autre outil ;
- les répercussions des travaux antérieurs (ou des précédents culturels) sur l'état à un moment donné et sa facilité de transformation peuvent être mesurées.

On possède ainsi une clef de lecture des interventions passées et un moyen de prévision.

Il ne pourra être perfectionné que par un accroissement des connaissances sur le déterminisme du comportement mécanique de la terre et son extériorisation à l'échelle du champ :

- à partir de modélisations au laboratoire, sur matériaux de structure discontinue. Dans un travail récent, GUERIF (1982), étudiant le compactage d'agrégats calibrés,

Etat structural initial CONSISTANCE	M Γ	M Δ	F Γ Mottes moyennes (5-10 cm) Peu de terre fine
RIGIDE	F Γ (Dimension des mottes fortement liée à l'écartement entre dents. Peu de terre fine)	F Δ (Grosses mottes, très peu de terre fine)	F Γ (peu de modifications)
FRAGILE	F Γ (Petites mottes et terre fine - Triage)	F Δ (Mottes moyennes et peu de terre fine)	F Γ (Diminution de dimension des mottes - Augmentation de quantité de terre fine)
PLASTIQUE	Hors roues : F Γ ou F Δ (mottes lissées, de dimension liée à l'écartement entre dents) Sous roues : Formation de mottes compactées F Δ ("lards")	F Δ (Grosses mottes lissées, pas de terre fine)	Hors roues : Peu de modifications Sous roues : Formation de mottes compactées F Δ ("lards")

FIGURE VIII. — Exemple de tableau de correspondance état initial-état transformé
Cas de l'horizon travaillé par un outil à dents (modifié à partir de Durr et al, 1979)

A qualitative predictive model of soil-tool interaction: correspondance between initial and final state (structural changes in the tilled horizon — example of tines — as a function of soil structure and consistancy)

en cellules œdométriques, confirme la variabilité des limites de consistance avec l'énergie appliquée ; il propose des interprétations aux comportements observés en termes de variations des valeurs relatives de cohésions et angles de frottement inter et intra-agrégats qui semblent qualitativement transposables au champ ;

- par la prise en compte des anisotropies d'origine structurale et hydrique dans les couches travaillées, comme dans les couches sous-jacentes.

Il y a là un vaste champ de collaboration pour plusieurs disciplines.

CONCLUSION.

Pour l'Agronome, l'étude de l'action des outils sur le sol requiert donc une évaluation de celui-ci, au niveau de la parcelle, en tant que système composé d'éléments de propriétés différentes. On a vu les apports, à cet égard, de différentes méthodes d'examen du profil cultural, associées, lorsque cela est possible, avec l'obtention de paramètres quantifiés qui précisent la description et lui donnent plus de sûreté.

Les références dans le domaine du travail du sol (dès que l'on utilise ce vocable, on se situe bien à l'échelle de la parcelle) sont rares. Ceci est dû aux difficultés spécifiques de celui-ci, qui ont incité les expérimentateurs à se tourner vers l'étude de cas très particuliers (le semis direct, par exemple) dont l'importance économique n'est pas avérée, mais qui ont été fortement utiles en tant que modèles simplifiés. Ceci est dû aussi à ce qu'au lieu d'étudier les relations Outil-Etat du sol, on a trop privilégié jusqu'ici l'évaluation des répercussions des techniques culturales sur le rendement des cultures, alors que celui-ci n'en est qu'un révélateur trop indirect (TROUSE, 1971 ; SEBILLOTTE, 1975 ; BOIFFIN *et al.*, 1976 ; WINGATE-HILL, 1978). L'utilisation plus systématique, sous diverses formes, du concept de profil cultural devrait contribuer plus efficacement à l'élaboration de références, qui, par ailleurs, ne doivent pas concerner uniquement l'état physique du sol.

En effet, le choix d'un itinéraire technique ne se fonde pas sur ce seul aspect : les autres fonctions des outils de travail du sol (incorporation et mélange de matières — engrais, désherbants, débris végétaux... —, destruction mécanique de la végétation adventice) sont des motivations parfois plus importantes de leur choix, de leur ordre et de leur date d'intervention. A côté de l'étude des relations Outil-Etat physique du sol, c'est **l'ensemble des modifications à l'état du milieu** qu'il faut pouvoir apprécier pour juger de l'adéquation d'un itinéraire technique à un milieu pour une succession de cultures donnée.

