

**INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON**

**INSTITUT NATIONAL DE LA
RECHERCHE AGRONOMIQUE,
Laboratoire d'Agronomie
Grignon**

T H E S E

présentée par Isabelle COULOMB

Ingénieur Agronome

pour l'obtention du titre de :

Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

**ANALYSE QUANTITATIVE DU COMPORTEMENT DU SOL
AU LABOUR :
ROLE DE L'ETAT STRUCTURAL INITIAL**

***Soutenue le 20 décembre 1991 devant la Commission d'Examen
composée de :***

M. Sebillotte, Professeur d'Agronomie, INA-PG
D. Picard, Directeur IRAT-CIRAD
C. Cheverry, Professeur de Science du Sol, ENSA, Rennes
H. Manichon, Directeur Scientifique CIRAD
M. Aubineau, Professeur de Machinisme Agricole, INA-PG
J. Boiffin, Directeur Station INRA Laon

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

*à Marie-Anne,
à mes parents, René et Françoise,
à mon grand-père, Jean Coulomb.*

REMERCIEMENTS

Une thèse est un travail parfois bien *solitaire*. Elle n'existerait probablement pas si une personne ne prenait pas pleinement en charge le poids intellectuel de mener à bien le sujet; c'est donc d'un côté un travail très *individuel*.

Mais, elle n'existerait pas non plus sans l'aide de tous ceux qui, par leur réflexion, leur aide technique, leur gentillesse, ont su entourer l'impétrant et contribuer à l'élaboration de ces travaux, c'est donc aussi un travail *collectif*. Ce sont tous ceux qui ont participé à *cette construction collective* que je tiens à remercier sincèrement.

Je remercierai tout d'abord celui qui est à l'origine de ces travaux, qui les a imaginés, peut-être rêvés même, sûrement différents de ce qu'ils sont aujourd'hui, mais a su poser le problème, l'expliquer, le transmettre, accepter qu'il devienne la préoccupation d'une autre, qu'il soit remodelé, que certains *a priori* soient remis en question, et a cherché à me guider dans cette longue marche, soit mon maître de thèse, le **Professeur Manichon**.

La qualité intellectuelle qui m'a le plus marquée chez lui est son grand esprit de synthèse, sa capacité à remettre en ordre des idées enchevêtrées.

Je tiens alors à remercier **Jacques Caneill** pour son soutien intellectuel. Jacques fut un interlocuteur, discret mais toujours présent, particulièrement dans les moments les plus difficiles pour moi après le départ d'Hubert Manichon au CIRAD. Je lui dois beaucoup sur le plan scientifique.

Je remercie aussi **François Papy** qui, malgré ses multiples occupations, eut le courage de rattraper le train vers la fin de ma thèse et de faire des remarques très précieuses dont j'espère avoir tiré profit.

La richesse de ma thèse fut l'importance des collaborations extérieures, qui ont permis l'association, non exempte de difficultés, de techniques qui m'étaient nouvelles.

Ces collaborations n'ont pu s'établir que grâce à la place qui m'avait été faite à la Chaire d'Agronomie. Le **Professeur Sebillotte** avant de m'accueillir dans son laboratoire m'a initiée à l'Agronomie ; il a fait confiance à ceux qui encadraient ma thèse et m'a prodigué ses conseils ; qu'il en soit ici vivement remercié. **Jean Boiffin** a aussi fortement contribué à ma formation en m'initiant aux observations de terrain et en me contraignant à une grande rigueur scientifique lors de mon stage de fin d'étude. Ses enseignements me furent fort utiles durant ma thèse. Je l'en remercie. Enfin, je suis reconnaissante à **Didier Picard** de m'avoir recrutée comme assistante scientifique à l'issue de ce stage.

Les deux organismes avec lesquels j'ai travaillé sont le **CEMAGREF** et le **CEEMAT**. J'ai trouvé chez eux des collaborateurs accueillants et serviables.

Je remercierai tout d'abord la division "Tracteurs et Travail du sol" du CEMAGREF, en particulier **MM. Billot et Marionneau**, pour le temps qu'ils m'ont consacré, les mesures qu'ils m'ont fournies, les traitements que nous avons faits ensemble. Ils ont toujours réservé un très bon accueil à une personne quelque peu exigeante, voire envahissante. J'ai beaucoup apprécié leur gentillesse.

Je remercierai ensuite la division du CEEMAT représentée par **M. Pirot**, qui fit l'effort de transporter son matériel de Montpellier jusqu'à Grignon. Sa bonne humeur, son efficacité ont permis la réussite d'une expérimentation quelque peu périlleuse. L'accueil chaleureux qu'il me fit lors de ma seule visite à Montpellier restera gravé dans ma mémoire.

Une collaboration d'un autre ordre, intralaboratoire fut celle que j'ai eue avec Jean Roger-Estrade. C'est avec lui que j'ai fait mes premiers profils ; ce fut en sa compagnie qu'à germé l'idée de la méthode de caractérisation que nous avons par la suite utilisée chacun dans notre thèse. Je le remercie de m'avoir initiée au détriment de son temps à la pratique du profil cultural. Il fut un coéquipier fort agréable au début de la thèse, avant qu'il ne se lance dans la sienne, aidant à supporter avec le sourire le froid glacial du plateau de Palaiseau.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'en faire partie et montré ainsi l'intérêt qu'ils pouvaient y porter, particulièrement M. Aubineau pour avoir lu ma thèse avant qu'elle ne soit dans sa version finale.

Je réserverai alors une place de choix à ceux, sans l'aide desquels j'aurai eu du mal à finir rapidement ce travail, qui ont participé plus ou moins largement aux efforts physiques épuisants qu'elle impliquait, les techniciens avec lesquels j'ai travaillé :

- tout d'abord, Michel Tremblay ; son arrivée après un an de thèse sans aide technique fut miraculeuse ; ancien agriculteur, sans formation à la recherche, il mit une volonté peu commune à apprendre, s'investir dans la dynamique que j'avais établie, et me fit partager son expérience pratique ; à quelques moments difficiles, il sut ne pas plaindre son temps, souffrir en silence (il se souviendra longtemps, je crois, d'un profil sur le plateau de Palaiseau par temps glacial), me dépanner de son mieux, accepter mes humeurs ; il a participé activement au traitement des données, acceptant échecs stéréoscopiques, déboires et difficultés de l'informatique ; il fut un collaborateur très précieux et sympathique et je le remercie pour avoir toujours écouté avec attention les idées qui fusaient dans ma tête, pour m'avoir fait part de son avis lorsqu'il le pouvait ; les pages qui suivent sont le fruit de notre investissement mutuel ;

- ensuite, Patrick Saulas qui rejoignit le duo pour le temps de l'expérimentation principale de ma thèse ; il participa à l'épisode des 80 mètres de profil en 15 jours par tous les temps (sauf la neige !) ; sa conscience du travail accompagnée d'une forte décontraction en fit un coéquipier efficace et fort agréable ; la bonne coordination entre Patrick et Michel, appréciée d'ailleurs par d'autres dans le cadre d'un programme commun AIP "Travail du Sol", fut source de réussite ;

- Christine Delaunay qui, acceptant de s'initier et de prendre en charge le nettoyage, le classement et la pesée des centaines de boîtes à humidité, me fut d'une grande aide ;

- M. Klockiewicz de la Chaire de Machinisme Agricole pour la réalisation pratique et efficace de quelques pièces indispensables ;

- le personnel du Centre Expérimental qui le jour de chacun des labours vint porter un gros coup de main et permit la réussite des chantiers ; je les remercie pour avoir creusé à la main, avant que l'emploi de la pelleteuse ne fut envisagé, un certain nombre de trous pour mes observations de profils ; je me permettrai de mentionner Gaston Durandet et Jean Evano pour leur implication particulière dans mes travaux (réalisation de tassements, conduite du tracteur au labour à Grignon) car mes exigences n'étaient pas toujours faciles à concrétiser et ils ont su répondre à mon attente ;

- le personnel de la ferme de Palaiseau pour m'avoir facilité le travail sur leurs parcelles ;

- Philippe Hamard pour l'apprentissage de l'usage de la sonde gamma.

Je n'oublierai pas non plus :

- Hubert Boizard pour avoir contribué aux observations de profils de l'AIP "Travail du Sol" et s'être toujours montré très serviable ;

- Fernando De Leon pour l'accueil qu'il me fit à mon arrivée à la chaire et les renseignements qu'il put me fournir par la suite lorsqu'il était à Avignon ;

- Pierre Renault pour les discussions que nous avons eues à la fin de ma thèse et les éléments qu'il m'a fournis ;

- **M. Daudin** pour ses conseils en Statistique ;
- **MM. Boissard et Valéry** (INRA Bioclimatologie, Grignon), **M. Clainchard** (Groupe Image ENST), **M. Folmer** (INRA, Le Magneraud), **M. Vidal** (CEMAGREF, Montpellier) pour leurs conseils sur le traitement de mes images ;
- **MM. Tessier et Guérif** pour avoir participé à la formation de Michel Tremblay ;
- **Michel Bertrand, Luc Eveleigh, Pascal Leroy et Marie-Hélène Châtelain** pour leurs conseils ou dépannages informatiques ;
- et le Secrétariat en la personne de **Geneviève Baudran** pour la mise en page et l'édition de ma thèse accompagnée de **Joëlle Brun** pour la prise en charge de problèmes administratifs, **Yvette Monin** pour la recherche des articles que je lui demandais, et **Odette Tily** pour les photocopies que je lui ai fait faire ; elles ont toutes accompli leur tâche avec bonne volonté et avec le sourire : elles m'ont facilité la vie ;
- **Catherine Pasquier** pour quelques coups de mains et sa gentillesse ;
- tous ceux de "Grignon-Bas" qui furent d'agréables collègues ;
- tous ceux qui m'ont adressé un sourire.

Je finirai en remerciant **ma famille** qui a porté une contribution technique non négligeable à ma thèse, puisqu'elle a assuré par un week-end de juin 1990 la relève de Michel Tremblay et de Patrick Saulas. Elle a assuré une permanence sur la parcelle de Grignon pour m'aider à photographier mes profils et me permettre ainsi de réaliser l'ensemble des observations en un temps suffisamment limité pour qu'elles restent valides, compte-tenu de mes objectifs.

*

*

*

NOTATIONS

A. NOTATIONS D'ETAT PHYSIQUE

γ_{ww}	: masse volumique humide à l'humidité du terrain.
γ_{dw}	: masse volumique sèche à l'humidité du prélèvement.
$W\%$	: humidité pondérale (%).
ρ_{tw}	: densité texturale à l'humidité de la mesure.
ρ_{dw}	: densité apparente.
ρ_s	: densité solide.
ρ_{Δ}	: densité sèche des mottes delta.
ρ_{Γ}	: densité sèche des mottes gamma.
m_{Δ}/m	: teneur massique en mottes delta.
S_d	: teneur surfacique en mottes delta.
S_{1n}	: teneur surfacique en mottes delta fissurées à 1 niveau.
S_{2n}	: teneur surfacique en mottes delta fissurées à 2 niveaux.
S_{3n}	: teneur surfacique en mottes delta fissurées à 3 niveaux et plus.
S_g	: teneur surfacique en mottes gamma.
t_f	: teneur surfacique en terre fine.
S_{vj}	: teneur surfacique en vides internes.
S_{vs}	: teneur surfacique en vides externes.
S_{db}	: teneur surfacique en mottes deltabis.
S_{ddb}	: teneur surfacique en mottes delta et deltabis.
SD	: teneur surfacique en mottes delta (et deltabis) fissurées et non fissurées.
S_{gtf}	: teneur surfacique en mottes gamma et en terre fine.
S_{2S3n}	: teneur surfacique en mottes fissurées à 2 niveaux et plus.

B. NOTATIONS MECANQUES.

F_v	: résultante verticale de l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage de la charrue.
F_h	: résultante horizontale de l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage de la charrue.
F_x	: composante horizontale de l'effort de traction utile du corps de charrue.
F_p	: frottement sur les pièces d'appui.
R_j	: moment résistant au roulement sur la roue de jauge.
F_{ch}	: résultante des forces appliquées sur le corps de la charrue dans le plan horizontal.
H	: composante horizontale selon O_x (dans le sens d'avancement de la charrue) des forces de traction utiles.
S	: composante latérale selon O_y des forces de traction utiles.
V	: composante verticale selon O_z des forces de traction utiles.
Q_f	: forces parasites liées au frottement du contresep, du talon et du coutre contre la muraille.
Q_j	: réaction sur la pièce d'appui.
Q_w	: poids sur la roue de jauge.
μ	: coefficient de frottement sol-métal.

δ	: angle de frottement sol-métal.
σ	: coefficient de résistance au roulement.
R_n	: réaction normale à la surface au point considéré.
R_t	: réaction tangentielle à la surface au point considéré.
R_c	: résistance pure à la coupe.
θ	: angle entre R_t et l'axe X.
ψ	: angle entre R_t et l'axe Y.
ϵ	: angle entre v_b et l'axe X.
v_e	: vitesse de la bande de terre par rapport au système.
v_b	: vitesse de la bande de terre par rapport à notre référentiel.
v_t	: vitesse d'avancement du tracteur.
α	: angle d'entrure du soc.
β	: angle de cisaillement.
ϕ	: angle de frottement interne.
G	: poids de la bande de terre.
N_1	: résistance normale sur la face avant.
C	: cohésion du sol.
A_1	: aire de cisaillement.
F_a	: force d'inertie.
m	: masse sur le versoir.
γ	: densité du sol humide.
b	: largeur de la section travaillée.
d	: profondeur de labour.
d_t	: hauteur de la bande de terre.
l	: longueur de la bande de terre.
l_0	: valeur minimale de l .
L_1	: valeur maximale de l .
l_1	: longueur de la bande sur le soc.
l_2	: longueur de la bande sur le versoir.
l_s	: longueur transversale du soc.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	1
INTRODUCTION	5
1) Approche comparée du machiniste et de l'agronome quant à l'étude du travail du sol	7
2) Difficultés qui en résultent pour prévoir l'évolution de l'état d'un sol au cours des opérations de travail du sol	9
3) Présentation de la démarche adoptée dans le cas de l'étude d'une opération de travail du sol : le labour	10
a) <i>Justification du choix de l'opération labour</i>	10
b) <i>Démarche adoptée</i>	11
CHAPITRE I : POSITION DU PROBLEME ET DEFINITION DES TRAITEMENTS POUR L'ANALYSE DES MODIFICATIONS DE L'ETAT DU SOL AU COURS DU LABOUR	15
A. EXIGENCES POUR L'ANALYSE DES MODIFICATIONS DE L'ETAT DU SOL AU COURS DU LABOUR	17
B. DEFINITION ET CARACTERISATION DE LA STRUCTURE DU SOL	19
1) Définitions et approches de la structure du sol	19
2) L'analyse de la porosité.	20
3) La description du profil cultural	21
a) <i>Intérêt</i>	21
b) <i>Méthode</i>	23
4) Conséquences pour la caractérisation des états structuraux	25
5) Conclusion	27
C. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA VARIABILITE DES ETATS OBSERVES APRES LABOUR ET DES FACTEURS POUVANT EN ETRE L'ORIGINE	28
I. VARIABILITE DES ETATS OBSERVES APRES LABOUR	28
1) Constat	28
2) Grille d'interprétation des effets du labour qui en résulte	29
II. FACTEURS A L'ORIGINE DES DIFFERENCES OBSERVEES	29
1) La résistance du sol	29
a) <i>Particularité des milieux anisotropes et hétérogènes</i>	29
b) <i>Données de la mécanique en milieux homogènes et isotropes</i>	31
a) <i>Les relations contraintes-déformation</i>	31
b) <i>Facteurs conditionnant le comportement du sol</i>	32
2) Contraintes exercées par l'outil	35
a) <i>Description de l'outil</i>	35
b) <i>Facteurs modifiant les contraintes exercées par l'outil</i>	36
III. CONCLUSION	37
D. PRINCIPES DES TRAITEMENTS	38
1) Justification du choix des facteurs concernant le sol et l'outil	38
2) Principes des traitements	39
3) Conclusion	41
E. CONCLUSION	42

CHAPITRE II : PROTOCOLE ET CONDITIONS D'EXECUTION POUR L'ANALYSE DE LA RELATION "ETAT INITIAL-ETAT TRANSFORME" AU COURS DU LABOUR	43
A. CARACTERISATION DE L'ETAT PHYSIQUE DU SOL	45
I. ANALYSE MORPHOLOGIQUE DE L'ETAT STRUCTURAL IN SITU	45
1) Plan de sondage dans la parcelle	45
a) <i>Avant labour</i>	45
b) <i>Après labour</i>	46
2) Méthode d'analyse des profils	46
a) <i>Préparation du profil</i>	47
b) <i>Procédure photographique</i>	49
c) <i>Analyse des photos au laboratoire</i>	50
d) <i>Traitement informatique du document final</i>	51
e) <i>Conclusion</i>	52
II. CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL	53
1) Mesure de la densité avant labour	53
a) <i>Techniques de mesure</i>	53
b) <i>Mesures effectuées</i>	54
2) Evaluation de la densité du sol après labour	54
3) Analyse de l'espace poral	55
III. CARACTERISATION DE L'ETAT D'HYDRATATION	57
IV. CONCLUSION : Avantages et inconvénients de la caractérisation	57
B. CHOIX DE L'EMPLACEMENT DES TRAITEMENTS	61
I. CARTOGRAPHIE DES ETATS STRUCTURAUX EN PRESENCE SUR LA PARCELLE AVANT TASSEMENT	61
1) Analyse statistique descriptive	62
2) Interprétation spatiale des différences de résistance observées	62
3) Choix des emplacements des traitements expérimentaux	67
II. CONDITIONS DE REALISATION DES TRAITEMENTS	69
III. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES ETATS OBTENUS	71
1) Caractérisation morphologique	71
2) Caractérisation de l'espace poral	75
a) <i>Description des profils de densité</i>	75
b) <i>Analyse de la répartition de l'espace poral</i>	77
IV. CONDITIONS DE REALISATION DU LABOUR	78
V. CONCLUSION	81
C. DETERMINATION DES VARIABLES OPERATOIRES POUR DECRIRE LA VARIABILITE DE L'ETAT STRUCTURAL DU SOL	82
I. STRATEGIE D'OBSERVATION	82
II. DETERMINATION DES VARIABLES REPRESENTATIVES DE L'EFFET DIRECT DU LABOUR	84
1) Analyse de la variabilité des surfaces occupées par les divers objets	84
a) <i>Analyse statistique descriptive :</i> <i>détermination des critères de description</i>	84

b) <i>Description de la variabilité et tests d'hypothèse quant à son origine</i>	86
c) <i>Conséquences sur les variables retenues</i>	91
2) Analyse de la répartition des calibres	91
a) <i>Critères de description</i>	91
b) <i>Analyse de la distribution des calibres</i>	92
c) <i>Conséquences sur les variables retenues</i>	95
3) Conclusion	95
D. CONCLUSION	96
CHAPITRE III : RESULTATS CONCERNANT L'ANALYSE DE LA RELATION "ETAT INITIAL-ETAT TRANSFORME"	97
A. ANALYSE DE LA VARIABILITE DE L'ETAT STRUCTURAL DU SOL AVANT LABOUR	99
I. ANALYSE DE LA VARIABILITE DES TYPES DE MOTTES ET DES VIDES	99
1) Analyse statistique descriptive	99
2) Caractérisation de la variabilité : Effet des traitements	100
a) <i>Les traitements fortement tassés TT1 et TT2</i>	101
b) <i>Le traitement tassé modérément T1</i>	101
c) <i>Le traitement non tassé NT</i>	102
3) Conclusion	103
II. ANALYSE DE LA REPARTITION DES CALIBRES	103
1) Analyse statistique descriptive	103
2) Caractérisation de la variabilité : Effet des traitements	105
a) <i>Les traitements tassés</i>	105
b) <i>Le traitement non tassé</i>	106
3) Conclusion	106
III. CONCLUSION : DEFINITION A POSTERIORI DES TRAITEMENTS AVANT LABOUR	106
B. ANALYSE DE LA VARIABILITE DE L'ETAT STRUCTURAL APRES LABOUR	108
I. ANALYSE DE LA VARIABILITE DES TYPES DE MOTTES ET DES VIDES	108
1) Analyse statistique descriptive	108
2) Caractérisation de la variabilité	112
3) Conclusion	112
II. ANALYSE DE LA VARIABILITE DES CALIBRES	113
1) Analyse de la variabilité de l'importance des calibres dans la section travaillée	113
a) <i>Analyse statistique descriptive</i>	113
b) <i>Caractérisation des états observés</i>	115
2) Etude de la répartition des calibres au sein des mottes delta et deltafissurées	117
a) <i>Méthode d'analyse adoptée</i>	117
b) <i>Caractérisation des états observés</i>	121
3) Conclusion	122
III. CONFRONTATION ENTRE TYPES DE MOTTES ET CALIBRES	122
1) Test de l'effet des traitements	122
2) Etude de la relation entre niveau de fissuration et taille des mottes	125
3) Conclusion	125
IV. CONCLUSION : Caractérisation de l'effet des traitements	125

C. COMPARAISONS DES ETATS STRUCTURAUX AVANT ET APRES LABOUR :	
ANALYSE DE L'EVOLUTION DES ETATS	129
I. INTERPRETATION HISTORIQUE DES ETATS OBSERVES	130
II. ANALYSE DE L'EVOLUTION GLOBALE DU SYSTEME ETUDIE	130
1) Mises en correspondance possibles	130
2) Evolution du volume de l'horizon labouré dans TT1, TT2 et NT	134
3) Conclusion	135
III. ORIGINE DE LA VARIATION DE VOLUME	135
1) Hypothèses	135
2) Analyse des hypothèses	135
a) <i>Résultats des bilans de volumes pour les fractions étudiées</i>	135
b) <i>Calculs d'erreurs sur les résultats</i>	137
c) <i>Test de sensibilité des résultats</i>	140
d) <i>Conclusion</i>	140
3) Confrontation des résultats avec ceux obtenus par l'analyse de la porosité	141
4) Conclusion	142
IV. EVOLUTION DE LA REPARTITION DE L'ESPACE PORAL AU SEIN DES MOTTES DONT LE VOLUME GLOBAL VARIE PEU	142
1) Hypothèses	142
2) Evolution de la fissuration	142
a) <i>Description</i>	142
b) <i>Analyse de l'hypothèse d'un compactage au cours du labour</i>	145
c) <i>Conclusion</i>	146
3) Variation du calibre des mottes delta et deltaxissurées au cours du labour	146
a) <i>Hypothèses</i>	146
b) <i>Analyse des hypothèses</i>	147
4) Relation entre fissuration et réduction de calibre :	
modification des hypothèses	149
5) Effet de la vitesse	153
6) Conclusion	153
V. CONCLUSION	155
D. RESULTATS DANS D'AUTRES CONDITIONS D'HUMIDITE ET DE TEXTURE AU LABOUR	156
I. DEFORMATION DE LA RELATION ETAT INITIAL-ETAT TRANSFORME	156
1) Caractérisation des conditions expérimentales	156
2) Résultats : variation de l'effet des traitements sur l'état final selon les conditions expérimentales	158
3) Conclusion	161
II. VERIFICATION DE LA HIERARCHIE ETABLIE ENTRE LES FACTEURS ETAT STRUCTURAL ET VITESSE DE LABOUR DANS D'AUTRES CONDITIONS DE TEXTURE ET D'HUMIDITE	161
1) Variations introduites dans les conditions expérimentales et les méthodes de caractérisation utilisées	162
2) Conditions d'exécution et résultats obtenus lors de la première campagne (P89)	163
a) <i>Conditions</i>	163
b) <i>Résultats</i>	164

3) Conditions d'exécution et résultats obtenus lors de la deuxième campagne (H90)	166
a) Conditions	166
b) Résultats	166
4) Discussion des résultats obtenus lors des deux campagnes	168
5) Conclusion	170
III. CONCLUSION	170
E. CONCLUSION	171
CHAPITRE IV : EFFET DE L'ETAT STRUCTURAL DU SOL SUR L'EFFORT RESISTANT DE LA CHARRUE	173
A. ETAT DES CONNAISSANCES ET ANALYSE DES FACTEURS MODIFIANT L'EFFORT DE TRACTION AU NIVEAU DE LA BARRE D'ATTELAGE	176
I. DECOMPOSITION DE L'EFFORT RESISTANT DE LA CHARRUE	176
II. FROTTEMENT SUR LES PIECES D'APPUI - RESISTANCE AU NIVEAU DE LA ROUE DE JAUGE - FORCES PARASITES	177
III. RESULTANTE DANS LE PLAN HORIZONTAL DES EFFORTS REELLEMENT UTILES Fch	179
1) Résistance au niveau du coutre	179
2) Résistance au niveau du soc et du versoir	180
a) Justification et limites du modèle adopté	180
b) Analyse des forces au niveau du soc et du versoir	182
c) Analyse des forces extérieures au niveau de la bande de terre	185
IV. HYPOTHESES SUR LES FACTEURS MODIFIANT L'EFFORT UTILE	187
1) Facteurs susceptibles de modifier l'effort utile	187
2) Facteurs susceptibles de modifier la trajectoire de la bande de terre sur le versoir	188
3) Conséquences pour l'analyse de l'effort	189
V. CONCLUSION : Hypothèses sur la contribution de l'état structural à l'effort de traction horizontal de la charrue	191
B. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES RELATIONS ENTRE L'EFFORT DE TRACTION AU NIVEAU DE LA BARRE D'ATTELAGE ET LE TRAVAIL EFFECTUE	192
I. BESOINS EN ENERGIE AUPRES DU SYSTEME TRACTEUR-OUTIL ET TRAVAIL EFFECTUE AU NIVEAU DE LA BANDE DE LABOUR	192
1) Besoins en énergie	192
2) Facteurs susceptibles de modifier le bilan énergétique : effet de la vitesse	194
II. CONCLUSION	196
C. PROTOCOLE DE CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT DE L'OUTIL	196
I. CAHIER DES CHARGES	196

II. APPAREILS DE MESURES	197
1) Les capteurs	197
a) <i>Mesure de l'effort de traction horizontal</i>	197
b) <i>Mesure de la vitesse d'avancement</i>	198
c) <i>Mesure de la profondeur de labour</i>	198
2) Système de saisie et d'enregistrement des données	199
III. CONCLUSION	200
D. RESULTATS CONCERNANT L'EFFET DE L'ETAT STRUCTURAL DU SOL SUR L'EFFORT DE TRACTION AU NIVEAU DE LA BARRE D'ATTELAGE	201
I. ANALYSE DES VARIATIONS DE L'EFFORT DE TRACTION EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ET DE LA VITESSE : EFFET DE L'ETAT STRUCTURAL	201
1) Principe des traitements	201
2) Conditions de réalisation des traitements	201
a) <i>Etat physique</i>	201
a) <i>Etat structural</i>	201
b) <i>Densité</i>	202
g) <i>Humidité au labour</i>	202
b) <i>Réglages</i>	204
a) <i>Profondeur</i>	204
b) <i>Vitesse</i>	204
g) <i>Largeur</i>	205
3) Evolution de l'effort de traction en fonction de la profondeur	205
4) Evolution de l'effort en fonction du produit masse volumique * section travaillée	207
5) Extrapolation des résultats à d'autres conditions de texture et d'humidité	211
6) Conclusion	213
II. RELATION ENTRE TRAVAIL EFFECTUE ET BESOINS EN ENERGIE : EFFET DE L'ETAT STRUCTURAL SUR LE DEPLACEMENT DE LA BANDE DE LABOUR	214
1) Liaison entre effort et travail effectué	214
2) Déplacement des bandes de labour	215
a) <i>Mode d'évaluation du déplacement</i>	215
b) <i>Ecart au modèle pour le barycentre</i>	218
c) <i>Ecart au modèle pour le point de jetée maximale</i>	218
3) Conclusion	219
E. CONCLUSION	220
CONCLUSION GENERALE	221

AVANT-PROPOS

Les progrès réalisés dans le domaine de l'application des sciences à l'agriculture dans la deuxième moitié du XXème siècle en France ont surtout concerné la maîtrise des pesticides, le raisonnement de la fertilisation azotée, le choix des variétés (Pesson, 1990 ; Boulaine, 1990 ; Cauderon, 1990). Ces domaines offraient en effet des perspectives prometteuses pour les agriculteurs, qui se sont concrétisées par une augmentation importante des rendements (le rendement moyen du blé passe de 20 à 60 q/ha de 1950 à 1989), l'extension de l'aire de culture de certaines espèces (maïs, colza, tournesol), une réduction des aléas et pertes dues aux maladies et ravageurs des cultures.

On peut ainsi noter quelques étapes clés : l'apparition des insecticides organiques de synthèse (DDT, 1939 ; pyréthrinoides de synthèse, 1948), de produits toxiques contre les rongeurs (anticoagulants, 1945), la découverte de la stérilité mâle à déterminisme cytoplasmique uniquement transmis par la mère qui facilite le contrôle de la pollinisation chez les plantes à fleurs sexuées (1950), la fertilisation azotée raisonnée (Hébert, 1969 ; Rémy & Hébert, 1977). Le développement de ces techniques de production et la résolution des problèmes qu'elles induisent (en particulier déséquilibre des biocénoses, résidus, développement de résistances) offraient un large champ d'investigation pour les agronomes.

Ceux-ci pouvaient supposer une réponse repérable des facteurs étudiés et mesurable sur les rendements. Ce n'était pas le cas pour l'état du sol qui est une condition pour la croissance et le développement des plantes (Hénin *et al.*, 1969). L'amélioration des autres techniques réduisait par ailleurs l'intérêt de certaines fonctions du travail du sol comme par exemple le désherbage.

Dans le domaine des techniques de travail du sol les progrès sont difficilement dissociables de la mécanisation avec notamment le développement du labour et l'amélioration des charrues au cours du XIXème siècle, mais aussi plus récemment avec le développement des combinaisons d'outils, des outils animés, le perfectionnement des pneumatiques. Les préoccupations principales étaient la détermination des possibilités d'intervention et la réduction des temps de travaux, qui a conduit à de nombreuses tentatives de simplification du travail du sol dans les années soixante.

Le souci de la qualité du travail et de sa rentabilité est fort ancien (rapport de Moll, 1962, cité par Mérieux *et al.*, 1990). Hénin dans sa première édition du "Profil Cultural" (1960) consacre un chapitre à l'amélioration du profil cultural par les techniques de travail du sol. Sur la base d'observations morphologiques *a posteriori*, il compare les effets de différentes profondeurs de labour, de différentes techniques de travail du sol sur l'état du profil cultural.

Manichon & Sebillotte (1973) s'emploient à théoriser cette approche et sur la base d'une série d'enquêtes proposent un modèle simple de prévision de l'état du profil cultural en trois classes dont la fréquence d'obtention dépend des outils utilisés pour la récolte du précédent et la mise en place du maïs et de leurs conditions d'emploi. Environ deux tiers des situations correspondent à une prévision correcte. L'amélioration de la méthode de diagnostic (Manichon, 1982-a) renforce l'adéquation entre état prédit et état observé. Mais, l'ensemble de ces travaux repose sur le diagnostic de situations différenciées et permet essentiellement un jugement. Il est plus difficile d'en tirer des règles d'aide à la décision (Sebillotte, 1987).

Les progrès acquis sont difficilement mesurables. Il n'est souvent pas possible de créer au champ des situations dans lesquelles il soit facile d'isoler des groupes de facteurs : c'est ainsi que la lutte chimique contre les adventices a permis de créer des états du sol différents de ceux du labour classique et d'en étudier les répercussions sur les plantes dans les conditions du champ (Sebillotte, 1978-a). De plus, les actes techniques concernés font partie de ceux que Sebillotte (1978-b) définit comme ne donnant pas un résultat de qualité constante selon les conditions de milieu (courbe de réponse large) et qu'il oppose aux actes pour lesquels la qualité du résultat est sensiblement constante (pic de réponse) quels que soient les états du milieu rencontrés les années précédentes (par exemple application d'une dose de semis). La définition de références est beaucoup plus difficile dans le premier cas car celles-ci doivent comporter soit les conditions de milieu à respecter pour obtenir un résultat donné avec un matériel, soit une méthode de calcul, fondée sur une modélisation du fonctionnement du système considéré.

Améliorer la fertilité physique se heurte à trois difficultés principales (Sebillotte, 1990-a) :

- l'impossibilité d'établir une relation directe entre fertilité physique et rendement ;
- l'impossibilité de corriger instantanément des états défavorables pendant la culture ;
- la difficulté de prévoir les évolutions des états de fertilité physique au cours de la culture, et de prévoir les effets des techniques culturales ; les connaissances sur l'évolution ne sont connues qu'*a posteriori*.

Or, le sol est un milieu d'échanges d'eau, de minéraux, d'oxygène, de chaleur, le siège de réactions bactériologiques dont les contacts avec la plante se gèrent dans un système de contraintes bilatérales : contraintes mécaniques à l'enracinement, résistances aux transferts (Russel, 1988).

L'agronome s'intéresse donc de plus en plus à l'étude de l'état physique du sol en relation avec :

- la production végétale ; l'état du sol est en effet une condition limitante pour :
 - * la mise en place des capteurs aériens ; il conditionne en particulier la germination-levée des cultures (Fleury, 1982 ; Bruckler, 1983 ; Richard, 1988 ; Dürr *et al.*, 1990) ;
 - * le développement et le fonctionnement du système racinaire (Maertens, 1964 ; Ellis & Barnes, 1973 ; Callot *et al.*, 1982 ; Tardieu, 1984 ; Picard *et al.*, 1985 ; Maertens *et al.*, 1987 ; Masse *et al.*, 1988 ; Tardieu, 1989) ;
- le reste de l'environnement (Hénin, 1978), en particulier en raison de ses conséquences sur les propriétés de transferts et par ce biais sur le devenir des polluants ; l'évaluation des risques de lixiviation de l'azote implique en effet de prévoir les profondeurs maximales accessibles par les racines, les vitesses de colonisation des racines en profondeur, la minéralisation des matières organiques, la vitesse de percolation des nitrates

(Sebillotte & Meynard, 1990) ; l'amélioration des connaissances sur les comportements physiques et chimiques des sols laisse espérer des progrès dans ce domaine.

L'agronome doit être en mesure de déterminer les conditions les plus favorables à la réalisation d'un état physique donné, en particulier de prévoir ses transformations par l'homme.

L'agriculteur modifie en effet par ses pratiques les états du sol et les propriétés physiques qui leur sont associées (Low, 1972) et doit d'autant mieux maîtriser ses pratiques que les répercussions du travail du sol sur les charges réelles d'une exploitation sont devenues non négligeables :

- outre l'amortissement du matériel chaque opération représente un coût en main-d'oeuvre et en charges proportionnelles ; à titre d'exemple : les réductions de temps d'implantation des cultures peuvent aller de 1 à 3h/ha entre une implantation à base de labour et une implantation à base de travail superficiel (Barthelemy & Boisgontier, 1990) ; la charrue va deux fois moins vite qu'un semoir (1,4 à 2h/ha pour un labour avec une charrue à trois corps réversibles, contre 0,5 à 1h/ha pour un semis avec un semoir de 3 ou 4 m) ; un labour en sol de limon entraîne une consommation d'environ 25 l/ha de fuel contre moins de 8 l/ha pour un semis (Boisgontier *et al.*, 1988 ; Boisgontier & Barthelemy, 1989) ; ces valeurs sont néanmoins extrêmement variables ;

- ce coût doit être confronté aux conséquences à court et long termes des états obtenus sur le produit de l'exploitation.

Les choix cultureux de l'agriculteur sont déterminés par les circonstances économiques qui vont fixer son assolement et ses équipements. La demande de celui-ci concerne donc principalement les risques qu'il court en agissant d'une manière ou d'une autre et les solutions pour diminuer ces risques (Sebillotte, 1990-a).

Dans la pratique, l'agriculteur a en fait forgé un ensemble de règles (Cerf & Sebillotte, 1988) dont il a la conviction qu'elles lui permettent d'obtenir avec un maximum de chances la combinaison optimale des techniques culturales, une fois fixée pour une série de champs (sole) les objectifs de rendements (Sebillotte, 1990-b). L'expérience ainsi acquise lui sert de cadre d'une année sur l'autre (Sebillotte & Soler, 1988) et il ne changera ses processus de décision que si les propositions qu'on lui fait lui paraissent acceptables. Il a donc besoin d'instruments de diagnostic pour rechercher les causes d'un état défavorable mais aussi de prévision pour prendre de meilleures décisions au regard de ses objectifs.

Notre travail se situe dans la seconde perspective.

INTRODUCTION

Dans l'avant-propos, nous avons évoqué les raisons qui, en tant qu'agronome, nous incitent à nous intéresser aux techniques de travail du sol. Nous avons en particulier souligné **la nécessité de pouvoir prévoir l'évolution de l'état d'un sol au cours des opérations de travail du sol** ce que nous sommes actuellement dans l'incapacité de faire.

Les deux disciplines que concerne le travail du sol, l'Agronomie et le Machinisme agricole, ont jusqu'à présent abordé les relations entre la machine et le sol sous des angles différents (Manichon, 1982-c) et nous allons analyser en quoi cela a rendu jusqu'à présent difficile la prévision des transformations du sol par l'homme. Cela nous permettra alors d'introduire la démarche que nous avons adoptée pour dépasser ces difficultés et l'échelle à laquelle nous avons abordé le problème.

1) Approche comparée du machiniste et de l'agronome quant à l'étude du travail du sol

Les préoccupations majeures du machiniste et de l'agronome sont relativement différentes.

Le machiniste a cherché à construire des outils rationnels sur le plan énergétique étant donné l'importance des charges de ces opérations : charges proportionnelles mais aussi investissements en matériel (en particulier, puissance nécessaire des tracteurs).

Il s'est donc surtout intéressé :

- aux capacités de traction des tracteurs ;
- aux pertes de puissance par glissement ;
- à la puissance utilisée par l'outil lors du travail, produit de la vitesse d'avancement par l'effort de traction.

Il a privilégié l'étude des relations entre les réglages de l'outil et les réactions de celui-ci à la résistance du sol. Il a cherché à déterminer les réglages permettant de minimiser l'effort de traction et par conséquent, la puissance utilisée par l'outil. Il voulait ainsi diminuer la puissance des tracteurs utilisés pour un travail donné et donc la consommation énergétique.

Ses études ont donc porté sur la mesure des variations de l'effort de traction nécessaire pour déplacer l'outil en milieux naturels ou artificiels en fonction de paramètres tels que vitesse (Stafford, 1979), profondeur (Spoor & Godwin, 1978), largeur de travail (Perumpral & Desai, 1979), forme de l'outil, plutôt que sur les états effectivement atteints. Dans ce domaine, il a adopté une attitude de constat modifiant plus ou moins les outils en fonction du jugement des agriculteurs, utilisés comme experts, sans chercher réellement à prédire les états du sol, ni comprendre les mécanismes de transformation en jeu.

D'un autre côté l'agronome a cherché à répondre aux besoins de diagnostics concernant l'état du sol à un moment donné :

- en lien avec la plante : conséquences d'un état donné sur la croissance et le développement de celle-ci (Chopart & Nicou, 1976 ; Van Loon & Bouma, 1978 ; Brereton *et al.*, 1986) en particulier influence de cet état sur les prélèvements en eau et en nutriments (Tardieu & Manichon 1986 ; Masle & Passioura, 1987 ; Tardieu & Manichon 1987-a ; Tardieu 1987, 1990) ;

- dans le cadre de comparaisons d'histoires culturelles et de modes de culture ; il a pu ainsi :

- * élaborer dans le cas d'un système de culture de maïs en continu les conditions d'établissement d'un état structural favorable ou défavorable en fonction de l'humidité à la récolte et au labour, du nombre de passage, du poids des outils et de l'humidité au moment des façons superficielles (Manichon & Sebillotte, 1975 ; Manichon, 1982-a, Manichon & Roger-Estrade, 1988) ;

- * montrer comment une analyse de la variabilité spatiale des états structuraux du sol résultant de compactages par les roues d'engins permettait de comprendre un problème technique de croissance des salades aux répercussions importantes sur l'économie maraîchère du Sud-Ouest (Manichon & Roger-Estrade, 1989).

Il a abordé l'étude des systèmes de culture *(1)* dans le cadre de diagnostics localisés dans le temps. Un nouvel enjeu est de l'envisager sous l'angle d'une construction *a priori* d'une suite d'opérations culturelles ce qu'il a peu fait jusqu'à présent (Sebillotte, 1990-c).

Le sol n'avait pas le même statut dans les deux démarches :

- **pour le machiniste, le sol était avant tout un système générateur de forces résistantes vis-à-vis de l'outil** ; il n' a donc cherché à caractériser son comportement que par un nombre limité de paramètres facilement mesurables, supposant son homogénéité et son isotropie à l'échelle des mesures effectuées :

- * mesures d'effort à l'échelle de l'outil (Billot, 1974) ;

- * mesures d'effort à l'échelle des pièces travaillantes : la dent (Koolen & Kuipers, 1983), le corps de charrue (Smith *et al.*, 1989) ; le sol était alors considéré comme un cône de poussée qui se forme en avant de la dent (Payne, 1956) ou du soc (Nichols *et al.*, 1958) ;

- * étude de la distribution des pressions à la surface des pièces travaillantes (Mayauskas, 1958) voire dans le sol dans certaines études de laboratoire (Gupta & Surendranath, 1989) ; plus le volume scruté est important, plus l'hypothèse d'isotropie et d'homogénéité communément faite devient inacceptable et le nombre de mesures à effectuer pour caractériser le sol devient important si l'on désire caractériser la distribution des forces au sein de l'outil (Cassel, 1982) ; Van Ouwerkerk & Koolen (1988) reprochent que le manque de données conduise alors de nombreux chercheurs à faire des extrapolations abusives.

(1) Ensemble des modalités techniques mises en oeuvre sur des parcelles traitées de manière identique que l'on définit par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués aux cultures (Sebillotte, 1975 ; Sebillotte, 1990-c).

- pour l'agronome, c'était un milieu de transfert soumis à des évolutions plus ou moins rapides sous l'action de contraintes extérieures et destiné fondamentalement à être le support des cultures ; il a donc orienté préférentiellement ses études vers la qualité des états du sol obtenus par son travail et vers l'analyse de la variabilité spatiale des états créés ; il a adopté des méthodes de caractérisation du sol fort différentes qui prennent en compte la disposition spatiale des éléments constitutifs du sol et s'est peu intéressé à la complexité des dynamiques de déformation et de rupture du sol mises en jeu par la forme et les conditions d'emploi des outils.

2) Difficultés qui en résultent pour prévoir l'évolution de l'état d'un sol au cours des opérations de travail du sol

Pour prédire un état final du sol, étant donné des conditions initiales et les caractéristiques des modes opératoires des outils, il faut être capable de définir ceux-ci ainsi que l'application des forces et la réaction du sol à des forces appliquées de manière variable (Hillel, 1980).

Les variables utilisées par les deux disciplines étant de nature différente, il s'ensuit l'impossibilité de relier les modèles établis par chaque discipline comme le montrent certains auteurs (Schafer & Johnson, 1982 ; Hadas et al., 1988 ; Conclusions du NATO Advanced Research Workshop, 1988 ; Bradford *et al.*, 1989 ; Kuipers & Koolen, 1989), et par conséquent d'utiliser directement les connaissances qu'elles fournissent.

Il en résulte la difficulté de fournir à l'agriculteur les critères de choix nécessaires à :

- l'établissement d'une succession d'opérations ;
- l'application d'une opération donnée :

- * choix de la date d'intervention qui prenne en compte :

- . l'état hydrique du sol lors de l'opération ;

- . les possibilités ultérieures d'évolution sous l'action du climat pouvant entraîner des différences de croissance des plantes comme cela a été observé dans le cas du maïs (Pellerin, 1986) ;

- * choix des réglages à donner à l'outil.

Les travaux de Manichon & Roger-Estrade (1990), sur l'analyse de l'évolution des volumes compactés par les roues d'engins au cours de l'itinéraire technique pratiqué, ouvrent néanmoins des perspectives intéressantes dans le premier cas. Nous avons choisi de nous intéresser au second, c'est-à-dire de nous placer dans la perspective d'un choix tactique de l'agriculteur (Billot, 1989) face à une opération donnée.

3) Présentation de la démarche adoptée dans le cas de l'étude d'une opération de travail du sol : le labour

a) *Justification du choix de l'opération labour*

Nous avons choisi de faire porter notre étude sur le labour car :

- c'est une opération qui représente une lourde charge pour l'agriculteur comme nous l'avons mentionné dans l'avant-propos ; son utilité est donc remise en cause par les progrès acquis dans le domaine des techniques de simplification du travail du sol qui permettent de minimiser le nombre de passages sur la parcelle ;

- c'est une opération qui a pour but de modifier l'état du sol sur une épaisseur relativement importante, induisant simultanément une fragmentation et un déplacement de la terre au sein de la couche labourée ; elle met donc en jeu divers processus mécaniques dont il est essentiel de pouvoir combiner l'analyse.

Les études menées sur les comparaisons entre labour et techniques simplifiées de travail du sol n'ont pas permis de déterminer si les différences observées dans les systèmes de culture correspondant aux deux types de techniques étaient liées aux opérations elles-mêmes ou à leurs conditions d'emploi. Cet échec provient de la difficulté actuelle de relier des différences d'états du sol observées aux différences notées entre labour et techniques simplifiées qui portent sur :

- des comportements physiques des sols différents (circulation de l'eau, de l'air, résistance mécanique à l'enracinement, régime thermique, stabilité) (Frankinet & Ben Harrath, 1976 ; Goss *et al.*, 1978 ; Hamblin & Tennant, 1979 ; Douglas & Goss, 1982) ;

- des infestations de mauvaises herbes ou de maladies (Baumer, 1976 ; Holmes, 1976 ; Parmentier, 1976) ;

- des différences de nutrition N, P, K associées à des colonisations racinaires différentes (Boiffin *et al.*, 1976 ; Decoq & Riga, 1976) ;

- des différences d'incorporation de matières organiques sans analyser l'importance de la profondeur d'enfouissement et donc du réglage de l'outil (Christian & Miller, 1986).