Le diagnostic sur l'état observé, en référence à un état souhaitable, inclut donc de nombreuses composantes que les observations au champ peuvent assez facilement et immédiatement saisir. Correctement conduites, ces observations permettent, de plus, de faire la part de la **conduite de l'itinéraire technique** (choix des dates de travaux, des réglages des outils...) **en comparaison avec ses effets probables** (liés, dans un milieu donné, au volume de terre ameublie, à l'étalement entre les travaux, à l'énergie appliquée au profil aux différentes étapes de sa modification). On dispose alors d'un puissant moyen d'analyse pour établir, sur une base objective, les conseils aux agriculteurs.

SUMMARY

SOIL-TOOL INTERACTIONS:
FIELD STUDIES USING SOIL PROFILE DESCRIPTIONS

Soil-tool interactions studies concern different disciplines. From the agronomist's point of view, which is presented here, the aims are: first to define optimal soil physical conditions referring to plant, soil and climate; and second how to obtain these conditions, using tillage machines.

These aims lead to choose specific methods to characterize, in the field, soil physical conditions. Different approaches in describing tilled horizons are presented and discussed in the first part of this paper. One of them consists in visual and tactile evaluation of two criteria: the internal state of clods and the way they are brought together. Their combination defines soil tilth. The values of these criteria are very variable from one place to the other, in the same horizon, in relation with tractors and tools effects on soil.

Consequently a kind of soil tilth map in the horizon has to be made. This map is a useful guide for physical measures in anisotropic horizons. An example shows how this approach leads to an understanding of soil structure formation, as a result of climatic agents and agricultural practices interactions.

The second part of this paper shows the use of profile descriptions in obtaining:

— *Soil tillage references, for specified pedoclimatic conditions: the way of establishment of a corresponding table between tillage operations and soil tilth is shown, using a qualitative regression method. The effect of crop rotation is noted;*

— *Qualitative predictive models of soil-tool interactions.*

Concluding remarks are given on the need of further results and references obtained in the field if one wants to be able to give more adequate advices for soil tillage.

Références bibliographiques

- ATTERBERG (1911), cité par BAVER L.-D., GARDNER W.-H., GARDNER W.-R. (1972). — *Soil Physics* (4th Ed), J. Wiley and Sons, N.Y. (U.S.A.).
- BARLEY K.P., GREACEN E.L. (1967). — *Advances In Agronomy*, 19, 1-43 (Acad. Press, N.Y.).
- BILLOT J.-F., PALOMO J., MARIONNEAU A. (1977). — *Bull. Inf. C.N.E.E.M.A.*, 237, 47-50
- BINESSE M. (1970). — *Etude du C.N.E.E.M.A.*, n° 341-342.
- BLANCHET R., BOSCH M., MAERTENS C., PUECH J. (1974). — *Ann. Agron.*, 25 (5), 681-696.
- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., COUVREUR F. (1976). — In « *Simplification du travail du sol, en production céréalière* », I.T.C.F., Paris.
- BOIFFIN J., MANICHON H. (1976). — *Fermes Modernes*, numéro spécial « *Travail du Sol* », 106-112.
- BRYSSINE G. (1954). — *Soc. Sc. Nat. Phys. du Maroc*, n° 8 et n° 9, 33-71.
- CANEILL J., MANICHON H. (1982). — *Info. Betteraves*, n° 40 et n° 42.
- CAPDEVILLE J. (1979). — *Mémoire D.A.A.*, I.N.A. P.-G./MASEC.
- COOPER A.W. (1971). — « *Compaction of agricultural soils* », Barnes K.K. et al. Eds. A.S.A.E. Monograph. St-Joseph, Michigan (U.S.A.).
- DALLEINE E., RECAMIER A., SEBILLOTTE M. (1971). — *Bull. Tech. Inf.*, n° 264-265. Ministère de l'Agriculture, Paris.