Dans d'autres travaux que ceux précédemment mentionnés, des différences d'organisation structurale du sol ont été notées (Fourbet, 1975) mais sans aucune information sur le fonctionnement des outils, les résultats immédiats de leur action et l'évolution des états créés. Il est donc impossible de porter un jugement sur les opérations. Lors d'expérimentations de l'ITCF sur la simplification des techniques de travail du sol en sols limono-argileux, argilo-limoneux et limono-argilosableux, il a été montré à ce sujet qu'il était impossible de déterminer un état structural caractéristique d'un traitement en raison de la mauvaise connaissance de l'état avant travail, des successions d'outils, de leurs conditions d'emploi, ainsi que de l'effet du climat sur l'état créé entre la date d'application du traitement et la date d'observation des états du sol. Seul le volume travaillé permettait de distinguer les traitements quel que soit l'essai (Manichon & Bodet, 1976).

Seul un travail récent sur la localisation du phosphore dans le sol a cherché à relier les différences d'alimentation observées au mode d'action des outils (épaisseurs des couches travaillées et déplacement des volumes de terre) (Roger-Estrade, 1991) laissant entrevoir l'intérêt d'une analyse fine de ceux-ci.

Une meilleure connaissance des relations entre les caractéristiques pédogénétiques et le fonctionnement des plantes devrait permettre de déterminer les conditions où le labour est superflu et celles où les autres techniques sont insuffisantes compte-tenu des objectifs visés.

Il paraît donc nécessaire de pouvoir identifier les situations où le labour modifie peu l'état du sol et où son intérêt se limite à :

- l'incorporation des débris végétaux, des matières fertilisantes et des pesticides ;
- la destruction des adventices ; le labour détruit en effet mécaniquement les adventices levées mais il entraîne aussi une diminution du taux de levée des graines liée à la profondeur d'enfouissement ; son rôle sur l'évolution du stock des graines est donc important (Debaecke, 1987).

b) Démarche adoptée

La démarche adoptée doit permettre d'évaluer simultanément :

- les modifications de l'état physique du sol au cours du travail ;
- l'interaction entre les contraintes exercées par l'outil et les réactions du sol qui leur sont associées si l'on veut pouvoir juger, mais aussi agir sur les modifications observées.

Elle implique donc de caractériser :

- l'état physique initial du sol ;
- son état après l'action de l'outil ;
- l'outil et les réglages utilisés ;
- le fonctionnement de l'outil que nous définissons comme la somme des réactions de l'outil à la résistance du sol.

C'est ainsi que Cordier *et al.* (1979) ont cherché à comparer différents traitements culturaux (labour, demi-labour, semis direct,) grâce à l'extériorisation par un couteur de différences de résistance du sol, sans toutefois dissocier l'effet de l'humidité de celui de la structure du sol.

Or, la caractérisation de l'état physique doit permettre d'analyser les conséquences de l'anisotropie et l'hétérogénéité des sols cultivés sur les transformations du sol sous l'action des outils. Ces deux caractéristiques propres à la couche travaillée par l'homme ont une origine liée à la répartition inégale et discontinue des contraintes anthropiques (roues, dents,...) et des contraintes climatiques (Manichon, 1988).

L'incidence particulière de l'organisation structurale du sol sur les transformations réalisées est en effet fort probable car :

- des observations qualitatives au champ font état de résultats du labour différents dans des sols de même texture correspondant à des états structuraux différents ; mais on restait à des corrélations entre états car l'absence de caractérisation de l'outil ne permettait pas de déterminer proprement l'effet de ce facteur (Manichon, 1987) ;
- des actions de compactage avant labour entraînent une fragmentation plus faible au labour sans qu'il soit possible de déterminer s'il s'agit d'un effet du volume travaillé ou de la façon dont sont associées les particules constitutives du sol (Koolen, 1978) ;
- certains auteurs ont réussi à obtenir les états structuraux qu'ils souhaitaient après labour par application d'itinéraires techniques ayant pour effet d'introduire une variation d'états structuraux initiaux ; il a en particulier été possible d'obtenir après labour un état souhaité avec de gros blocs compacts par application d'un tassement intense et homogène avant labour puis réalisation de celui-ci en conditions humides (Tardieu, 1984 ; Tardieu & Manichon, 1987-c) ;
- dans le cas de travaux superficiels, l'état initial modifie l'effet de passages multiples (Ojeniyi & Dexter, 1979).

Un volume de sol soumis à de nouvelles contraintes ne va pas se comporter 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 (Manichon, 1982-b). Il en résulte la difficulté de transposer au champ des résultats obtenus au laboratoire sur échantillons remaniés comme ceux de Canarache (1965), par exemple.

Pour étudier ce comportement non homogène il faut être capable de reproduire la variabilité des conditions de sols que l'on rencontre au champ. Cela est difficile au laboratoire, ce qui nous incite donc à effectuer au champ une étude du comportement du sol sous l'action de la charrue.

Par ailleurs, la caractérisation de l'outil et de son fonctionnement ne peut être dissociée de celle de l'ensemble tracteur-outil que l'on définit par :

- le tracteur utilisé ;
- son mode de conduite : lié au rapport de boîte de vitesse et au régime moteur choisis ;
- les caractéristiques de l'outil : son type (la charrue à soc dans notre cas), ses dimensions et formes, ses réglages (profondeur, aplomb, talonnage, dévers) à partir desquels profondeur et largeur de travail sont déterminés dans la plupart des cas.

Il est donc important de définir les paramètres de fonctionnement qui vont révéler les interactions entre l'outil et le sol.

Pour un régime moteur donné, la puissance fournie par le moteur et la consommation horaire varient dans le même sens. Des corrélations entre les deux variables ont pu être établies (d'après Janin & Gloker, 1983, cités par Aubry & Capdeville, 1985).

La puissance se retrouve sous forme de puissance utilisée par l'outil, puissance absorbée par les transmissions, puissance de glissement et puissance perdue par résistance au roulement (CNEEMA, 1964). Cette puissance fournie est le produit scalaire des vecteurs effort de traction et vitesse d'avancement du tracteur.

Dans la mesure où nous ne nous intéressons qu'aux effets des différences de travail observées sur le fonctionnement de l'ensemble tracteur-outil, notre étude doit se limiter à la puissance utilisée par l'outil qui dépend de :

- l'effort résistant de la charrue au niveau de la barre d'attelage qui se traduit par un effort de traction ;
- la vitesse d'avancement du tracteur.

L'analyse des relations entre les contraintes exercées par l'outil et la réaction du sol implique de connaître l'effet de l'anisotropie et de l'hétérogénéité de sols cultivés sur ces paramètres de fonctionnement.

L'étude des variations de ces paramètres de fonctionnement en relation avec les modifications d'état observées devrait permettre de déterminer si ce sont de bons indicateurs des interactions entre le sol et la machine et si nous pouvons discuter ainsi des modifications observées.

Il aurait été trop ambitieux de vouloir fournir de manière exhaustive les éléments nécessaires à la prévision de l'évolution de l'état d'un sol au cours du labour. Nous avons donc limité nos objectifs à :

- l'analyse de la relation entre l'état initial et l'état transformé dans quelques situations bien caractérisées ;
- l'étude de l'effet de l'état structural du sol sur l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage de manière à déterminer s'il est possible de juger des modifications observées au regard des variations du fonctionnement de l'outil.

Notre préoccupation étant essentiellement agronomique, nous avons délibérément privilégié le premier point en adoptant la démarche suivante : sur la base d'une analyse bibliographique, nous avons tout d'abord déterminé au chap. I :

- les critères nécessaires à l'étude des modifications de l'état du sol, en particulier les méthodes de caractérisation à utiliser ;
- les facteurs à faire varier pour être sûr de différencier les situations observées.

Au chap. II, nous avons appliqué les traitements et protocoles qui résultaient de cette analyse à l'étude des modifications de l'état du sol pour une situation bien caractérisée. Nous avons déterminé les variables opératoires pour la description de la variabilité de l'état structural du sol.

A l'aide des variables précédentes, nous avons cherché, au chap. III, à mettre en relation les variabilités d'état physique du sol avant et après labour, observées dans cette situation. Après avoir interprété l'évolution des états, nous avons étudié les résultats obtenus dans des situations caractérisées moins finement.

Au chap. IV, nous avons abordé le second point. Nous avons tout d'abord cherché à déterminer l'effet de l'état structural sur l'effort de traction sur la base d'une analyse bibliographique, l'effort étant pris comme indicateur du fonctionnement de l'ensemble tracteur-outil. Nous avons émis des hypothèses sur les lieux de l'action de l'état structural, l'allure des variations d'effort qui en résultent ainsi que les relations entre ce dernier et le travail effectué.

Les expérimentations ont été menées principalement en région parisienne, sur les parcelles de Grignon (78) et de Palaiseau (91) dont les caractéristiques sont les suivantes :

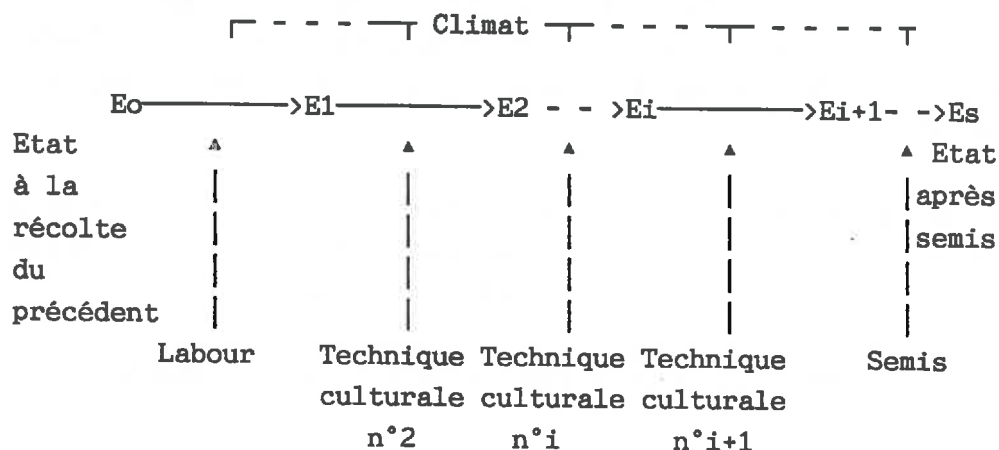
	GRIGNON	PALAISEAU 89	PALAISEAU 90
Précédent Antéprécédent	Blé Luzerne de 1 an	Maïs Blé	Blé Colza
Type de sol	Limon argileux	Limon	Limon
Analyse (%) :			
- Argile	25.9	16.2	18.0
- Limon fin	23.2	26.5	29.3
- Limon grossier	34.9	18.3	46.5
- Sable fin	12.1	24.9	4.3
- Sable grossier	3.9	14.1	1.9
- MO	2.1	2.2	1.7

Nous avons ensuite élargi la gamme des types de sols et systèmes de culture explorés ainsi que celles des climats en travaillant en Picardie (Mons), en Pays de Loire (La Jaillière) et en Midi-Pyrénées (Baziège). Les caractéristiques des sites seront présentées lors de leur étude.

CHAPITRE I :
POSITION DU PROBLEME ET DEFINITION DES TRAITEMENTS
POUR L'ANALYSE DES MODIFICATIONS DE L'ETAT DU SOL
AU COURS DU LABOUR

A. EXIGENCES POUR L'ANALYSE DES MODIFICATIONS DE L'ETAT DU SOL AU COURS DU LABOUR

Pour analyser des modifications de l'état du sol au cours du labour il faut pouvoir définir deux états, l'un avant labour (*l'état initial*), l'autre après labour (*l'état final*), et mesurer les changements survenus entre les deux états. Les états du milieu subissent des évolutions au cours de l'histoire culturale. Il est possible de schématiser ces évolutions entre la récolte du précédent et le semis du suivant (d'après Sebillotte 1982, 1990-a & d) :



Si l'on cherche à caractériser l'effet du labour sur l'ensemble de la couche labourée il faut donc se situer entre les états E_0 et E_1 . Une caractérisation ultérieure risque en effet d'introduire des confusions d'effet sur la partie de la couche labourée affectée par les techniques culturales suivantes.

Si l'on veut, de plus, limiter l'évolution sous l'action du climat, il faut que les états initiaux et finaux soient caractérisés aussi près que possible de l'opération labour.

L'établissement d'une relation entre état initial et état transformé implique alors de pouvoir :

- caractériser l'état initial et l'état final en se donnant les moyens de décrire l'anisotropie et l'hétérogénéité de la couche labourée ; il faut en particulier se donner les moyens de décrire la variabilité de l'état physique avant et après labour qui n'est pas forcément de même ordre dans les deux cas ; la caractérisation doit offrir avant et après labour les moyens d'avoir une vision spatiale de l'organisation de l'état du sol car :

- * **avant labour**, la localisation des éléments interfère probablement sur les processus mécaniques et se trouve modifiée par le fonctionnement de l'outil au cours du labour dans des proportions qu'il convient de chiffrer si l'on veut comprendre les processus en jeu ;

- * **après labour**, elle nous intéresse en raison de ses conséquences sur l'enracinement et le fonctionnement de la plante qui sont loin d'être négligeables (Tardieu & Manichon, 1987-b) ;

- mesurer l'évolution de l'organisation structurale du sol ; il faut donc pouvoir émettre des hypothèses sur les critères les plus à même d'être modifiés par le labour, les caractériser en assurant la compatibilité des variables saisies avant et après labour ; l'échelle de description de la phase solide et du système de porosité doivent en particulier être les mêmes ; mais il faut aussi disposer de données quantifiables ;

- assurer que les systèmes observés avant et après labour sont comparables ; l'échelle de description de la variabilité des états doit être la même ;

- être sûr que les états observés correspondent bien à l'effet direct du labour ; c'est-à-dire se prémunir contre les risques d'évolution des états sous l'action du climat entre le labour et la date d'observation et en tenir compte dans l'analyse des résultats si une évolution est intervenue ;

- comprendre les phénomènes mécaniques au cours du travail ; donc de pouvoir distinguer les variables décrivant l'état structural et l'état hydrique du sol qui tous deux modifient les propriétés mécaniques de la terre (Manichon, 1982-b) ;

- faire varier les facteurs susceptibles d'être à l'origine de la variabilité des états observés après labour.

Si nous voulons alors relier les modifications observées au fonctionnement de l'outil pour juger de la méthode utilisée et agir sur les facteurs déterminant la variabilité des états observés il faut disposer :

- d'un indicateur des interactions entre le sol et la machine ; nous avons choisi de tester l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage comme indicateur ; cela implique de connaître les relations entre ce dernier et les facteurs déterminant l'évolution du sol ;

- d'une échelle de description des états qui corresponde à celle à laquelle on peut définir le fonctionnement de l'outil.

Pour analyser la relation état initial-état transformé, il faut en premier lieu, à l'aide des connaissances bibliographiques disponibles, déterminer la méthode de caractérisation la plus à même de répondre à ces objectifs et les facteurs pouvant être l'origine de la variabilité des états que l'on rencontre au champ. C'est que nous avons entrepris dans les deux parties suivantes.

B. DEFINITION ET CARACTERISATION DE LA STRUCTURE DU SOL

1) Définitions et approches de la structure du sol

La structure du sol résulte de la façon dont sont associés les constituants élémentaires. Ceux-ci peuvent être de simples particules primaires telles qu'on les sépare à l'analyse granulométrique ; c'est le cas des sables ou des graviers. Ce peut être, au contraire, des éléments complexes résultant de l'agglomération de particules primaires (Hénin, 1969). Nous la définissons à l'échelle de la couche labourée.

Certains la caractérisent par les propriétés physiques qu'elle induit :

- transfert d'eau (Cassel & Nelson, 1985) ;
- diffusion des gaz (Frede, 1987) ;
- perméabilité à l'air (Mettauer & Hinsinger, 1989) ;
- résistance mécanique pénétrométrique (Billot, 1982).

Cela conduit certains auteurs à inclure dans la définition la structure spatiale de toute variable définie dans le volume de sol considéré (Dexter, 1988-b).

Il devient alors difficile de distinguer les caractères propres de la structure à l'instant de l'observation, c'est-à-dire son état, des réactions de la structure à des contraintes extérieures, c'est-à-dire son comportement vis-à-vis de ces contraintes. Ce dernier ne dépend en effet pas uniquement de l'état du sol mais aussi des contraintes appliquées. Si l'on désire dissocier les processus mécaniques en jeu dans une opération de travail du sol du résultat qu'elle produit, il est indispensable de pouvoir distinguer clairement comportement et état, c'est pourquoi une définition plus restrictive de la structure s'impose.

Le sol est un système poreux dont l'espace poral est entièrement défini par les éléments structuraux et leur assemblage.

Selon les objectifs poursuivis, les auteurs privilégient plus ou moins la description de l'un ou l'autre compartiment : phase solide ou phase porale.

Manichon (1982-a) distingue ainsi trois grandes approches :

- la première est fondée sur une description de la phase solide avec un ou plusieurs niveaux d'organisation définis selon l'échelle où l'on se situe ; le premier niveau commun à tous les auteurs est celui d'agrégat élémentaire composé de particules élémentaires liées entre elles plus fortement que ne le sont les agrégats entre eux (Nikiforoff, 1941) ; forme et dimension des éléments structuraux sont les critères principalement retenus ; cette attitude correspond à une recherche de l'origine des caractéristiques des états observés en Pédologie ;

- la seconde associe les deux compartiments dans sa description :

* une première attitude consiste à compléter l'approche morphologique précédente par une détermination de la distribution des calibres des agrégats et de leurs

assemblages en mottes grâce à des techniques de tamisage (Van Bavel, 1949 ; Gardner, 1956) ainsi que la mesure de nombreuses propriétés physiques induites par la structure ; nous avons mentionné précédemment les inconvénients liés à une caractérisation de la structure par ses propriétés physiques ;

* une seconde attitude consiste à s'intéresser à la distribution relative de la phase solide et des vides au sein de l'horizon labouré (Dexter, 1976), la première étant par ailleurs caractérisée par ses propriétés mécaniques.

Cette approche témoigne d'un souci d'adapter la description aux couches superficielles du sol dont l'état résulte d'actions anthropiques et climatiques différentes des facteurs pédogénétiques ; la notion de calibre des éléments structuraux y est prédominante dans la mesure où c'est un indicateur de fragmentation (Lyles & Woodruff, 1961 ; Gill & Mc Creery, 1960 ; Hadas *et al.*, 1978), de sensibilité à l'érosion (Boiffin & Picard, 1989), de sensibilité au compactage (De Leon, 1991), de sensibilité à l'anoxie (Renault, com. pers.) ;

- la troisième ne s'intéresse qu'à l'espace poral et son analyse dimensionnelle dans la mesure où c'est une voie de transfert d'eau, d'air, de nutriments pour la plante, de pénétration pour les racines (Russel, 1971) ; l'état caractérisé ne permet donc pas d'interpréter des comportements du sol liés à la phase solide comme par exemple la stabilité (Sequi, 1978).

Les deux dernières approches semblent mieux correspondre à nos préoccupations d'agronome car elles retiennent des critères reliés aux facteurs de structuration qui affectent la couche labourée. Il est néanmoins important de pouvoir distinguer les contraintes naturelles des contraintes anthropiques.

Deux méthodes complémentaires répondent à cet objectif :

- l'analyse de la porosité (Monnier & Stengel, 1982) ;
- la description du profil cultural, coupe de sol jugée représentative des volumes étudiés, telle que la préconise Manichon (1982-a).

2) L'analyse de la porosité.

Il s'agit d'un bilan de volume explicitant de manière déterministe les rapports entre les trois phases eau, air et matière solide. Ceux-ci peuvent être exprimés par de multiples variables (Chrétien, 1982) à différentes échelles qu'il convient de relier si l'on désire s'en servir de manière opérationnelle.

On distingue (Stengel, 1979) :

- un niveau d'assemblage textural caractéristique du matériau, lié à sa constitution et dépendant de l'état d'hydratation ; l'espace poral, dit textural, peut lui-même être divisé en deux compartiments dont l'existence a pu être confirmé par la porosimétrie à mercure (Fiès, 1984) :

* les pores lacunaires résultant du retrait de la phase argileuse entre les grains du squelette à la dessiccation ; ce comportement hydrique dépend de la nature des argiles et des cations échangeables (Tessier, 1982) ;

* les pores propres à la phase argileuse elle-même ;

- un niveau d'assemblage structural résultant de l'agrégation des assemblages élémentaires qui, lui, est fortement affecté par les agents extérieurs (Stengel, 1982) et a donc un caractère beaucoup moins permanent ; l'évolution de ce niveau d'assemblage n'est toutefois pas indépendant des propriétés conférés par la constitution du matériau comme le montrent notamment les travaux sur la fissuration (Hallaïre, 1987 ; Stengel & Bourlet, 1987).

L'intérêt de cette analyse est :

- de bien répondre à une quantification des phénomènes étudiés, comme par exemple le fonctionnement hydrique de sols ayant subi des contraintes différentes (Curmi, 1987-b) ;

- d'apporter des informations supplémentaires sur l'origine des états observés, par rapport à une évaluation globale de la densité telle que la pratiquent certains auteurs comme Håkansson (1988).

Son inconvénient est :

- de ne pas prendre en compte la morphologie de l'espace poral ;

- de poser un gros problème d'échantillonnage dans la prise en compte de la variabilité spatiale.

Utilisée seule, de manière systématique et sans stratification préalable, elle risque de mener à des travaux très laborieux du type de ceux réalisés par Andersson & Håkansson (1963).

3) La description du profil cultural

a) Intérêt.

Manichon montre :

- l'insuffisance des descriptions fondées sur :

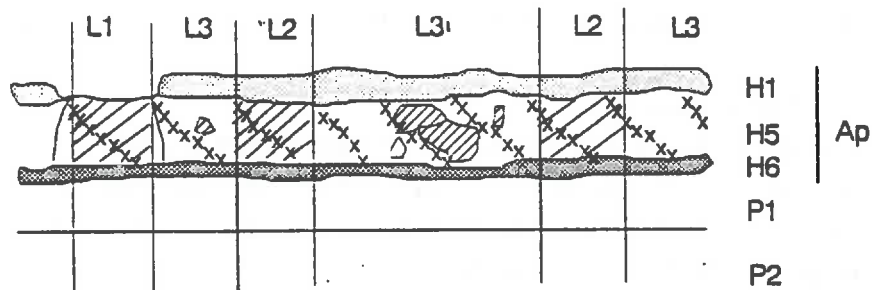
* la forme des agrégats (Hodgson, 1976 ; Russel, 1988) ;

* la distribution des vides et des pleins dans un horizon par une cartographie systématique d'impacts tous les millimètres (Dexter, 1976) et la détermination d'un indicateur synthétique du degré de désorganisation du système (Dexter, 1977) ;

* le repérage de symptômes défavorables qui permet de détecter des erreurs techniques flagrantes mais est trop contingent des conditions climatiques pour permettre un diagnostic sur les systèmes de culture et devient inefficace en absence de symptômes (Hénin *et al.*, 1969) ;

- l'intérêt d'une description :

* morphologique ;



Nomenclature des différents horizons :

	H0	Surface du sol
Horizon labouré Ap	H1-H4	Horizons de reprise du labour
	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
<u>Partition latérale :</u>		
	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

FIGURE I.B1 : Partition verticale et horizontale du profil cultural (Manichon, 1982)

* fondée sur une stratification suivant les volumes ayant subi des sollicitations différentes ; pour mettre en relation des états structuraux observés et des itinéraires techniques et ouvrir les voies à la prévision des comportements du sol sous l'action des outils (Manichon, 1982-b).

b) Méthode

La méthode consiste donc en :

- **une partition (Fig.I.B1) :**

- * en horizons selon la profondeur de travail des outils en particulier :
 - . H1 : horizon repris lors des façons superficielles ;
 - . H5 : horizon labouré non repris ;
- * latérale selon la chronologie des passages de roues d'engins sur la parcelle :
 - . zones sans passages de roues après le dernier travail profond L3 ;
 - . zones avec passages de roues avant la dernière reprise superficielle L2 ;
 - . zones avec passages de roues après la dernière reprise superficielle L1 ;

- **une description**, dans chaque compartiment défini par le croisement des deux partitions, d'unités morphologiques se distinguant par leur état structural.

Elle distingue :

- **l'état Interne** des éléments structuraux ou mottes qui est apprécié suivant des critères visuels et tactiles :

- * porosité à l'oeil ;
- * allure d'une cassure manuelle qui révèle plus ou moins les propriétés mécanique de la motte ; on définit quatre états :

. **l'état delta Δ** : correspondant au résultat de contraintes sévères : porosité faible, cassure de forme conchoïdale à aspect continu ;

. **l'état fissuré ϕ** : proche de delta, caractérisé par l'amorce de fissures ;

. **l'état gamma Γ** : en relation avec les processus naturels d'agrégation : rugosité importante, porosité visible ;

. **l'état d'agréats élémentaires** (terre fine) issu de la fragmentation par les outils (<1 cm de diamètre) ;

- **leur mode d'assemblage.**

La cartographie qui en résulte peut alors être reliée à l'histoire de la parcelle et fournir les moyens d'émettre des hypothèses sur les comportements de l'état du sol.

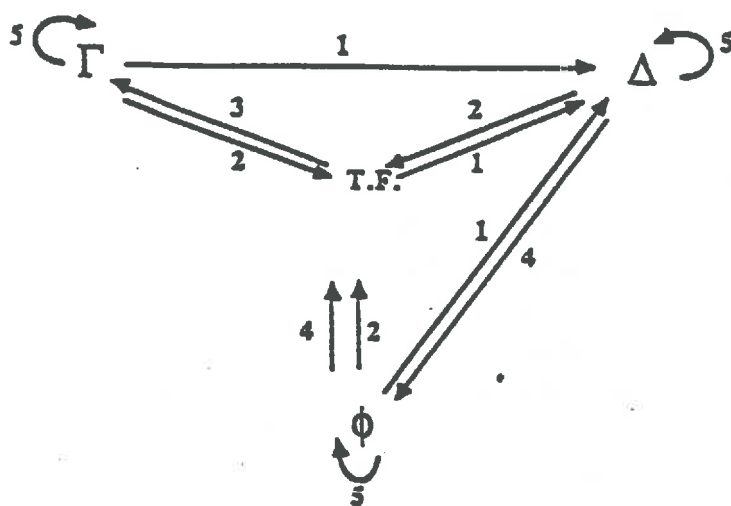


FIGURE I.B2 : Schéma des Inter-relations entre états Internes (Manichon, 1982)

Légende :

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 retraits (interaction Climat-Texture)
5. Fluctuations sans changement d'état interne

C'est sur ces bases :

- qu'une analyse du fonctionnement hydrique de la couche labourée a pu être réalisée (Papy, 1986) ; on peut alors dissocier les propriétés propres au matériau, celles liées à l'état interne des mottes, celles liées au mode d'assemblage ; ainsi, Curmi (1987-a) montre que les différents états internes ont des propriétés hydriques différentes ;

- qu'une dynamique d'évolution des états internes observés sous l'action des principaux facteurs d'évolution, climat et action anthropique a pu être proposée (Fig.I.B2).

La confrontation avec les itinéraires techniques utilisés a permis de définir un troisième niveau d'organisation caractéristique des principaux types d'actions exercées sur le sol (Manichon & Gautronneau, 1987). Il est composé de trois états :

- **o** : état fragmentaire composé de petites mottes et de terre fine en proportions variables ;

- **b** : état composé de mottes de gros calibre séparées par des cavités importantes, et caractéristique des états après labour dans une parcelle ayant subi de forts compactages antérieurement ;

- **c** : état continu typique d'un passage de roue d'engin en conditions humides.

4) Conséquences pour la caractérisation des états structuraux

Un des inconvénients de la caractérisation morphologique utilisée dans la méthode du profil cultural est la difficulté de la relier à des mesures quantitatives. Or, comme nous l'avons dit au § A, celles-ci sont devenues nécessaires si l'on veut pouvoir analyser les phénomènes de fragmentation en lien avec les paramètres quantitatifs du fonctionnement de l'ensemble tracteur-outil.

Son avantage est de fournir des critères de stratification pour les observations et de décrire l'organisation spatiale des éléments structuraux.

Il convient donc de la relier à l'analyse de la porosité (Stengel, 1990).

C'est ce que tentent de faire Manichon & Roger-Estrade (1990) en distinguant la porosité intra et intermottes. Sur la base d'une évaluation de la masse volumique des éléments structuraux (la masse volumique de la terre fine étant assimilée à la masse volumique texturale et les mottes étant séparées par tri densimétrique), et d'une évaluation de la teneur pondérale en mottes delta, ils proposent un calcul de la porosité intramottière. L'analyse classique de la porosité leur fournissant la porosité texturale et structurale, ils en déduisent la porosité intermottière.

Cette démarche implique néanmoins de pouvoir associer état interne et densité des mottes.

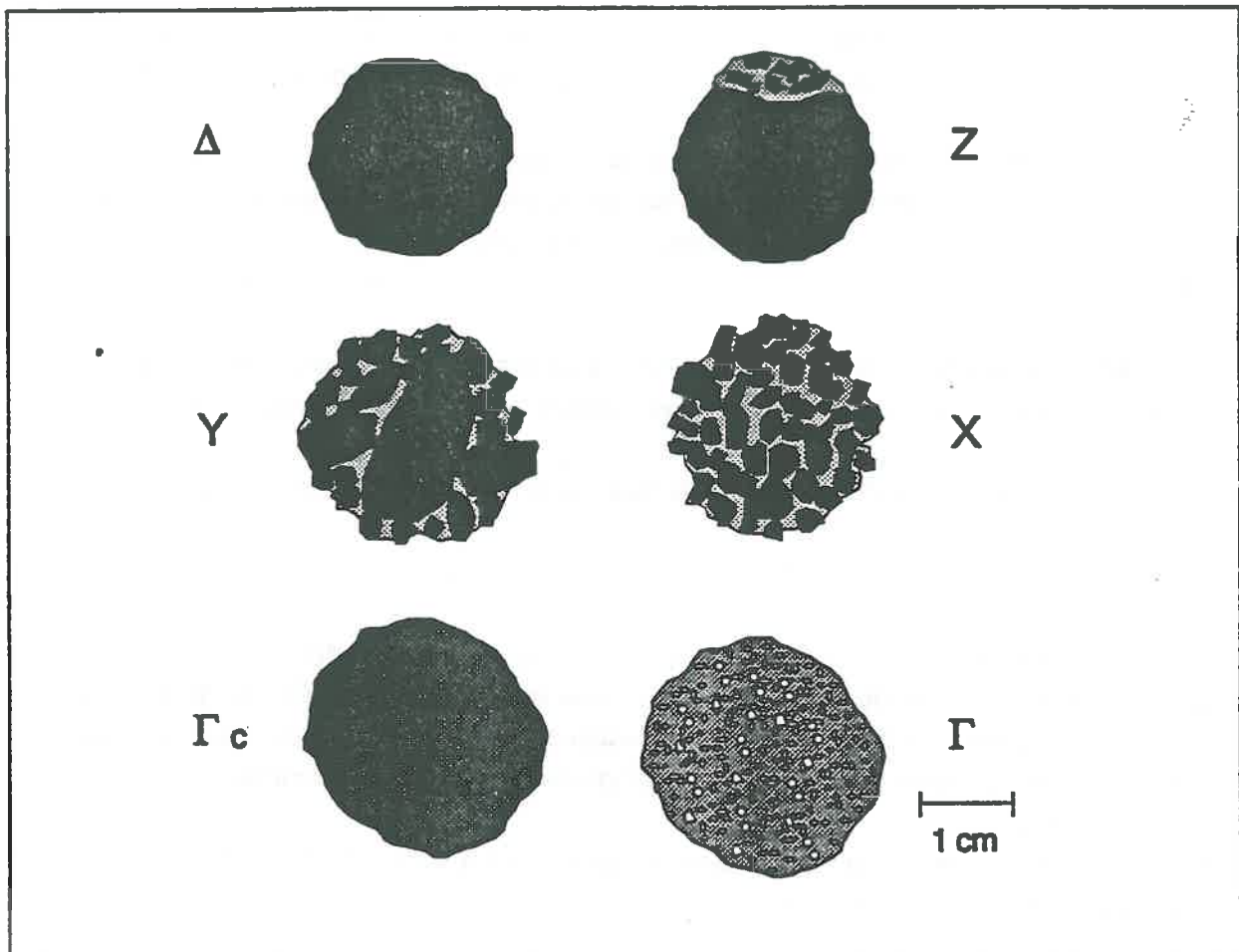


FIGURE I.B3 : Typologie des différents états morphologiques des mottes (De Leon, 1991)

Or, la classification des états internes est surtout adaptée à la reconnaissance des mottes paraissant les plus compactes et n'offre qu'une différenciation très grossière des morphologies des autres mottes. Il s'ensuit la difficulté de classer des mottes hétérogènes, ce qui a conduit De Leon (1991) à préciser la classification des états non Δ en augmentant le nombre de classes morphologiques. Sa classification repose sur l'évaluation de l'importance relative des faces d'éléments structuraux d'apparence Δ et des zones rugueuses de morphologie Γ , associée à une évaluation de la dimension des éléments structuraux identifiables. Il distingue ainsi quatre types intermédiaires entre Δ et Γ (Fig.I.B3).

Les types Δ , Z et Y se différencient par la proportion d'état Δ visible sur la face de rupture et la taille des éléments structuraux Δ .

Les types X, Γ_c et Γ se définissent par la dimension des éléments structuraux décelables, la facilité à discerner les éléments fins constitutifs et l'abondance des pores visibles.

Cette typologie est très contingente de la procédure utilisée au laboratoire pour définir la motte sur laquelle on apprécie l'homogénéité ou non de l'élément structural. Elle ne permet pas en particulier de distinguer certains états de fissuration et donc de décrire tous les cas observés après une fragmentation au champ, alors qu'elle s'est avérée performante dans le cas d'une étude du compactage au laboratoire.

5) Conclusion

La méthode du profil cultural combinée à l'analyse de la porosité semble donc pouvoir répondre aux objectifs que nous nous sommes fixés dans la mesure où nous sommes capable d'adapter :

- la typologie des mottes à une opération de fragmentation caractérisée au champ ;
- la quantification des volumes et masses jusqu'alors effectuée au laboratoire à une procédure au champ.

La combinaison des deux méthodes nous permet, en effet, de décrire l'hétérogénéité et l'anisotropie de l'état structural de la couche labourée indépendamment de son comportement et en relation avec ses facteurs de structuration.

Nous avons donc étudié l'évolution de l'état structural du sol sous l'action de la charrue sur la base d'une association de ces deux méthodes déterministes en appliquant les adaptations nécessaires que nous présenterons au chapitre II.

C. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA VARIABILITE DES ETATS OBSERVES APRES LABOUR ET DES FACTEURS POUVANT EN ETRE L'ORIGINE

I. VARIABILITE DES ETATS OBSERVES APRES LABOUR

1) Constat

Certains travaux ont déjà permis de mettre en relation une action de compactage avant labour et des états structuraux types après labour. Ils reposent sur la comparaison, dans différentes situations, de la nature et de la localisation des unités morphologiques situées dans les compartiments définis à l'aide de la stratification proposée par Manichon.

Il apparaît que le labour n'a pas suffi à gommer l'état préexistant avant sa réalisation.

Ainsi, Manichon (1982-b) montre que des situations tassées de manière homogène avant labour diffèrent de situations non tassées avant labour par :

- une surface occupée par les mottes delta, deux fois plus importante ;
- une surface occupée par les cavités, trois fois plus importante.

Le tassement avant labour a multiplié par trois l'importance des états Δ . Ils correspondent à des états avec blocs formés par les plans de cisaillement apparaissant à la surface de la bande (Nichols & Reed, 1934) dont l'aménagement après versement crée des discontinuités plus ou moins importantes selon la compacité du sol (Etat b).

L'analyse que fait Manichon (1988) du compartiment H5-L3 dans des parcelles en sol limoneux labourées à l'automne suggère qu'une grande part de la variation du degré d'affinement est due à l'état structural initial. Il montre en effet que l'état b et la teneur en Δ sont très corrélés. Sous l'hypothèse que le labour ne crée pas de mottes delta, il en conclut que celles-ci proviennent de zones tassées préexistantes et que leur fragmentation a été limitée.

Ceci est conforté par l'observation d'un réseau important de parcelles dans le Thymerais (Manichon *et al.*, 1988). La variabilité des états structuraux après l'implantation du blé dans H5-L3 est fortement liée aux conditions de récolte du précédent et du labour. Quels que soient l'humidité au labour et l'équipement utilisé, la fragmentation résultante est limitée lorsque l'humidité à la récolte est forte. Pour des humidités et énergies appliquées élevées (cas des engins de récolte), Papy (1987) montre que, quel que soit l'état initial avant compactage, l'état de la couche avant labour converge vers un même état structural "b", et la dégradation est plus facile dans une couche de type "o" qu'une couche de type "b". Les conditions de récolte ont donc entraîné un tassement intense avant labour que celui-ci ne suffit pas à effacer (Coulomb *et al.*, 1990).

Les autres facteurs mentionnés par Manichon *et al.* (1988) (humidité au labour, caractéristiques de l'outil) n'ont contribué à la variabilité des états que lorsque l'état initial était peu dégradé (récolte du précédent cultural en conditions sèches).

L'ensemble de ces travaux permet d'établir une grille d'interprétation des effets du labour sur le sol (Manichon, 1987).

2) Grille d'interprétation des effets du labour qui en résulte

Lorsque l'état delta (dégradé) domine, on obtient un état "b Δ ", quelles que soient les conditions au labour.

Lorsque l'état gamma (non dégradé) domine, on obtient un état :

* o Γ à humidité moyenne ; le degré d'émiettement peut alors dépendre d'autres facteurs jouant sur le rapport contrainte-déformation : vitesse, texture, largeur du soc (on tend vers un état "b Γ " lorsque cette dernière augmente et les conditions sont assez sèches) ;

* b Γ à très faible ou très forte humidité les comportements de la terre étant alors rigides ou plastiques.

La hiérarchie entre les facteurs qui en résulte donne donc une place de choix à l'état structural initial.

Pour passer du stade de corrélations entre états à celui de prédiction quantitative des états après labour, il faut commencer par déterminer si les connaissances bibliographiques sur les processus mécaniques mis en jeu au cours de l'opération ne nous fournissent pas les éléments d'interprétation de cette grille.

II. FACTEURS A L'ORIGINE DES DIFFERENCES OBSERVEES

La charrue provoque la découpe, le soulèvement d'une bande de terre selon un plan incliné, son retournement suite à un glissement le long du versoir puis une rupture entre versoir et terre, cette dernière retombant sur le côté de la raie (Hénin *et al.*, 1969).

La bande de terre est soumise à des contraintes mécaniques variables suivant les caractéristiques de l'outil, auxquelles elle oppose une certaine résistance dépendant de son état initial. L'état final résulte alors de l'interaction entre la contrainte exercée et la résistance du sol.

Nous devons donc analyser les facteurs modifiant :

- la résistance du sol,
- les contraintes exercées par l'outil.

1) La résistance du sol

a) Particularité des milieux anisotropes et hétérogènes

La couche labourée est un milieu fondamentalement anisotrope et hétérogène. Les relations contraintes-déformation connues en mécanique classique s'en trouvent modifiées.

La résistance à la fracture du matériau est d'autant plus faible que la fréquence de zones offrant des directions de rupture préférentielles (par exemple les fissures) augmente. Celle-ci croît avec la taille des agrégats. (Rogowski & Kirkham, 1976).

Les connaissances sur les propriétés mécaniques des milieux hétérogènes sont en développement (Guyon & Roux, 1987). L'application du concept de percolation (utilisé pour décrire les phénomènes de conductivité électrique) aux propriétés mécaniques ouvre des perspectives intéressantes.

Nous en retenons en effet les notions de :

- seuil de percolation à partir duquel le comportement change radicalement ; ce seuil correspond à la séparation entre deux types de géométries différentes ; en dessous du seuil l'ensemble des liens entre les éléments fournit une figure morcelée en de multiples amas dont la taille s'échelonne depuis la plus petite valeur possible (maille élémentaire du réseau) jusqu'à une longueur maximum ; au-dessus du seuil il existe un chemin continu permettant d'aller d'un bord à l'autre du réseau ; ce changement de régime se produit toujours pour la même fraction de liens établis quel que soit le tirage au sort des liens établis ;
- longueur de corrélation : taille maximale des amas non reliés ;
- tendance de cette longueur vers l'infini avec des allures variables (dans le cas des propriétés mécaniques) lorsque le réseau est lui-même de taille infinie.

Les modules élastiques (force appliquée/déformation provoquée) s'annulent avec une rapidité voisine ou supérieure (importance des forces exercées en bout de réseau) à la conductance électrique.

Ces concepts laissent supposer l'existence de seuils de comportement fortement dépendants de l'hétérogénéité de la structure du sol.

L'étude des transmissions de contraintes en milieu pulvérulents désordonnés semble montrer en particulier un effet de la taille et la forme des éléments structuraux (Dantu, 1957), mais aussi des proportions de grains durs et mous et de la disposition spatiale des lacunes (Travers *et al.*, 1988).

Ces résultats pourraient expliquer l'effet de l'état structural des sols dans la grille précédente.

Mais on ne dispose pas d'un corps de lois assez construit pour procéder au choix des variables à étudier.

Nous sommes donc obligée de faire appel aux connaissances de la mécanique classique (Gill & Vandenberg, 1967) et de la théorie du stade critique (Spoor & Godwin, 1979 ; Hettiaratchi & O'Callaghan, 1980 ; Stafford, 1982) dont les domaines de validité se limitent aux milieux isotropes et homogènes auxquels la couche labourée n'appartient pas.

C'est ce que nous avons fait en tenant compte des critiques précédentes.

b) Données de la Mécanique en milieux homogènes et isotropes

α) Les relations contraintes-déformation

Selon celles-ci, la description des relations contraintes-déformation repose sur deux théories à domaines de validité disjoints :

- l'élasticité, selon laquelle les composantes de déformation sont des fonctions linéaires de la contrainte ;
- la plasticité selon laquelle la déformation est permanente et liée au temps d'application de la contrainte.

La théorie du stade critique définit les lieux de ces comportements par trois paramètres :

- le volume de sol ;
- les contraintes appliquées (2) : pression sphérique et contrainte de déviation.

La position initiale dans cet espace à trois dimensions, soit l'état initial du sol, et l'évolution des contraintes qui sont modifiées par la teneur en eau, va donc déterminer le comportement du sol sous l'action de l'outil.

La Mécanique classique définit les contraintes auxquelles le sol est soumis :

- des compressions : état de contrainte conduisant à un changement de volume ;
- des tensions (traction) : qui entraînent une rupture suivant un plan perpendiculaire à la traction ;
- des cisaillements : suite à une contrainte verticale il y a rupture de la matière par glissement selon deux plans perpendiculaires à la contrainte lorsque celle-ci devient égale à la résistance ; c'est souvent le résultat de tractions et compressions simultanées ; la contrainte résultante τ est décrite par les droites de Coulomb ; elle dépend pour une contrainte normale σ de :
 - * la cohésion du matériau C ;
 - * l'angle de frottement interne ϕ ;avec $\tau = C + \sigma * \tan \phi$;
- le frottement issu du mouvement relatif entre deux corps rigides indépendants :
 - * deux blocs de sol (par exemple issus d'un cisaillement) ;
 - * ou l'outil et un bloc de sol ;

(2) En général, les contraintes en un point peuvent être représentées par 3 composantes principales de contrainte selon les 3 axes principaux d'un cube. Si l'on remplace le cube de contrainte par un octaèdre régulier construit sur les axes principaux, on peut réduire les 3 contraintes principales à 2 composantes de contraintes :

- la pression sphérique : $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$;
- la contrainte de déviation : $q = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} / \sqrt{2}$.

il se caractérise par un coefficient de frottement, en principe indépendant de la charge normale, des surfaces en contact et de la vitesse de glissement ;

- l'adhésion résultant de l'attraction entre deux corps de natures différentes, essentiellement liée à la présence de films d'eau.

β) Facteurs conditionnant le comportement du sol

La décomposition des contraintes et déformations fait ressortir :

- les facteurs susceptibles d'introduire des modifications de comportement du sol :

- * sa cohésion ;
- * les frottements ;
- * les films d'eau ;

- l'existence de domaines de comportements : solide, fragile, plastique, liquide (Atterberg, 1911 cité par Baver *et al.*, 1972).

Nous avons donc entrepris d'analyser ces facteurs et leurs interactions.

La cohésion peut être dissociée en deux types (Baver *et al.*, 1972) :

- la cohésion moléculaire qui diminue rapidement quand la teneur en eau augmente et, pour une teneur en eau donnée, augmente lorsque la teneur en argile croît ;
- la cohésion du film d'eau entre particules qui augmente avec la teneur en eau jusqu'à un maximum, au-delà duquel l'intensité des liaisons diminue quand le film d'eau s'épaissit.

Certains auteurs font état de modifications de ces paramètres avec la teneur en matière organique : ainsi Rémy (1971), Baver *et al.* (1972), Hénin (1977) constatent qu'elle semble jouer sur les limites de comportement des sols notamment celles du domaine plastique ; Zhang & Hartge, (1990) montrent sur sols sableux qu'elle augmente la cohésion pour une succion donnée car elle joue sur le degré de saturation ; ils attribuent cela au fait que la matière organique garde plus d'eau, d'où la formation d'un plus grand nombre de ménisques assurant les liaisons entre particules.

Mais, la notion de matière organique recouvre un ensemble complexe de substances organiques qui sont en perpétuelle évolution sous l'influence d'agents biologiques et dont l'état d'évolution conditionne les propriétés physiques (Fiès, 1982 ; Guérif, 1982-a). Une séparation par voie physique (densimétrie) permet ainsi de distinguer (Monnier, 1965) :

- les matières organiques libres juxtaposées aux constituants minéraux à la périphérie ou au sein des éléments structuraux, principalement constituées de débris végétaux non évolués ;

- les matières organiques liées résultant de l'évolution des précédentes dans le sol et qui ont en commun d'être associées aux constituants minéraux et singulièrement aux minéraux argileux.

Dans les travaux précédemment mentionnés, il n'est pas fait état des fractions concernées, ce qui est fort gênant pour l'interprétation des comportements observés.