- DALLEINE E. (1977-1980). — *Etudes du C.N.E.E.M.A.*, n° 428, n° 438, n° 445, n° 463. Parc de Tourvoie, 92 - Antony.
- DAUDIN J.-J. (1978). — *Thèse de 3^e Cycle*. Université Paris-VII, Orsay.
- DAUDIN J.-J., MEYNIEL L. (1980). — *Doc. mult. Dép. Math. et Inform.* I.N.A. P.-G.
- DURR Carolyne, MANICHON H., SEBILLOTTE M., AUBINEAU M. (1979). — In « *Pratique du Conseil en Agronomie* », A.P.C.A., Paris.
- FAURE A. (1969). — *Ann. Agron.*, 20 (6), 565-595.
- FAURE A. (1981). — *Soil Sc. tillage Res.* 1, 97-105.
- GILL W.R., VANDENBERG G.E. (1967). — *Agriculture handbook*, 316, A.R.S.-U.S.D.A.
- GODWIN R.-J., SPOOR G. (1977). — *J. Agric. Engin. Res.*, 22, 213-228.
- GRAS R., DEFFONTAINES P.-L., MARIN-LAFLECHE A. (1971). — *Ann. Agron.*, 22 (5), 537-584.
- GUERIF J. (1982). — *Agronomie* (sous presse).
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G. (1969). — *Le Profil cultural*. Masson Ed., Paris.
- HENIN S. (1976-1977). — *Cours de Physique du Sol*. 2 vol. ORSTOM-Editest.
- HODGSON J.M. (1974). — *Tech. Monogr.* n° 5, Soil Survey, G.B.
- MAERTENS C. (1964). — *Science du Sol*, 1, 31-41.
- MANICHON H., SEBILLOTTE M. (1973). — *Doc. Ronéo. Chaire d'Agronomie*, I.N.A. P.-G.
- MANICHON H., SEBILLOTTE M. (1975). — *Bull. Tech. Inf.*, n° 302-303.
- MANICHON H. (1978). — *Doc. Ronéo. Chaire d'Agronomie*, I.N.A. P.-G.
- MANICHON (H.) (1980). — *Machinisme Agricole Tropical*, 11, 32-36.
- MANICHON H. (1982). — *Thèse Docteur-Ingénieur*, I.N.A. P.-G., Paris.
- METTAUER H., TUAL Y., HÄEFLINGER R., CONESA A.P., TRENDEL R. (1978). — *Ann. Agron.*, 29 (2), 147-167.
- MONNIER G., STENGEL P., GUERIF J. (1981). — *Séminaire AGRIMED*, Bari, 28-9-1981.
- MONNIER G., STENGEL P. (1982). — *Encyclopédie des Techniques Agricoles*. Paris.
- MULLINS C.E., FRASER A. (1980). — *J. Soil Sc.*, 31, 25-32.
- NICHOLS M.L., REED I.F. (1934). — *Agric. Enging.*, 15 (6), 187-190.
- NIKIFOROFF (1941). — *Soil Sc.*, 52, 193-211.
- PAYNE P.C.J. (1956). — *J. Agric. Engin. Res.*, 1, 23-50.
- PERUMPRAL J.V., DESAI C.S. (1979). — *ASAE. paper 79/1646*, St-Joseph, Michigan (U.S.A.).
- REMY J.-C., MARIN-LAFLECHE A. (1974). — *Sc. Sol*, 1, 61-66
- SEBILLOTTE M (1975). — *Bull. Tech. Inf.*, n° 302-303.
- SEBILLOTTE M. (1978). — *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 906-913.
- SEBILLOTTE M. (1980). — *Fourrages*, 83, 79-124.
- SPOOR G. (1975). — *Tech. Bull. 29 H.M. Stationary Office*, London, 128-144.
- SPOOR G., GOODWIN R.J. (1978). — *J. Agric. Engin. Res.*, 23, 243-258.
- STAFFORD J.V. (1979). — *J. Agric. Engin. Res.*, 24, 41-56.
- STENGEL P. (1976). — In *C.R. Colloque « Simplification du Travail du Sol »*, I.T.C.F., Paris.
- STENGEL P. (1979). — *Ann. Agron.*, 30 (1), 27-51.
- STENGEL P., FOURBET J.-F., MANICHON H. (1980). — *Perspectives Agricoles*, 34, 30-36.
- TROUSE A.C. (1971). — In « *Compaction of Agricultural soils* », Barnes K.K. et al. Eds. A.S.A.E. Monograph., St-Joseph, Michigan (U.S.A.).
- WIERSUM (1957). — *Plant and Soil*, 9, 75-85.
- WINGATE-HILL R. (1978). — In « *Modification of soil structure* », Emerson W.W. et al. Eds. J. Wiley and Sons., Chichester (G.-B.).

ur

Handmade