D'autres auteurs ont cherché à isoler les effets de ces fractions. Guérif (1988-a) montre ainsi que la paille a un effet protecteur vis-à-vis d'une contrainte de compactage qui est d'autant moins marqué que la pression est élevée. Il attribue cet effet à la fraction libre de taille millimétrique de la matière organique. Dans le domaine fragile, on constate par contre que plus la matière organique est élevée plus la compressibilité est forte. Cet effet inverse est dû aux autres fractions de la matière organique : celle, libre, de taille micrométrique et celle, liée, qui réduisent la résistance en modifiant les propriétés mécaniques et rhéologiques de la matière solide (Guérif, 1988-b ; Boiffin *et al.*, 1990).

La cohésion est donc fortement dépendante des domaines de teneurs en eau concernés.

Il en est de même pour les frottements :

- l'angle de frottement interne :
 - * diminue lorsque l'humidité augmente (Faure, 1980) ;
 - * augmente lorsque la densité du sol augmente (Godwin & Spoor, 1977) ;
- l'adhésion augmente jusqu'à un maximum lorsque l'humidité croît ; elle est fonction du nombre d'interfaces entre air et eau.

L'analyse de la structure des sols a montré que l'on pouvait dissocier les agrégats et leur assemblage. Le comportement mécanique de l'ensemble dépend donc des propriétés mécaniques de chacun pour un état hydrique donné.

La résistance globale peut ainsi être décomposée (Spoor, 1975) en :

- une résistance d'agrégat (liée à la cohésion moléculaire, donc la teneur en eau et en argile, et liée à la matière organique) ;
- une résistance d'assemblage (liée au frottement interne, donc la teneur en eau et la densité, et liée au film d'eau).

Les quatre domaines de comportement du sol solide, fragile, plastique, liquide définis par Atterberg en fonction de la teneur en eau sont associés à l'importance plus ou moins grande que confère l'état hydrique à l'une ou l'autre résistance.

Si la résistance d'agrégat est supérieure à celle d'assemblage, la déformation affecte peu les agrégats, si c'est l'inverse, ceux-ci se brisent en particules élémentaires (Spoor, 1979).

Nous pouvons donc en déduire l'allure des variations du comportement mécanique du sol.

La résistance globale dépend de la teneur en eau (Nichols & Baver, 1930). Elle est minimale dans le domaine fragile au voisinage de la limite de retrait.

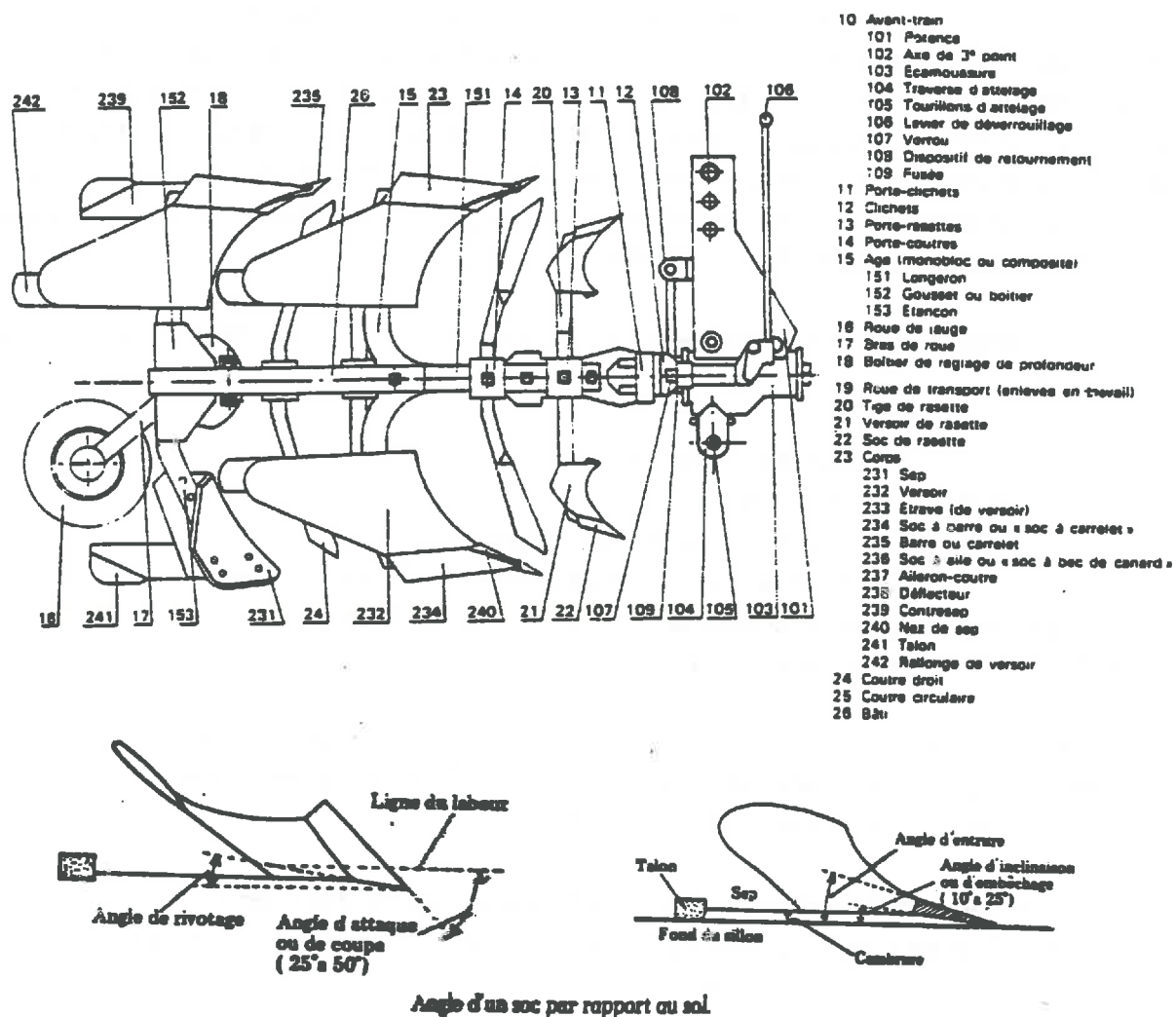


FIGURE I.C1 : Nomenclature de la charrue à socs (D'après norme française NF U-011)

Les bornes de ces domaines dépendent :

- de l'énergie appliquée et de ses conditions d'application (Guérif, 1982-b) donc de l'outil ;
- de la composition granulométrique du sol en particulier la teneur en argile et la matière organique (Faure, 1971 ; Rémy, 1971 ; Baver *et al.*, 1972 ; Faure & Fiès, 1972 ; Voight, 1973 ; Hénin, 1977) ;
- de la nature des argiles et des cations monovalents associés.

Dans chaque domaine la résistance :

- augmente lorsque :
 - * la teneur en argile augmente (Guérif, 1990) ;
 - * la densité du sol augmente (Monnier & Guérif, 1988) ;
- dépend aussi des conditions de compactage pour arriver à cette densité en particulier de l'humidité (Guérif, 1990), donc de l'histoire de la parcelle et du climat.

Elle augmente avec l'âge (thixotropie), sans qu'il y ait modification de la densité et de la teneur en eau suite à un réarrangement des particules d'argile, selon certains auteurs ayant travaillé sur échantillons remaniés (Utomo & Dexter, 1981 ; Dexter, 1988-a).

En conclusion, l'analyse de ces travaux fait ressortir l'importance de :

- l'humidité mais aussi ;
- la constitution du sol (effet de la texture, de la nature des argiles, des cations associés) ;
- l'assemblage des particules élémentaires du sol (effet de la densité du sol) ;
- les différentes fractions de la matière organique.

Elle montre que l'importance des contraintes appliquées et les conditions d'application modifient les comportements observés.

2) Contraintes exercées par l'outil

Les contraintes exercées par l'outil dépendent :

- des caractéristiques géométriques de l'outil ;
- des réglages qui lui sont imposés.

a) Description de l'outil

L'outil choisi est la charrue à socs.

Les pièces travaillantes (Fig.I.C1) appartiennent à deux groupes (Encyclopédie agricole pratique, 1984 ; Cemagref, 1981) :

- le corps de labour composé :

* du soc de forme trapézoïdale qui coupe horizontalement la bande ; il est caractérisé par sa largeur, son angle d'entrure (pénétration en profondeur), d'attaque (angle de coupe par rapport à la direction d'avancement), de rivotage (stabilisation de la charrue) ;

* du versoir dont la forme plus ou moins gauchie à l'arrière permet le retournement ; il est caractérisé de façon simplifiée par sa longueur, l'angle de montée de la terre (détermine la dislocation), l'angle moyen du versoir (caractérise l'accompagnement), l'angle du bord supérieur du versoir (déport plus ou moins grand de la bande de terre) ;

* du contresep (pièce d'usure évitant les frottements du sep et de l'étaçon contre la muraille) ;

* du talon (pièce d'usure qui s'appuie sur le fond de raie du dernier corps de manière à ce que le bâti reste parallèle à la surface) ;

- les équipements :

* le coute qui coupe le sol verticalement ;

* la rasette qui est accessoire et est montée en avant du soc ; son principal objet est l'enfouissement des débris végétaux après découpe d'un prisme superficiel.

b) Facteurs modifiant les contraintes exercées par l'outil

D'après la bibliographie, les principaux facteurs pouvant modifier les contraintes exercées par ces pièces sur le sol peuvent se décomposer en deux catégories :

- les facteurs liés à l'équipement choisi tels que :

* la forme du versoir ;

* la largeur du soc ;

- les facteurs liés à ses modalités d'emploi :

* la profondeur de travail ;

* la largeur de travail (3) ;

* la vitesse d'avancement du tracteur.

Les connaissances portant sur la première catégorie sont les suivantes :

- la forme du versoir conditionne les trajectoires entre les différentes parties de la bande de terre et donc la dislocation dans les cas où la résistance du sol est faible (Söhne & Möller, 1962 ; Faure, 1969) ; sa surface et sa rugosité peuvent modifier les frottements entre le sol et le métal ; les versoirs hélicoïdaux semblent conduire à une plus faible fragmentation que les versoirs cylindriques dans certaines gammes d'humidité x texture, mais une interaction avec la vitesse semble exister (Feuerlein, 1960 ; Söhne, 1960) ;

(3) La largeur de la section travaillée est très dépendante de la largeur du soc, aussi, par la suite, nous ne distinguerons pas les 2 facteurs. Le développement des charrues à largeur variable tendrait à rendre ceux-ci plus indépendants, mais leur performance n'a pas été démontrée et leur emploi est encore réduit. Il ne faut pas, par ailleurs, oublier que pour une largeur de soc donnée, les réglages de l'aplomb et du dévers peuvent modifier légèrement la largeur prise.

- la largeur du soc modifie probablement peu l'intensité des contraintes mais joue plutôt sur leurs points d'application ; son rôle est peu mentionné par les auteurs mais des observations qualitatives semblent indiquer que :

* la fragmentation augmente lorsque la largeur diminue, ce qui est assez logique (Billot, 1977 ; Dürr *et al.*, 1979) ; une même tendance est observée pour les outils à dents (Gill & Mc Creery, 1960 ; Mc Kyes, 1985) ;

* son influence sur la fragmentation est essentiellement notée lorsque les labours ont lieu en conditions sèches : *"Les labours peu fragmentés correspondent à des socs de 18 à 20" alors que les labours fragmentés sont le fait de socs plus étroits"* (Manichon *et al.*, 1988).

L'étude de la seconde catégorie de facteurs nous a montré que l'analyse de l'effet de la vitesse d'avancement sur le comportement du sol au labour et son état après labour a fait l'objet de nombreux travaux :

- le gradient de vitesse entre les particules de la bande de terre situées aux deux extrémités du versoir est d'autant plus grand que la vitesse augmente ; les elongations de la bande varient avec la vitesse de labour (Kouwenhoven & Terpestra, 1972) ;

- l'émiettement lors de labours à vitesse rapide paraît plus important (Hénin *et al.*, 1969 ; Faure, 1970 ; Dalleine, 1978) ; la distribution des tailles de mottes est plus irrégulière qu'à vitesse moyenne (Söhne, 1960) ; pour Feuerlein (1960, 1966-a et b) ce n'est pas sur la taille mais sur le déplacement des mottes et le volume travaillé que les effets sont notables ;

- pour d'autres auteurs il ne semble pas que la vitesse modifie les mécanismes de rupture (formation des plans de cisaillement) mais une forte augmentation de vitesse présente des risques de non basculement (Nichols & Reed, 1934).

Pour la profondeur, les travaux sont plus succincts : elle joue sur le volume travaillé et le retournement de la bande (Hénin *et al.*, 1969) ; son augmentation conduit à un labour plus dressé.

Mais, dans toutes les études citées, l'interaction entre tous ces facteurs est mal connue et l'état du sol est souvent très mal caractérisé. Cela conduit probablement à des confusions d'effets, des incohérences entre auteurs. Il en résulte une difficulté importante pour hiérarchiser les nombreux facteurs énoncés par Dalleine (1978). Il est bien difficile d'en tirer une vision synthétique des phénomènes.

III. CONCLUSION

D'après la bibliographie, les facteurs pouvant modifier le comportement du sol sous l'action de la charrue et, par conséquent, l'état structural après labour **sont nombreux et d'interactions mal connues** (constitution du sol, structure du sol, humidité du sol, outils et leurs réglages).

Une interprétation de la variabilité des états observés après labour au champ nous permet d'émettre des hypothèses sur la hiérarchie entre ces facteurs. L'état structural initial du sol paraît être un facteur déterminant pour l'état final. Lorsque l'état initial est peu dégradé, l'état final du sol dépend alors principalement de l'humidité. Il n'est modifié par l'équipement choisi qu'à humidité moyenne.

Nous avons donc pu, sur la base de cette analyse bibliographique, établir les principes des traitements que nous voulons appliquer pour étudier la relation état initial-état transformé.

D. PRINCIPES DES TRAITEMENTS

1) Justification du choix des facteurs concernant le sol et l'outil

L'analyse précédente a montré que de nombreux auteurs avaient déjà suggéré en milieu isotrope et homogène les effets de facteurs d'état tels que la teneur en eau et de constitution tels que la texture du sol sur le comportement mécanique des sols mais que par contre la prise en compte d'états structuraux initiaux différents était rare.

Nous avons donc décidé de privilégier l'étude des caractéristiques de la structure des sols tels que :

- l'état interne des mottes ;
- leur mode assemblage (liens entre les éléments structuraux, taille) ;

tout en caractérisant la texture et l'humidité, et en prenant en compte la variabilité de cette dernière.

Nous avons préféré faire varier plutôt les modalités d'emploi des outils que l'équipement lui-même. L'agriculteur possède en effet rarement plusieurs charrues et plusieurs types de versoirs à moins d'avoir à travailler dans des sols de texture très différentes et la fréquence de renouvellement de son équipement sur l'exploitation est faible. La durée de vie estimée pour les outils de travail du sol autres que des outils animés est généralement de 10 ans (Boisgontier *et al.*, 1988).

Une analyse historique de l'évolution de la forme des versoirs (Dalleine & Billot, 1975) montre que celle-ci a tendance à s'uniformiser. La motorisation et l'amélioration des capacités de traction ont en effet offert la possibilité de labourer avec un même outil des sols de texture variables et ont ainsi diminué l'intérêt d'une adaptation aux différentes textures par les caractéristiques géométriques de l'outil. La diminution de la variabilité des conditions hydriques au labour, liée à la concentration dans le temps des interventions grâce à la diminution des temps de travaux, a aussi contribué à cette uniformisation.

Les évolutions notables n'ont eu lieu que sous l'influence d'une modification importante des techniques de labour :

- les labours rapides ont conduit à une réduction de l'angle d'attaque pour limiter l'usure ; les versoirs sont presque plats, à angle de montée important, peu hauts et relativement courts en général ;

- l'augmentation de la longueur des charrues à plusieurs corps a conduit à la conception de la charrue losange (Huard, 1972) ; la forme de l'ensemble soc-versoir permet en effet d'avoir une charrue plus courte pour une même largeur travaillée, un adossement et un dégagement du fond de raie meilleurs, permettant l'augmentation des largeurs par corps et limitant le bourrage (Encyclopédie Agricole Pratique, 1984).

Ces techniques restent néanmoins d'emploi limité en France. En particulier, après un engouement passager, la charrue losange est peu utilisée en limons fragiles.

Par ailleurs, le réglage de la profondeur se fait généralement au début du chantier et est peu modifié par l'agriculteur en cours de travail.

Nous avons donc privilégié l'étude de la vitesse en la faisant varier volontairement dans nos essais car :

- l'agriculteur peut agir plus facilement sur ce facteur ;
- son effet sur la fragmentation et le déplacement des bandes est le plus souvent mentionné.

Nous avons donc décidé d'utiliser les équipements disponibles sur les différents sites où nous intervenions en utilisant des versoirs communs (versoirs universels) sans étudier leur effet propre et de n'étudier, dans un premier temps, l'effet de la profondeur et de la largeur qu'en tant que covariables dans les cas où leur contrôle était difficile. Dans un second temps, nous avons inclus des variations de profondeur sur le site de Palaiseau afin de déterminer si des études ultérieures sur cette modalité de réglage seraient bienvenues. Nous n'avons pas cherché à faire varier la largeur du corps, dont l'effet vis-à-vis de la fragmentation ne doit néanmoins pas être négligé.

Nous avons alors adopté les principes des traitements qui suivent. Dans le site où nous voulions établir la relation état initial-état transformé, ils ont été appliqués scrupuleusement. Nous présenterons les variations introduites dans les autres sites seulement lorsque nous aborderons leur étude.

2) Principes des traitements

Nous avons cherché à :

- créer une gamme de variation de l'état structural avant labour correspondant à celle que l'on peut rencontrer au champ ; les états "o" et "b" sont ceux hérités de l'histoire de la parcelle avant notre intervention ; les états "c" sont obtenus par les tassements plus ou moins intenses que nous provoquons ; nous avons cherché à modifier cette intensité en jouant non pas sur les conditions d'humidité (nous voulions limiter les risques d'avoir des humidités différentes au labour) mais sur la pression appliquée cumulée, c'est-à-dire en

tassant la zone choisie par un nombre variable de passages de tracteur. Les pneus du tracteur étaient gonflés à "forte" pression, soit plus de 2 bars ;

- **créer des états $c\Delta$ d'âges différents au moment du labour** ; nous espérons ainsi introduire le phénomène de thixotropie suggéré par certains auteurs ; deux dates de tassements séparées par une durée d'un mois ont donc été fixées ; étant donné les conditions climatiques, ce délai nous paraissait suffisant pour qu'ait lieu une évolution de la résistance des mottes Δ ;

- **labourer une même masse de terre** pour que les variations que nous introduisons dans les relations contraintes-déformations ne soient pas dues à la masse de terre labourée mais bien à l'état hydrique et structural de celle-ci et à l'outil utilisé ; ceci implique de labourer des épaisseurs différentes dans les traitements où la densité humide apparente est différente du fait des tassements effectués ; nous avons donc pour objectif de labourer dans tous les traitements un compartiment dont l'épaisseur était définie par la surface et la cote du fond de Ap, qui, dans le sol où nous avons travaillé, se repère au changement de couleur de la terre ; nous voulions en effet labourer une couche composée d'un matériau aux propriétés texturales homogènes ; nous faisons l'hypothèse que la plus forte masse de terre travaillée au cours de l'histoire de la parcelle est la même sur toute la parcelle et est limitée par la cote du changement de couleur ;

- **faire varier la vitesse d'avancement du tracteur de 2 à 8 km/h** pour couvrir largement la gamme utilisable dans les parcelles d'agriculteurs ; nous avons défini trois objectifs de vitesses compte-tenu des rapports de boîte de vitesse des tracteurs utilisés, et du régime moteur conseillé (1600-1700 T/mn). Sur le site où nous avons établi la relation état initial-état transformé ces vitesses étaient :

- 7.5 km/h (1ère rapide) ;
- 5 km/h (4ème lente) ;
- 2.5 km/h (2ème lente).

Nous avons donc défini les traitements (4) suivants :

- **TT1** : zone tassée avec 3 passages 1 mois avant le labour ; état souhaité : $c\Delta$ "âgé" ;
- **TT2** : zone tassée avec 3 passages 1 semaine avant le labour ; état souhaité : $c\Delta$ "jeune" ;
- **T1** : zone tassée avec 1 passage 1 mois avant le labour ; état souhaité : $c\Gamma$;
- **NT** : zone non tassée avant le labour ; état souhaité : "o" à "b" selon les effets de l'histoire antérieure.

A chaque rapport de vitesse nous avons fait correspondre dans chaque traitement une zone dont la longueur a été définie de façon que le tracteur ait sûrement atteint un régime

(4) Ce terme sera réservé aux résultats des interventions de compactage effectuées avant labour. On appellera "situation" la combinaison "traitement x vitesse de labour x répétition".

constant : enrayage terminé et vitesse constante. Nous nommerons par la suite **situation**, la zone correspondant à un traitement et à une vitesse enregistrée donnés.

Les états dans la parcelle pouvant varier de "o" à "b" avant modification, nous avons choisi de conserver pour NT une surface double de celle réservée à TT1.

Pour le tassement le plus tardif (TT2) et celui le moins intense (T1), nous avons prévu une surface moitié de celle de TT1, car nous voulions privilégier les cas extrêmes "oΓ" et "cΔ" "âgé".

L'impossibilité d'éliminer l'héritage de l'état des parcelles avant implantation des traitements nous crée des difficultés particulières :

- risque de confusion d'effet entre traitement et localisation des traitements ;
- risque de ne pas introduire de différences entre traitements.

Deux stratégies s'offraient alors à nous :

- ne pas tenir compte de la variabilité initiale de terrain et se prémunir de celle-ci par randomisation ; ceci n'était pas réalisable car le dispositif aurait alors été démesuré ; les modalités d'application des traitements et l'acquisition des vitesses rendent en effet impossible la création de parcelles de petite taille ;

- explorer au mieux la variabilité initiale d'état et positionner les traitements en fonction de celle-ci.

La première stratégie étant irréalisable compte-tenu des traitements que nous désirions appliquer, nous avons choisi la seconde, c'est-à-dire de ne pas randomiser les situations. Nous avons néanmoins effectué des répétitions pour les traitements les plus contrastés TT1 et NT pour prendre en compte cette variabilité de terrain.

Pour limiter les facteurs d'hétérogénéité intratraitement et limiter le temps d'observation il fallait limiter la taille de l'essai. Nous avons donc supprimé dans un traitement le rapport 2ème lente. C'est pour T1 que nous avons procédé à cette élimination, car ce traitement correspond *a priori* à un état intermédiaire.

3) Conclusion

Notre stratégie a consisté à privilégier l'étude de l'effet de l'état structural initial sur le comportement du sol au labour et sur l'état du sol après labour.

Nous avons cherché:

- à créer des états structuraux initiaux contrastés ;
- à labourer une même masse de terre pour limiter les confusions d'effets avec la masse labourée.

Nous avons alors prospecté les modes de conduite possibles pour réduire voire gommer une différence initiale d'état structural en faisant varier la vitesse d'avancement du tracteur dans une gamme correspondant à celle des parcelles d'agriculteur.

E. CONCLUSION

Pour analyser les modifications de l'état du sol au cours du labour, nous avons fait le choix de caractériser la structure du sol sur la base d'une analyse morphologique de l'état du sol couplée à une analyse de la porosité. Ces méthodes nous offrent en effet la possibilité d'appréhender la variabilité spatiale de la structure du sol à l'échelle de la couche labourée et de relier les états observés aux facteurs de structuration que l'on étudie.

Notre analyse bibliographique nous a permis d'émettre des hypothèses sur la hiérarchie de ces facteurs. L'effet de l'état structural initial paraît important d'après des observations après labour au champ. Mais, les travaux bibliographiques ne permettent pas d'affirmer ni de quantifier cet effet.

Nous avons donc, en privilégiant l'étude de ce facteur, analysé la relation état initial-état transformé, mais tout en faisant varier les réglages de l'outil, en particulier la vitesse d'avancement du tracteur, dans une gamme permettant d'évaluer la marge de manoeuvre dont dispose l'agriculteur pour modifier l'état final du sol.

L'évaluation de cette marge de manoeuvre implique de relier l'évolution de la structure des sols que l'on observe au fonctionnement de l'outil. Nous avons choisi l'effort de traction pour caractériser ce fonctionnement, et nous étudierons les relations de l'effort de traction avec les facteurs d'évolution.

Nous avons tout d'abord adapté les méthodes de caractérisation choisies de façon à quantifier l'évolution des critères susceptibles d'être modifiés par le labour :

- le volume apparent de la couche labourée ;
- le calibre des mottes ;
- leur état interne ;
- leur position spatiale.

Cette étude a impliqué des précautions quant au protocole utilisé, en particulier en ce qui concerne le plan de sondage des observations. Nous allons aborder ce point au chapitre qui suit.

CHAPITRE II :
PROTOCOLE ET CONDITIONS D'EXECUTION
POUR L'ANALYSE DE LA RELATION
ETAT INITIAL-ETAT TRANSFORME AU COURS DU LABOUR

Au chapitre précédent, nous avons montré l'intérêt d'analyser la relation état initial-état transformé. Cela implique de pouvoir caractériser l'état physique du sol avant et après labour.

A. CARACTERISATION DE L'ETAT PHYSIQUE DU SOL

I. ANALYSE MORPHOLOGIQUE DE L'ETAT STRUCTURAL IN SITU

1) Plan de sondage dans la parcelle

Le volume de sol que l'on peut caractériser est très faible par rapport au volume travaillé sur la parcelle. Il est donc indispensable d'adopter un plan de sondage qui permette d'avoir une caractérisation de la structure du sol représentative de la parcelle.

Le plan de sondage retenu n'est pas de même ordre avant et après labour.

a) Avant labour

La variabilité de l'état structural résulte :

- de l'histoire de la parcelle avant l'implantation des traitements ;
- des tassements appliqués dont l'effet dépend pour partie de cette histoire.

L'état structural après tassement dépend en effet de l'état structural avant tassement et des conditions d'humidité (Papy, 1984). Ces dernières sont elles-mêmes liées à l'histoire antérieure aux tassements puisque que la circulation de l'eau n'est pas la même dans un état b et un état o (Papy, 1986).

Il faut par conséquent :

- caractériser finement l'état avant tassement ;
- décider de la position des traitements sur la parcelle en fonction de celui-ci et des contraintes de réalisation des opérations (qui limitent les possibilités de randomisation), pour tester au mieux les effets que l'on cherche à mettre en évidence ;
- caractériser l'état après tassement dans les zones concernées.

La variabilité spatiale avant tassement est difficilement repérable en surface hormis les traces visibles des passages effectués après le dernier travail du sol (correspondant à L1). Ces états peuvent correspondre à o, b ou c.

En dehors de ces traces, on peut faire l'hypothèse que les états rencontrés sont de type o et b (Manichon, 1988) mais la distinction *a priori* entre les deux est impossible.

La variabilité d'état la plus grande est perpendiculaire au sens du dernier travail connu. Il est peu probable que celui-ci ait changé au cours des années vu la forme de la parcelle, mais on ne peut, en revanche, assurer la régularité du travail dans la longueur. On ne peut donc exclure une variabilité longitudinale.

Il est donc indispensable d'établir une **cartographie des états structuraux** présents sur la parcelle.

Elle peut être obtenue à l'aide :

- de transects pénétrométriques (Billot *et al.*, 1977) explorant toute la largeur de la parcelle avec un pas inférieur aux facteurs principaux de structuration de l'état du sol c'est-à-dire la largeur des plus petits pneus utilisés : ces transects permettent de repérer les zones de résistance différente, variable résultant de l'interaction entre état structural et humidité : on effectue plusieurs transects pour piéger la variabilité longitudinale pouvant exister ;
- de profils cultureux positionnés en fonction de la variabilité suspectée d'après l'analyse des transects pénétrométriques ;
- de mesures de densité associées aux différents types d'états rencontrés.

Après tassement, si une variabilité d'état demeure, c'est dans la direction du maximum de variation d'état avant tassement qu'elle doit être la plus importante. Il suffit donc d'observer un profil couvrant la largeur tassée dans les traitements concernés si la variabilité longitudinale avant tassement est faible.

b) Après labour

L'ensemble de la parcelle correspond à un compartiment L3. La variabilité d'état ne peut donc être liée qu'à la variabilité :

- d'état avant labour ;
- de fonctionnement de l'outil.

Nous avons donc suivi une procédure plus systématique qui consistait à observer une section travaillée dans chaque situation correspondant à un état et à la largeur d'un passage, largeur pour laquelle nous pouvons définir le fonctionnement de l'outil.

Nous avons réalisé par conséquent dans chaque traitement un transect couvrant l'ensemble des passages de charrue effectués.

La position longitudinale du transect a été définie dans la zone où la charrue avait atteint un régime de fonctionnement normal (enrayage terminé, vitesse constante).

2) Méthode d'analyse des profils

Cette méthode est fondée sur :

- une **préparation du profil au couteau et au soufflet faisant ressortir les éléments structuraux et cavités** ;
- une **procédure photographique** qui laisse dans les archives un témoignage de la face observée et produit un document traitable ultérieurement au laboratoire ;
- un **traitement informatique de l'image** produite.

Elle nous a permis d'observer sur le terrain en quinze jours après le labour (avec le degré de précision souhaité) une largeur de profil représentant 85m linéaires sur une profondeur correspondant à la couche labourée. Le travail était effectué par trois personnes dont un seul et même observateur et préparateur du profil.

25m linéaires de profil ayant été observés avant labour par la même méthode dans le cadre de la même expérimentation, c'est donc 110m de profil environ qu'il s'agissait de traiter au laboratoire. Ce traitement au laboratoire a été réalisé en un mois par deux personnes.

a) Préparation du profil

Sur une section verticale la plus plane possible, nous délimitons :

- avant labour : les compartiments H1 à H6 X L1 à L3 définis par la partition horizontale et verticale (Manichon & Gautronneau, 1987) ;

- après labour : l'unité travaillée par le corps de charrue c'est-à-dire la bande de labour ; cette surface pourra être mise en relation avec la section travaillée évaluée à partir de la mesure de la largeur de prise de raie et de la profondeur de labour.

Pour repérer les contours de bande et le fond de raie, nous avons dans les différentes zones d'observation:

- disposé en surface avant labour des petits cubes de PVC de couleur ; on les retrouve après labour dans l'interbande et cela nous permet de matérialiser avec plus de justesse le contour des bandes par des fils de laine blanche facilement reconnaissables sur les photos ;

- tapissé en cours de labour, avec de petits cubes de PVC d'une autre couleur, chaque fond de raie dans les zones prévues pour l'observation, pour matérialiser le fond du labour.

Nous identifions alors, à l'aide d'une épingle codée suivant l'état interne, les mottes dont la plus grande longueur est de l'ordre du centimètre. Dans les faits nous avons eu tendance à étiqueter ainsi essentiellement des mottes de 2 cm et plus. Les mottes de moins de 2 cm sont assimilées à de la terre fine.

Tableau II.A1 : Caractéristiques des états internes distingués

ETAT INTERNE	PRINCIPALES CARACTERISTIQUES	
DELTA	Aspect continu - Faces de fragmentation peu rugueuses de forme conchoïdale - Porosité visible très faible ou nulle - Cohésion à sec élevée	
DELTABIS	Aspect proche de delta, mais cassure légèrement différente et légère porosité qui rappelle l'état gamma	
DELTA FISSURE	issu de delta avec amorces de fissures sous l'action d'une fragmentation	1 niveau : 1 ou plusieurs fissures indépendantes
		2 niveaux : fissures secondaires partant de fissures primaires sans fissures tertiaires
		3 niveaux : réseau de fissures dont certaines sont d'ordre 3
GAMMA	Agrégats de morphologie variable discernables dans les mottes - Rugosité importante après fragmentation - Porosité structurale non nulle - Cohésion plus faible	

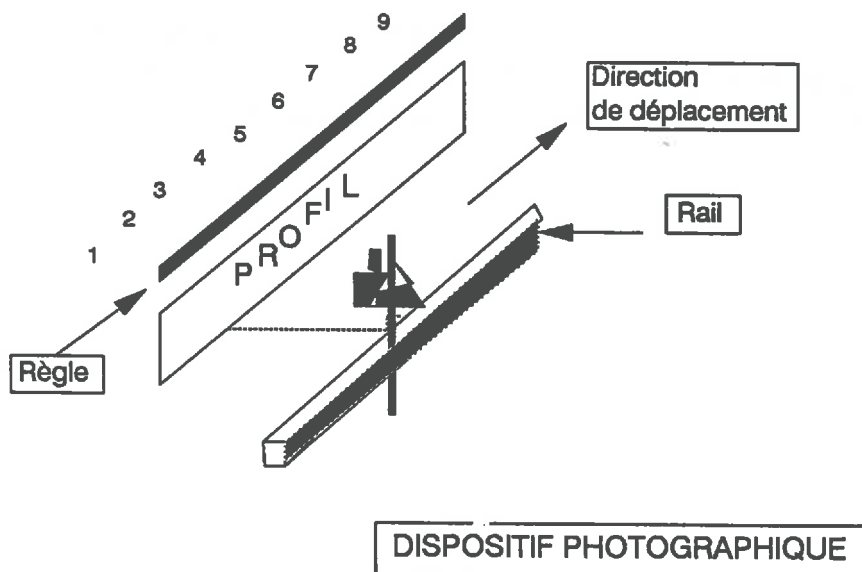


FIGURE II.A1 : Dispositif utilisé pour la réalisation des documents photographiques

Les différents états internes distingués sont présentés dans le tableau II.A1.

Dans les mottes delta et deltafissurées, la présence de galeries biologiques de diamètre supérieur à 2 mm est notée par surcroît.

Les états internes delta et gamma correspondent à ceux de la classification de terrain proposée par Manichon dans sa thèse (1982) mais nous avons introduit une notation intermédiaire "*deltabis*" en raison de la présence dans les situations observées d'un état ne correspondant pas strictement aux critères qu'il avait défini pour l'état delta. Dans la mesure où nous nous intéressons à une opération pouvant provoquer une fissuration des mottes nous avons jugé utile de créer des classes intermédiaires entre l'état Δ et l'état ϕ (Δ fissuré) définis par Manichon, en distinguant plusieurs niveaux de fissuration.

Les états notés sont quelque peu différents de ceux proposés dans la classification de laboratoire de De Leon (1991) :

- les mottes X, Y, et Z sont inexistantes dans notre typologie ;
- les mottes que nous avons notées "*deltabis*" sont probablement voisines des mottes Γ_c : elles résultent d'un compactage moins intense que celui conduisant à l'état Δ ;
- nous avons distingué des mottes fissurées de plusieurs types contrairement à De Leon.

A l'intérieur des compartiments avant labour ou des bandes après labour, nous délimitons alors les éléments structuraux à l'aide d'un couteau en leur imprimant si nécessaire un léger relief, utilisant des critères basés sur la continuité :

- de l'aspect morphologique (mottes delta ; deltafissurées ; gamma) ;
- de la résistance mécanique des mottes, en laissant les mottes en place.

L'intérêt d'un repérage des contours sur le terrain consiste en la possibilité qu'il offre d'associer le second critère au premier.

b) Procédure photographique (Fig. II.A1)

Notre objectif est de réaliser une copie aussi fidèle que possible de la face observée.

Aussi avons-nous fait le choix après analyse des possibilités techniques (Granger, 1986 ; Bouillot, 1987 ; annexe II.A1) :

- d'un objectif peu déformant de focale 50 mm (l'angle embrassé par l'oeil humain est de 52° environ, ce qui correspond à une distance focale de 44.1 cm pour un format 24 X 36 mm) adapté à un appareil Reflex OLYMPUS OM1 ;
- d'un réglage fixe de la profondeur de champ (ouverture fixée à 11 et distance de l'appareil au profil d'environ 1m40) ;
- d'un réglage de la vitesse qui conduise alors plutôt à sous-exposer qu'à surexposer la photo pour gagner en netteté ;
- de prises de vues rapprochées (tous les 6.5 cm), dont on exploite uniquement le centre pour limiter les déformations de bord de photo ;

- du parallélisme du plan de la pellicule avec celui du profil.

En pratique, l'appareil se déplace sur un rail horizontal parallèle à la face verticale du profil et tous les 6.5 cm une photo est prise dans un champ de vision incluant largement tout l'horizon Ap et une règle graduée placée horizontalement sur le profil. Celle-ci permet de matérialiser l'échelle sur le document photographique.

c) Analyse des photos au laboratoire

Les photos ne sont pas analysées directement par traitement informatique de l'image car il est apparu impossible d'édicter de manière suffisamment précise les règles qui permettent à l'oeil du spécialiste de discerner sur la photo les contours des mottes.

En effet :

- on ne sait pas affecter un niveau de gris à l'intérieur et aux contours des mottes, les contrastes entre terre fine et mottes n'étant pas toujours assez importants ;

- les règles de décision de l'observateur sont contingentes des gammes de niveaux de gris couvertes qui dépendent :

- * des conditions de prise de vue en lumière naturelle malgré les précautions prises ;

- * de l'état hydrique des mottes et de leur texture ;

le problème existe au sein d'une même photo mais se trouve accru lorsque l'on change de photo, de profil, voire de site d'observation ; il est difficile d'adapter les règles aussi rapidement que ne le fait l'oeil humain ;

- les critères de reconnaissance des formes les moins ambigus sont le relief, la présence de vides, de racines, de matières organiques ; en photo plane seules les ombres sont révélatrices d'un certain relief ; or, comme leur interprétation est difficile, nous avons cherché à limiter leur effet sur le terrain.

Un traitement informatique de la photo plane peut alors conduire à l'agglomération de mottes distinctes, la scission d'une même motte ou sa création. Une transcription manuelle des contours, en valorisant par une vision stéréoscopique le léger relief donné sur le terrain, s'est avérée beaucoup plus opérationnelle.

Nous avons donc décidé de décalquer sur un transparent, après observation stéréoscopique de la partie centrale des photos et interprétation :

- le contour des objets à analyser : compartiments matérialisés sur le terrain, mottes, vides, cailloux (5) ; la section des objets que l'on représente est celle correspondant au plan le plus arrière de la face du profil ;

- l'identification des objets ;

- l'échelle qui permettra de convertir les mesures faites sur l'image en valeurs réelles.

(5) Nous ne reparlerons plus des cailloux car ils sont très rares et la surface qu'ils occupent est trop faible.

Les contours figurant sur le transparent et l'échelle sont alors recopiés proprement en noir sur une feuille blanche à l'aide d'une pointe tubulaire d'épaisseur choisie de manière à avoir une largeur des traits à peu près constante après acquisition vidéo (0.7 mm). Le document finalement analysé est donc simple car il est constitué d'ensembles noirs et blancs bien déterminés.

d) Traitement Informatique du document final

L'image est acquise à l'aide d'une caméra vidéo CCD associée à une carte 512 X 512 pixels. Chaque capteur CCD reçoit un flux lumineux. Cela génère un signal de tension analogique qui est ensuite transformé en une image numérique de 512 X 512 pixels en 256 niveaux de gris (Besançon, 1988 ; I2S, 1990).

Les conditions d'acquisition sont fixées :

- la position du document dans un plan perpendiculaire à l'axe optique de la caméra situé à une distance fixe de celle-ci (33 cm) ;
- l'ouverture de l'objectif et l'éclairage par quatre lampes ;
- le facteur d'amplification des tensions (gain) ;
- le calage du 0 de tension avec le zéro numérique qui correspond au noir absolu (offset).

Compte-tenu de la distance de la caméra et de l'épaisseur de la pointe tubulaire les traits de contours ont une épaisseur d'environ 4 pixels, mais l'intensité de chacun n'est pas la même car :

- un trait noir homogène pour l'oeil humain n'est pas forcément noir ni homogène pour la caméra qui sépare 256 niveaux de gris ;
- lorsque les capteurs CCD sont saturés en lumière, il y a débordement de l'énergie lumineuse sur les capteurs voisins non saturés.

Il convient donc d'utiliser une procédure de binarisation pour transformer l'image en 256 niveaux de gris en une image en 2 niveaux de gris, 0 pour les contours, 255 pour le fond des objets (0 = noir et 255 = blanc). Nous avons fixé le seuil de binarisation à 250 : on affecte 255 à tous les pixels d'intensité supérieure à 250 et 0 aux autres.

Le logiciel de traitement d'image utilisé pour cela est PC-scope.

Après étalonnage de l'image grâce à la réglette et binarisation, il permet de détecter les contours, de les coder, et d'obtenir pour chaque objet un certain nombre de paramètres dont :

- l'identification ;
- le périmètre ;
- la surface ;
- la plus grande longueur ;
- la plus petite longueur ;
- les coordonnées du barycentre.

La difficulté réside dans la détection d'objets jointifs. Il faut en effet dissocier leurs contours pour pouvoir les considérer séparément et non pas comme un ensemble de plusieurs trous (objets à l'intérieur d'autres objets).

La procédure choisie à cette fin, fondée sur une technique de morphologie mathématique appelée amincissement, mène à la détection des pixels les plus internes du trait de contours (annexe II.A2).

La surface calculée est donc la surface interne au trait de contour. Cela nous a conduit, après analyse de l'erreur introduite par rapport à la surface réelle, à tenir compte de la surface du trait que l'on ajoute pour chaque objet à la surface calculée par le logiciel (procédure automatique imposée par le logiciel). Nous avons procédé de manière analogue pour le calcul des autres dimensions des objets (annexe II.A3).

e) Conclusion

Le fichier final obtenu (après réidentification des objets selon leur état interne sur tableur) nous permet alors une analyse quantitative des surfaces occupées par les différents types d'éléments structuraux classés selon leur état interne et leur taille. Elles sont rapportées à celles des unités travaillées, mesurées sur les photos avant et après labour.

Une présentation et une quantification des erreurs que l'on est susceptible d'introduire aux différentes étapes est présentée en annexe II.A3. La chaîne de traitement conduit à une précision sur les surfaces de l'ordre de 5% dans la mesure où l'on respecte scrupuleusement à chaque étape la procédure présentée ci-dessus. Mais l'erreur dépend de la taille des objets et peut atteindre 13% pour les petits objets, qui correspondent dans le cas des prises de vues effectuées (compte-tenu de la distance entre la face d'observation et l'appareil) à des mottes de moins de 5 cm de longueur. Il s'agit plutôt d'une sous-estimation de la surface des objets. On peut donc penser que la surface de terre fine dans les bandes de labour, calculée par soustraction de la surface cumulée des mottes et vides (qui intègre le cumul des erreurs) à la surface des bandes (gros objets pour lesquels l'erreur est moins grande), est par contre surestimée (d'environ 5-6%).

Il n'en demeure pas moins que l'étape primaire de préparation du profil est la plus délicate. C'est un travail d'expert. Les travaux présentés ne proviennent que des observations d'une même personne, moi-même, aussi l'on peut espérer que les biais introduits sont les mêmes dans tous les traitements et que les différences observées sont effectives.

II. CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL

1) Mesure de la densité avant labour

a) Techniques de mesure

Avant labour, nous avons mesuré la densité apparente du sol à l'aide d'une sonde gamma LPC-INRA. Celle-ci est constituée de deux broches, l'une émettrice d'un rayonnement radioactif, l'autre réceptrice. La source radioactive ^{137}Cs émet un rayonnement dont l'atténuation dépend de la densité apparente du sol pour une épaisseur traversée donnée (Stengel *et al.*, 1986).

Cette technique a été validée au champ et comparée à celle du prélèvement de cylindres de volume donné. Il existe une relation linéaire proche de la bissectrice entre les deux types de mesures avec une corrélation de 0.942 ce qui traduit un bon ajustement (Lemmet, 1985).

L'avantage de cette technique est qu'elle perturbe peu l'état du sol et qu'elle s'utilise dans une large gamme d'humidités du sol. Elle ne permet qu'une caractérisation globale du volume que l'on suppose aussi homogène que possible.

La distance de scrutation et la position des mesures doivent donc être choisies en fonction de la variabilité présumée de la densité du sol.

Comme l'un des facteurs de structuration du sol les plus importants est le passage de roues d'engins qui entraîne une réduction du volume poral dans certaines conditions, la distance de scrutation doit correspondre à la largeur des roues des tracteurs utilisés antérieurement sur la parcelle. Celle-ci est supérieure ou égale à 30 cm (annexe IV.D1). Aussi avons-nous scruté une épaisseur de 30 cm.

Le sol a été scruté en profondeur tous les 5 cm sachant que l'effet du voisinage d'un milieu de densité différente (effet de l'interface matériau-air et celui des interfaces entre couches de sol de densité différente) devient significatif sur la mesure pour une distance inférieure à 3 cm environ. Cette distance varie, en fait, suivant l'écart de densité des deux couches et la distance de scrutation (INRA Avignon, Science du Sol, 1984).

Il existe deux modes de calibration :

- une calibration moyenne valable quelle que soit la largeur scrutée et prenant en compte les variations de distance entre récepteur et émetteur suivant la profondeur (en cas de non parallélisme des piges) ;
- une calibration spécifique de la largeur scrutée.

Pour un écartement entre piges de 20 cm, l'écart-type entre mesures est d'environ 0.05 g/cm^3 avec la calibration moyenne alors qu'il est de 0.01 g/cm^3 avec la calibration spécifique de la largeur scrutée si le parallélisme est correctement respecté. Mais, dès que l'écart entre piges dépasse la valeur théorique de plus ou moins 0.35 cm (ce qui s'est produit parfois lors des mesures) l'erreur devient plus importante avec le second mode pour une

terre à 20% d'humidité (Bertuzzi *et al.*, 1987), aussi avons-nous préféré le premier mode de calibration.

Comme nous ne nous intéressons qu'à la couche travaillée, dont l'épaisseur ne dépasse pas 30 cm, nous avons limité nos mesures à la scrutation de 0 à 35 cm.

A chaque emplacement 7 mesures de 2.5 à 32.5 cm ont donc été effectuées.

Chaque mesure, composée de trois comptages, est censée représenter une couche de 5 cm centrée sur la position de la sonde. Des prélèvements pour la mesure de l'humidité, stratifiés selon ces couches de 5 cm et composés de la terre issue des trous forés, ont été effectués simultanément.

Les comptages permettent de calculer la masse volumique humide à l'humidité du terrain : γ_{ww} .

Les prélèvements de terre permettent de calculer l'humidité du sol : W (annexe II.A4).

A partir de γ_{ww} et W , on calcule alors la masse volumique sèche à l'humidité du prélèvement : γ_{dw} .

b) Mesures effectuées

Nous avons caractérisé chaque traitement par trois descentes de sonde perpendiculaires au sens du travail de la parcelle, situées à 30 cm les unes des autres dans le sens de ce travail. Dans les traitements où une variabilité latérale de la résistance du sol (pénétrométrie) ou directement de l'état structural du sol (profil) a été constatée, nous avons mesuré la densité des différentes zones détectées.

2) Evaluation de la densité du sol après labour

La technique précédemment décrite n'a été utilisée que pour caractériser l'espace poral avant labour.

Après labour, l'organisation structurale du sol peut être assez fragile et la surface est très irrégulière si bien qu'il est difficile :

- de définir correctement le volume scruté et le plan par rapport auquel on définit la profondeur : si l'on choisit le plan horizontal tangent au sommet de la bande de labour le milieu scruté en surface risquerait d'être composé d'autant de vides que de terre ;
- d'assurer la perpendicularité des broches par rapport à la surface ;
- de ne pas perturber l'état et de ne pas modifier la densité lors de l'enfoncement des tubes de réservation.

Nous avons donc adopté une autre méthode d'estimation de la densité.

Grâce aux photos effectuées pour caractériser l'état structural du sol nous évaluons le volume de chaque bande après labour d'après la surface qu'elle occupe. Compte-tenu de la masse de terre travaillée (fonction de la largeur, la profondeur de travail et la densité du sol

avant labour), nous pouvons alors avoir accès à une estimation de la densité de la couche de sol après labour.

Il faut pour cela pouvoir définir le contour de chaque bande et adopter par conséquent une règle reproductible de définition de la surface.

La règle conventionnelle choisie consiste à définir la surface par le tracé successif des tangentes aux éléments structuraux (mottes et terre fine) situés en contact avec l'air extérieur, qui n'ont pas d'autre point de contact avec la section travaillée (Fig.II.A2, p. 56).

Nous définissons par conséquent deux types de vides :

- externes : en contact avec l'air extérieur ;
- internes : situés au sein de la bande de labour et sans contact avec la surface c'est-à-dire totalement indépendants de la règle précédemment mentionnée.

Sur les photos nous sommes capables d'identifier ainsi les vides de plus de 1 cm de longueur.

3) Analyse de l'espace poral

Grâce aux mesures de densité présentées ci-dessus, nous avons une caractérisation globale de l'espace poral du sol sur les traitements que nous avons effectués.

Pour réaliser une analyse de l'espace poral équivalente à celle présentée dans le chapitre introductif, c'est-à-dire dissocier les espaces poraux – structural entre mottes, structural intramottes et textural – il faut disposer de mesures complémentaires :

- la densité texturale ρ_{tw} à l'humidité de la mesure de densité apparente ρ_{dw} ;
- la densité solide ρ_s ;
- la densité des mottes ρ_r ;
- la teneur massique en mottes $\Delta m/m$.

Les deux premiers paramètres sont évalués, connaissant la texture du sol considéré, à partir d'une courbe de retrait sur petits agrégats Δ .

Le troisième varie entre 1.2 et 1.6 pour un sol de teneur en argile voisine (25%) avec une médiane et un mode de 1.47 (De Leon, 1991).

Le dernier est fourni par l'analyse des profils culturaux.

A partir de la teneur surfacique en mottes $\Delta S/S$, évaluée par rapport à l'ensemble mottes + terre fine et assimilée à une teneur volumique, et de la densité des mottes ρ_Δ qui varie entre 1.4 et 1.8 pour un sol à 25% d'argile avec un mode de 1.67 (De Leon, 1991) nous pouvons calculer à titre indicatif la teneur massique en mottes Δ .

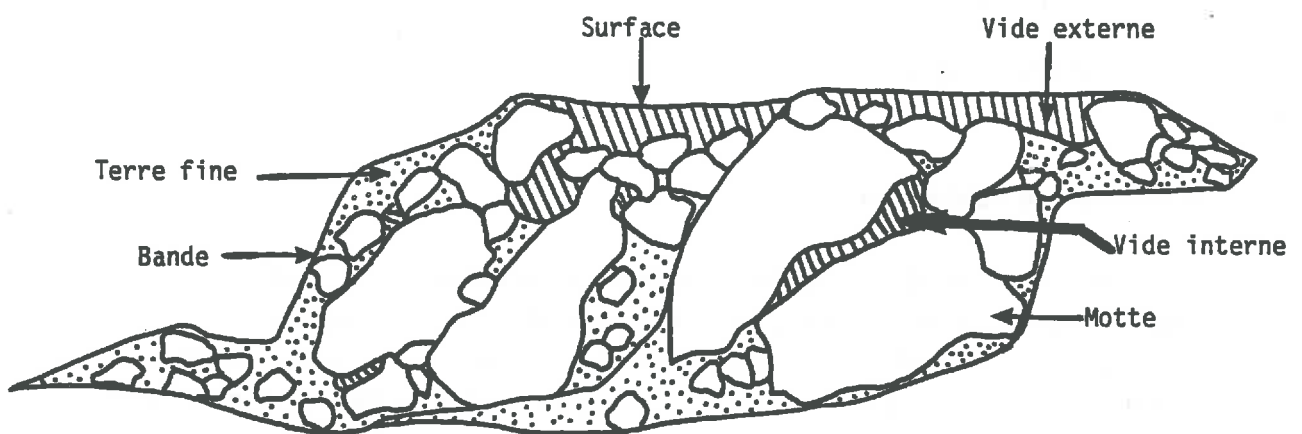


FIGURE II.A2 : Définition du contour de la bande de labour et de ses éléments constitutifs

Nous calculons alors à titre indicatif (Manichon & Roger-Estrade, 1990) :

- l'indice des vides structural

$$e^s_c = \rho_s \cdot (1/\rho_{dw} - 1/\rho_{tw}) ;$$

- l'indice des vides structural interne aux mottes

$$e^s_{int} = \rho_s \cdot (1 - m_{\Delta}/m) \cdot (1/\rho_{\Gamma w} - 1/\rho_{tw}) = \rho_s \cdot (1 - (\rho_{\Delta}/\rho_{dw}) \cdot S_{\Delta}/S) \cdot (1/\rho_{\Gamma w} - 1/\rho_{tw}) ;$$

- l'indice des vides structural entre mottes

$$e^s_{ext} = e^s_c - e^s_{int}.$$

III. CARACTERISATION DE L'ETAT D'HYDRATATION

L'état hydrique doit être caractérisé à une échelle correspondant à celle des critères de fonctionnement de l'outil qu'il risque de modifier, c'est-à-dire à l'échelle du passage de charrue.

Nous avons choisi de mesurer l'humidité pondérale moyenne de la couche de sol effectivement travaillée par la charrue car cet indicateur (teneur en eau massique) a souvent été utilisé pour représenter les modifications de résistance des matériaux terreux (Cf. analyse bibliographique).

Nous avons donc prélevé dans la muraille créée par chaque passage de charrue un échantillon de 25 cm² environ sur une profondeur correspondant à celle du labour.

On peut alors associer à chaque passage une teneur en eau massique moyenne correspondant à la moyenne des valeurs obtenues pour les deux murailles successives.

L'ensemble des valeurs obtenues sur chaque traitement permet par ailleurs de caractériser chacun de ceux-ci après analyse de la variabilité de l'humidité intra et intertraitement.

IV. CONCLUSION : Avantages et Inconvénients de la caractérisation

Le plan de sondage adopté présente l'avantage de pouvoir juger de la variabilité latérale des états structuraux sur la parcelle mais aussi de la variabilité longitudinale. Il permet donc de juger d'éventuels gradients dont nous ne nous serions pas prémuni par la position des traitements.

Il offre la possibilité de décrire la variabilité à une même échelle avant et après labour et de la faire correspondre à celle choisie pour caractériser l'outil. Nous avons ainsi pu retenir la section travaillée par un passage de charrue comme unité expérimentale après labour et y associer les unités de surface équivalentes à cette section avant labour.

La méthode d'analyse morphologique de l'état structural au sein du profil que nous avons mise au point 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 un espace à deux dimensions que l'on suppose représentatif de l'espace en trois dimensions qu'est la couche labourée ;

- de standardiser les documents résultant de l'observation pour pouvoir disposer de données comparables d'un site à l'autre ;

- de limiter le temps d'observation sur le terrain et ainsi les risques d'évolution des états sous l'action du climat, lorsque de nombreuses situations sont à analyser. Ces risques sont particulièrement importants après labour car l'état est très fragile ; elle nous offre donc la possibilité de balayer une gamme de situations suffisamment large pour arriver à des conclusions satisfaisantes sur le plan de la représentativité.

Le traitement au laboratoire a l'inconvénient de ne pas être entièrement automatisé et long mais nous avons vu les difficultés posées par une automatisation.

Par rapport à la caractérisation de De Leon, la procédure *in situ* a l'avantage de laisser en place les éléments structuraux. Elle permet de distinguer des états de fissuration qui ne sont plus visibles après prélèvement et fragmentation en mottes de 3-4 cm, échelle à laquelle il analyse l'état interne.

En revanche, elle a tendance à éliminer les mottes composites de type Z et Y, en créant une motte delta de plus petite taille et en dissociant la terre fine de bordure dans le premier cas, les noyaux delta de bordure qui forment d'autres mottes ou de la terre fine dans le second cas.

Elle ne permet probablement pas de distinguer les mottes X et gamma. Sur mottes isolées le pouvoir discriminatoire de l'oeil est très fort mais dans un profil où coexistent de forts contrastes locaux entre vides, terre fine et mottes il est beaucoup plus faible. La description d'un ensemble structuré de mottes au sein du profil devient d'autant plus séparatrice que les contrastes s'atténuent (cas de profils continus par exemple) car l'observateur s'attache alors aux nuances.

Cette méthode de caractérisation ne fournit néanmoins des données que dans un espace à deux dimensions (R^2) alors que la couche labourée est un système à trois dimensions (R^3). Nous devons donc nous interroger sur le biais que cela risque d'introduire dans les résultats et les possibilités de reconstruction qui pourront s'offrir à nous pour en tenir compte.

Ce type de problème est celui de la stéréologie qui s'est essentiellement intéressé aux erreurs faites sur des objets sphériques. D'après Coster & Chermant (1989), les erreurs faites sur la distribution des tailles d'objets sont plus importantes lorsqu'il s'agit de distribution en nombre d'objets (caractérisation topologique des objets) que lorsqu'il s'agit de distribution en mesure (longueur, surface, volume). L'erreur sera plus grande sur des longueurs que sur des surfaces.

Les méthodes de reconstruction d'une distribution en trois dimensions à partir d'une distribution en deux dimensions n'existent que dans le cas de particules convexes (6)

(6) Dans l'espace R^2 , un ensemble est dit "convexe" si, pour tout couple de points x_1 , x_2 , appartenant à X , le segment droit x_1 , x_2 est entièrement contenu dans X .

homéomorphes de la sphère. Les principales références relatives aux distributions de diamètres d'objets de différentes formes utilisent des méthodes de simulation. Elles sont essentiellement développées dans le cas de particules de forme constante et taille variable. Elles concernent alors les formes suivantes : la sphère, le cube, l'octaèdre tronqué, le dodécaèdre, le rhombododécaèdre, le tétrakaïdédcaèdre. Le cas des particules de forme et taille variables est plus complexe et n'a été traité que pour le cas des sphéroïdes.

Pour la sphère, il existe des relations analytiques permettant de calculer les moments d'une distribution dans R^3 à partir des moments d'une distribution dans R^2 . Elles sont plus robustes (7) pour les distributions en mesure que pour les distributions en nombre car, dans le premier cas, elles ne font pas intervenir d'estimateur. Les calculs sont plus complexes pour les distributions en nombre (Coster & Cherman, 1989).

Ces données bibliographiques nous laissent donc supposer que les erreurs de nos résultats dans R^3 sont plus faibles lorsque nous étudions la distribution surfacique de certains critères que lorsque nous étudions leur distribution en nombre. Elles montrent aussi que la reconstruction d'un profil dans R^3 est actuellement encore difficile.

D'après des travaux de simulation effectués à la station de Science du Sol INRA de Montfavet (Renault, com. pers.) sur des sphères qu'il suppose sectionnées de manière aléatoire et de distribution volumique log-normale d'espérance 1, bornée supérieurement, l'erreur sur le rayon moyen n'excède pas 13% lorsqu'il fait varier l'écart-type de 0.5 à 1.5 pour des valeurs de bornes supérieures de 10 ou 50.

Le biais introduit consiste à sous-estimer le rayon et l'écart-type dans R^2 .

Quand on tronque la distribution à 1 (nous n'identifions, en effet, pas les mottes de moins de 1 cm), l'écart entre les deux distributions diminue car les rayons les plus déformés, qui sont de petite taille (section en bordure de sphère), sont éliminés.

La figure II.A3 (p. 60) montre un exemple de ces résultats pour une distribution qui est log-normale sans troncature avec une espérance de 1 et un écart-type de 4.0, et pour laquelle on définit un rayon minimal de 1 et un rayon maximal de 50.

La caractérisation morphologique de l'état structural que nous faisons dans R^2 ne constitue donc probablement pas une trop mauvaise représentation de ce qu'elle est dans R^3 . Sa combinaison avec la caractérisation de l'espace poral proposée, qui nous permet à titre indicatif d'évaluer l'importance des volumes poraux, présente l'intérêt de nous assurer contre de grosses erreurs sur ceux-ci.

(7) Elles sont moins dépendantes de la "bonne" estimation de certains paramètres.

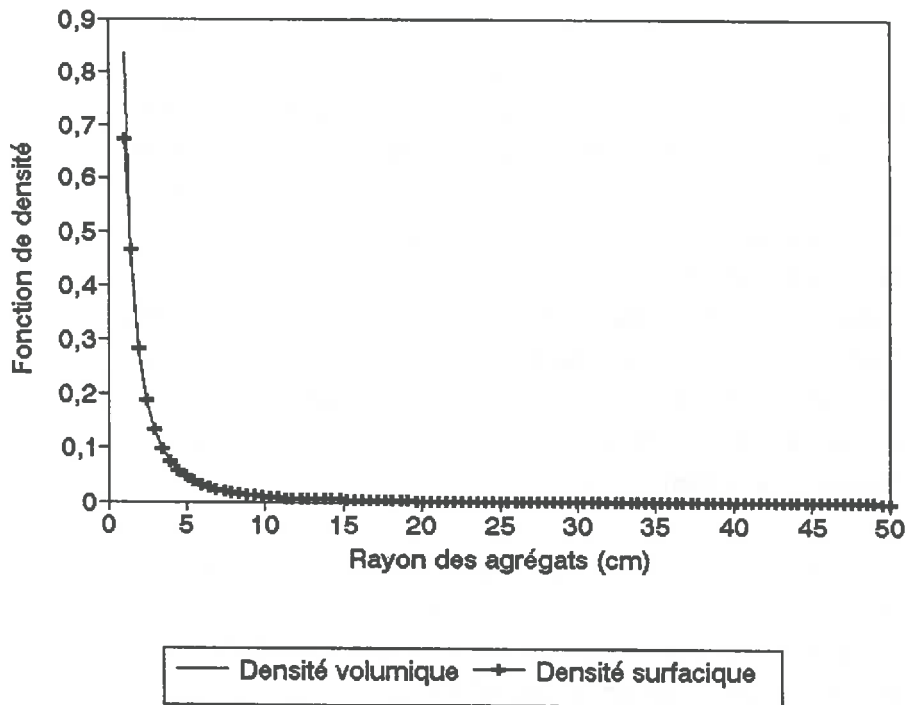


FIGURE II.A3 : Simulation des distributions volumiques et surfaciques des calibres (entre 1 et 50 cm) de sphères dont la distribution des calibres est supposée log-normale

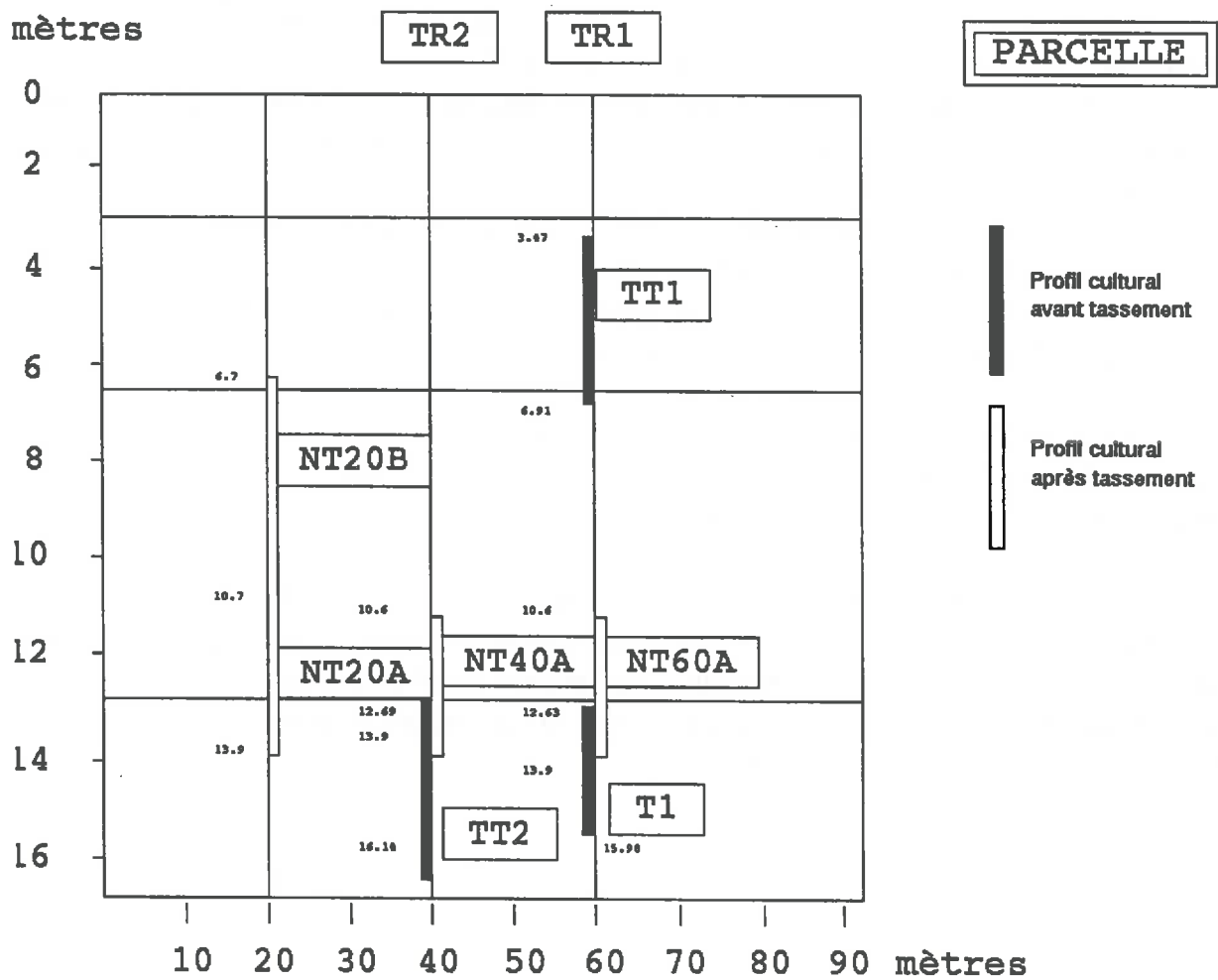


FIGURE II.B1 : Position sur la parcelle des profils de caractérisation de l'état avant labour

B. CHOIX DE L'EMPLACEMENT DES TRAITEMENTS

Le site retenu pour l'analyse de la relation "état initial-état transformé" est une parcelle située sur le site de Grignon en limon argileux ($A = 25.9\%$; $L = 58.1\%$; $S = 16\%$) à teneur en matière organique telle que $100 * MO/A = 8$).

I. CARTOGRAPHIE DES ETATS STRUCTURAUX EN PRESENCE SUR LA PARCELLE AVANT TASSEMENT

Les dimensions de la parcelle concernée étaient de 85 X 16.2 m. Les vingt premiers mètres ne pouvant être utilisés pour cet essai, la zone à prospector était donc située entre les cotes 20 et 85 m, ce qui nous a incité à réaliser 2 transects pénétrométriques d'une largeur égale à la parcelle aux cotes longitudinales 60 m (transect : TR1) et 40m (transect : TR2)(Fig.II.B1).

Nous avons adopté latéralement un pas de mesure de 20 cm, inférieur à la largeur des plus petites roues utilisées sur le centre expérimental. En chaque lieu nous avons enregistré l'effort à la pénétration sur une quarantaine de centimètres d'épaisseur, à l'aide d'un pénétromètre à main Stiboka muni d'un cône de surface 1 cm².

Dans chaque transect les mesures ont été faites le même jour à des humidités inférieures à la capacité au champ. Les humidités moyennes étaient donc probablement voisines. Cela laisse supposer que l'on a partout la même confusion d'effet structure-humidité sur la résistance à la pénétration.

La comparaison des efforts obtenus par transect conduit par conséquent à une cartographie des résistances mécaniques liée à l'état structural. Celle-ci ne peut être établie sur l'ensemble des valeurs acquises sur la parcelle car TR1 et TR2 ont été réalisés pour raison pratique à une journée d'intervalle, intervalle au cours duquel une évolution de l'état hydrique a pu avoir lieu.

Nous avons donc étudié séparément les profils de TR1 et ceux de TR2 puis comparé les deux cartographies.

Pour chaque profil pénétrométrique nous avons considéré la moyenne des valeurs obtenues tous les centimètres sur une couche de 5 cm. Ceci a été fait sur une profondeur de 30 cm correspondant à la couche labourée dont la limite inférieure nous était indiquée par une variation d'effort importante.

Nous définissons alors pour chaque profil 6 variables supposées indépendantes indicatrices d'une résistance mécanique localisée :

- p5 (0- 5cm) ;
- p10 (6-10cm) ;
- p15 (11-15cm) ;
- p20 (16-20cm) ;
- p25 (21-25cm) ;
- p30 (25-30cm).

Notre objectif est en fait d'analyser, pour les variables ci-dessus, la variabilité entre profils et de détecter ceux qui témoignent d'une résistance mécanique supérieure ou inférieure à la moyenne des profils.

Nous avons donc utilisé une méthode statistique descriptive l'Analyse en Composantes Principales (ACP), qui consiste à projeter le nuage de points sur les axes qui maximisent les écarts à la moyenne des individus.

1) Analyse statistique descriptive

Sur chacune des ACP nous ne retenons que les axes 1 et 2 qui représentent plus que la part d'une seule variable initiale soit 17%.

Ils représentent :

- 78.8% sur TR1 (58.7% pour l'axe 1, 20.1% pour l'axe 2) ;
- 82.3% sur TR2 (63% pour l'axe 1, 19% pour l'axe 2).

Les variables fortement corrélées à l'axe 1 ($r > 0.75$) sont :

- p10 à p25 sur TR1 ;
- p10 à p30 sur TR2.

Cet axe oppose les profils à faible valeur par rapport à la moyenne pour ces variables, de ceux à fortes valeurs.

Parmi ces derniers, l'axe 2 oppose ceux à fortes valeurs en surface (p5 et p10 élevés) à ceux à fortes valeurs en profondeur (p25-p30 élevés sur TR1 ; p20-p25 élevés sur TR2). La corrélation à l'axe 2 dépasse 0.3 pour toutes ces variables.

La figure II.B2 présente dans le cas de TR1 les projections sur les axes 1 et 2, des individus les mieux représentés dans ce plan ($\cos^2 \text{axe1} + \cos^2 \text{axe2} > 0.5$) (8) pour illustrer ces résultats.

Il apparaît nettement trois groupes de profils :

- des profils peu résistants ;
- des profils résistants en surface ;
- des profils résistants en profondeur.

2) Interprétation spatiale des différences de résistance observées

Parmi les profils de plus forte résistance la distinction de deux couches, dont la supérieure est d'une épaisseur voisine des horizons H1, semble indiquer diverses origines des états rencontrés.

Cela nous incite à chercher l'origine de cette variabilité latérale de la résistance pénétrométrique à la lumière des interventions antérieures sur la parcelle.

(8) Nous appelons "cosaxe1", le cosinus de l'angle entre le vecteur définissant l'individu dans l'espace vectoriel des individus et sa projection sur l'axe principal 1 ; pour "cosaxe2", il s'agit de la projection sur l'axe principal 2.

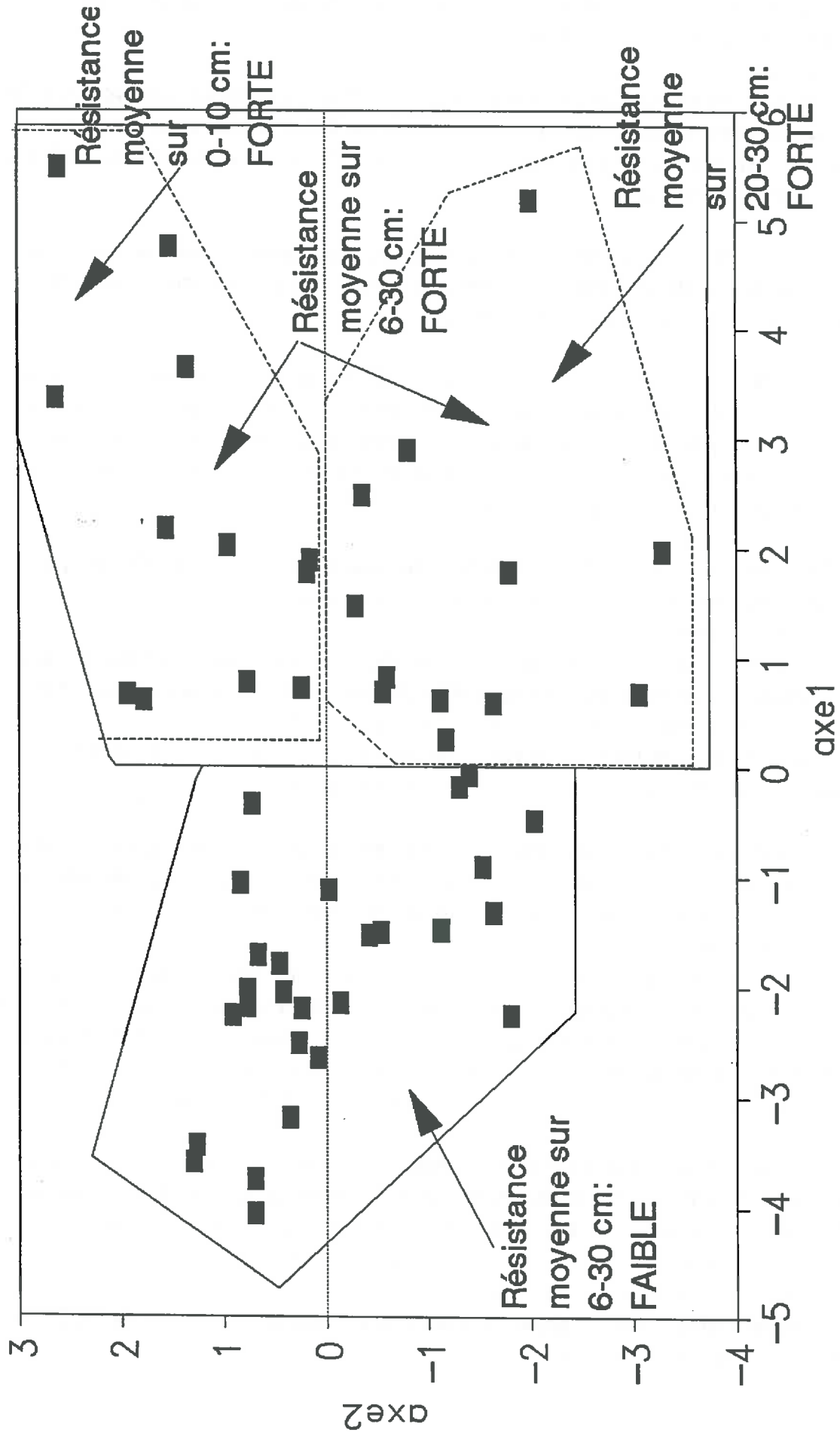


FIGURE II.B2 : Projections (sur les axes 1 et 2) des individus dont la somme des cosinus carrés des angles avec les axes principaux 1 et 2, issus de l'ACP réalisée sur les mesures pénétrométriques du transect TR1, est supérieure à 0.5

Les positions L1, des passages de roues après les dernières reprises pour l'implantation du précédent : semis et traitement phytosanitaire, ont pu être repérées de manière fiable.

Ces deux opérations ne peuvent expliquer les fortes résistances observées sur TR1 et TR2 que si elles correspondent en particulier à de fortes résistances sur 0-10 cm : le tassement est supérieur immédiatement sous les roues et aucun travail ultérieur de fragmentation n'a eu lieu.

La figure II.B3 (p. 65) montre que c'est le cas des zones L1 liées au pulvérisateur et non pas de celles qui sont liées au tracteur de semis. Ces derniers correspondent en effet aussi bien à de fortes qu'à de faibles valeurs.

De fortes valeurs moyennes sur l'horizon 0-30 cm existent néanmoins sur TR1 et TR2 en dehors des roues de pulvérisateur, en particulier à 0.4, 1 et 3.2 m du bord de parcelle et à l'emplacement de certaines roues de semoir, comme le montre la figure II.B4 (p. 65). Seuls des tassements antérieurs à la dernière reprise dont les traces doivent encore être visibles entre 16 et 25 cm peuvent expliquer cela.

Dans le cas de TR1, nous avons donc représenté figure II.B5 (p. 66) les valeurs de résistance moyenne sur 16-25 cm en fonction de la localisation.

Nous constatons :

- que les bords de parcelle sont plus hétérogènes et ont une plus forte fréquence de zones résistantes (valeurs supérieures à 60 kgF) que le centre de la parcelle : 33% entre 0 et 6 m, et 29% entre 12 et 16.2 m contre 23% entre 6 et 12 m ;
- que les valeurs les plus élevées semblent obéir à une double périodicité d'un pas d'environ 3 m soit la largeur des outils utilisés sur la parcelle.

Nous pouvons penser que ces dernières valeurs correspondent aux deux traces de roues des passages de reprise superficielle. Mais, l'écart entre les deux périodicités varie entre 1.4 et 1.5 m alors que la voie du tracteur utilisée pour cette opération est de 1.65 m avec des pneus de 40 cm.

La différence semble trop importante pour que la double périodicité s'explique uniquement par des recoupements entre passages. D'autre part, cela ne suffit pas à expliquer l'ensemble des valeurs de plus de 60 kgF. Ces valeurs sont donc probablement le résultat d'états créés avant le labour du précédent, la périodicité des tassements restant visible grâce à un dépôt assez constant des masses de terre compactées.

Nous avons complété les mesures pénétrométriques par des profils culturaux d'une largeur au moins égale aux outils utilisés pour le semis et la reprise soit plus de 3 m, positionnés de manière à y inclure en plus une trace de roue de pulvérisateur. Nous pouvons ainsi analyser l'état structural en relation avec l'ensemble des facteurs de structuration précédemment mentionnés (Fig.II.B1).

L'état est effectivement fragmentaire avec une diminution très forte de l'épaisseur de l'horizon H1 sous la roue de pulvérisateur.

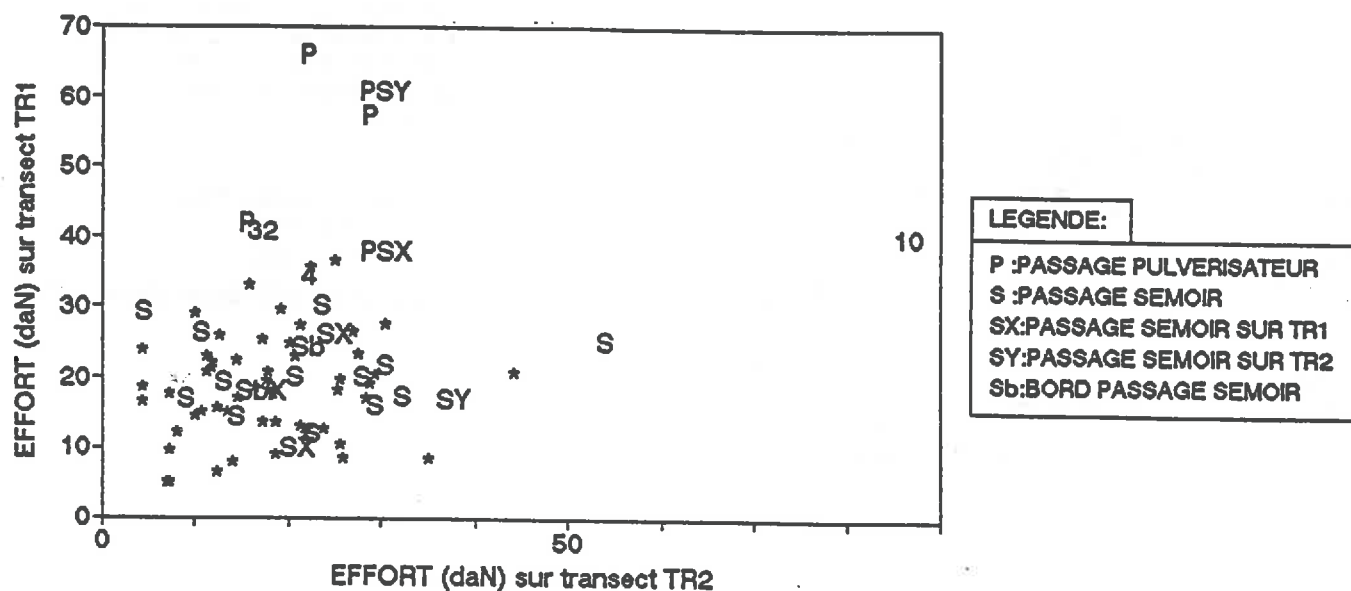


FIGURE II.B3 : Comparaison des résistances pénétrométriques de la couche 0-10 cm sur TR1 et TR2 - mise en relation avec l'histoire de la parcelle

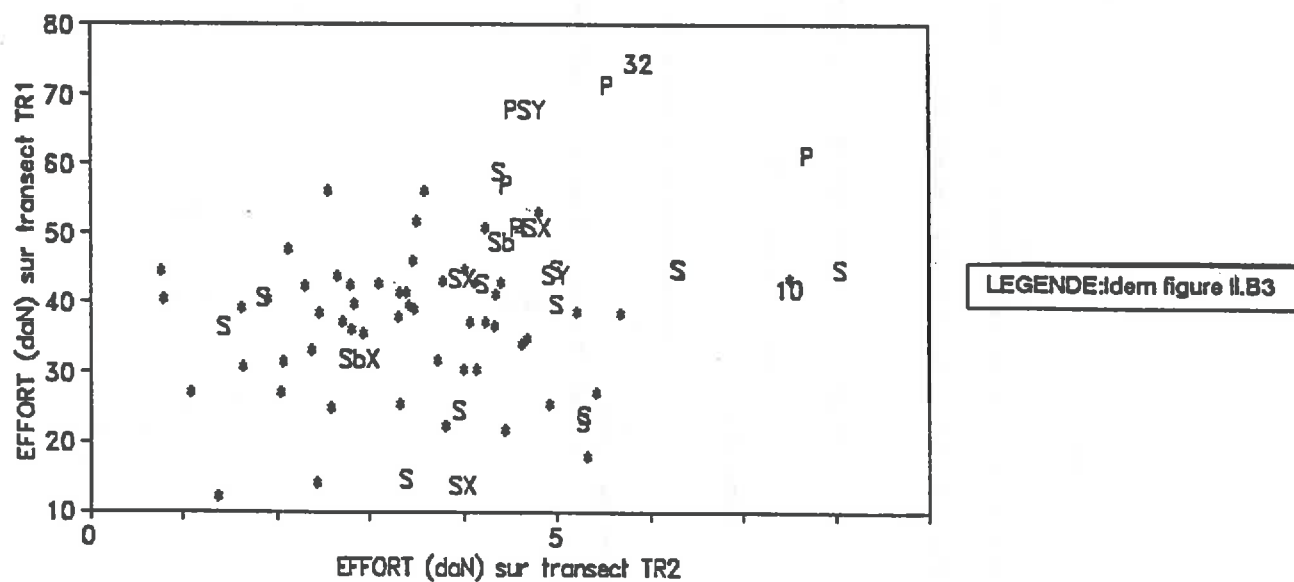


FIGURE II.B4 : Comparaison des résistances pénétrométriques de la couche 0-30 cm sur TR1 et TR2 - mise en relation avec l'histoire de la parcelle

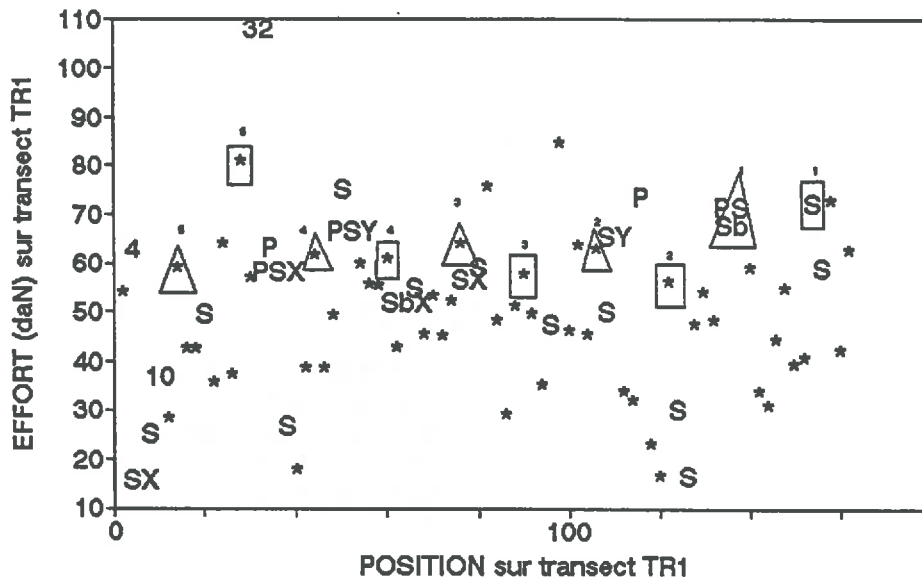


FIGURE II.B5 :
Résistance pénétrométrique
de la couche 16-25 cm sur le
transect TR1 en fonction de
la position latérale sur la
parcelle

LEGENDE: Idem figure II.B3
□ Périodicité 1
△ Périodicité 2
s: r¹ des passages détectés

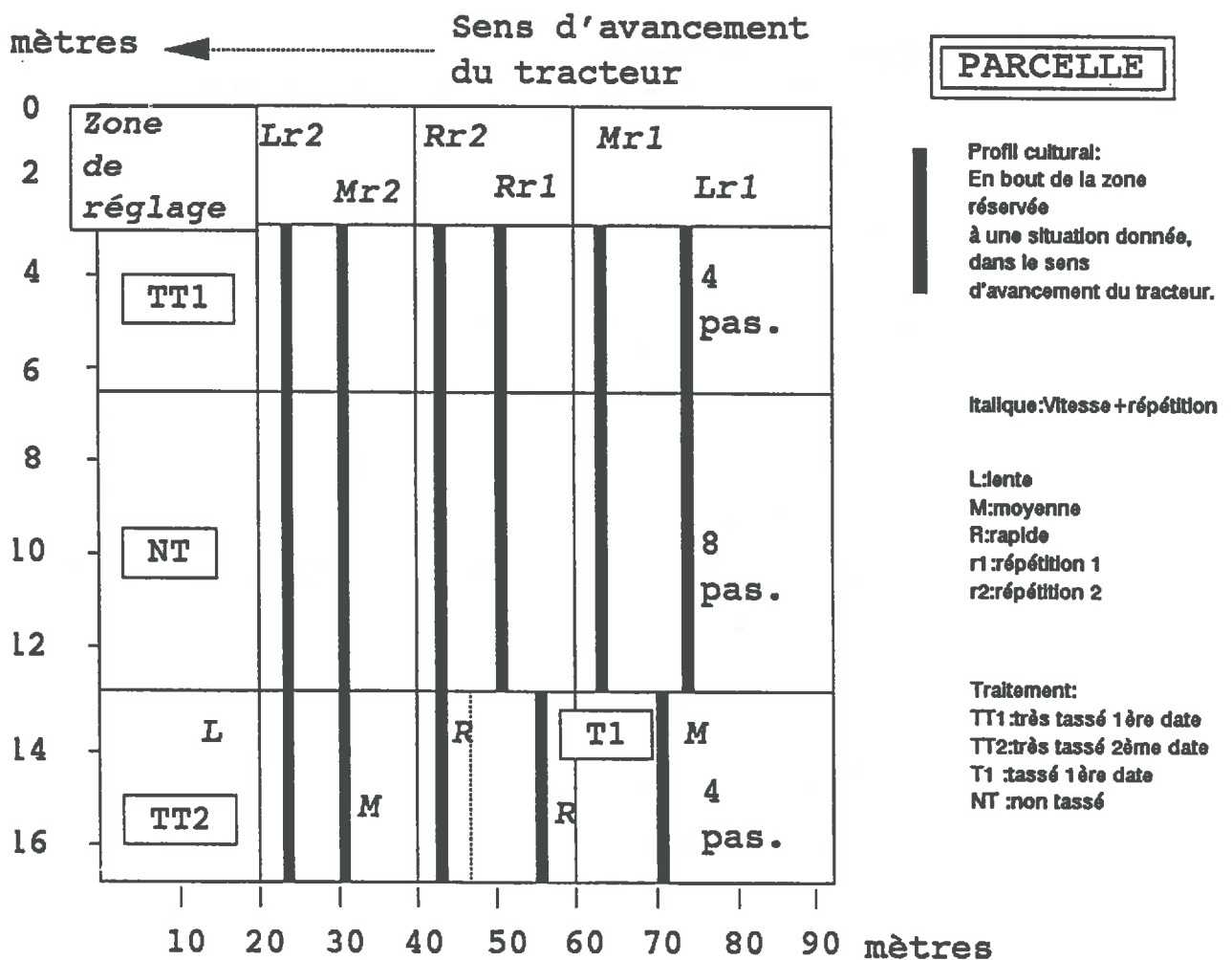


FIGURE II.B6 : Position sur la parcelle des situations étudiées
et des profils de caractérisation de l'état après labour

Sur TR1 nous avons testé la correspondance entre descriptions morphologiques et mesures de résistance : la présence de blocs tassés Δ dans les zones 11.2-11.5 ; 12.1-12.3 ; 12.9-13.1 ; 13.3-13.4 correspond avec des zones de forte résistance. Le détail des états observés est analysé au chapitre III aussi nous ne les décrivons pas plus dans le présent chapitre.

3) Choix des emplacements des traitements expérimentaux

Cette analyse nous permet de faire les deux choix suivants en matière d'emplacement :

- pour éviter une trop forte hétérogénéité et des états trop dégradés (sous roue de pulvérisateur) dans NT nous avons décidé d'affecter les bordures de parcelle aux traitements tassés, en espérant y gommer la variabilité existante ;

- la bordure qui est la plus hétérogène et qui inclut les zones les plus résistantes sur 0-30 cm a été affectée à TT1 car :

- * c'est un traitement des plus dégradants (3 passages en conditions humides) ;
- * il faut éviter que TT2 (tassement jeune) ne se trouve à l'emplacement de tassements importants trop anciens, si l'on souhaite tester l'effet de thixotropie.

Nous minimisons ainsi la variabilité intratraitements, mais nous ne nous prémunissons pas contre les gradients ce qui justifie d'autant plus les contrôles que nous effectuons pour juger de cette dernière.

Nous avons donc abouti à une répartition en bandes longitudinales perpendiculaires pour les deux facteurs état structural et vitesse, qui avoisine celle d'un dispositif en criss-cross (Philippeau, 1973).

Les surfaces prévues hors zones de circulation sont :

- 347.2 m² (5.6 X 62 m) pour NT ;
- 173.6 m² (2.8 X 62 m) pour TT1 ;
- 86.8 m² (2.8 X 31 m) pour TT2 et T1.

Le plan réalisé est présenté figure II.B6.

Malgré la non-indépendance entre parcelles, nous appliquerons ultérieurement à titre indicatif une analyse de variance des états en criss-cross.

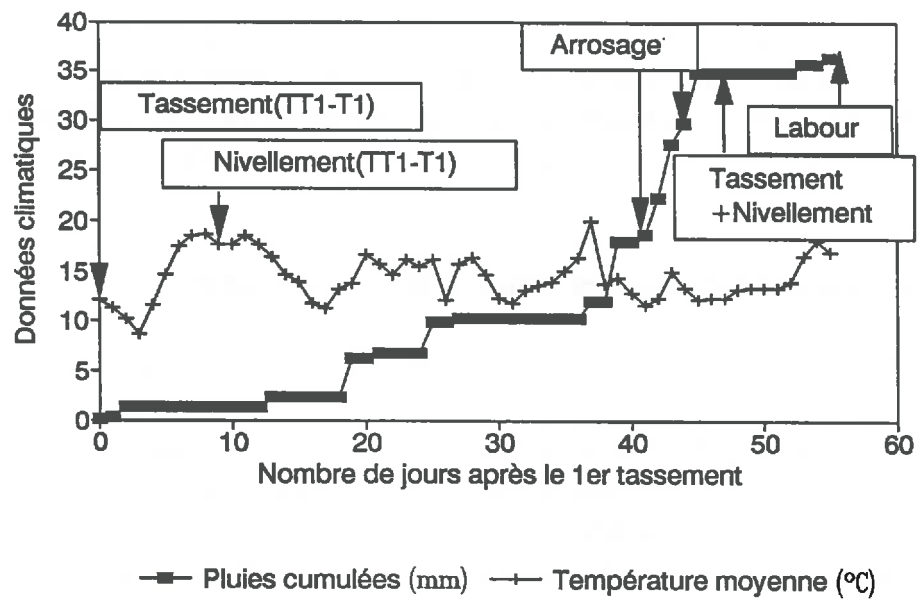


FIGURE II.B7 : Histoire climatique de la parcelle de Grignon entre le premier tassement et le labour

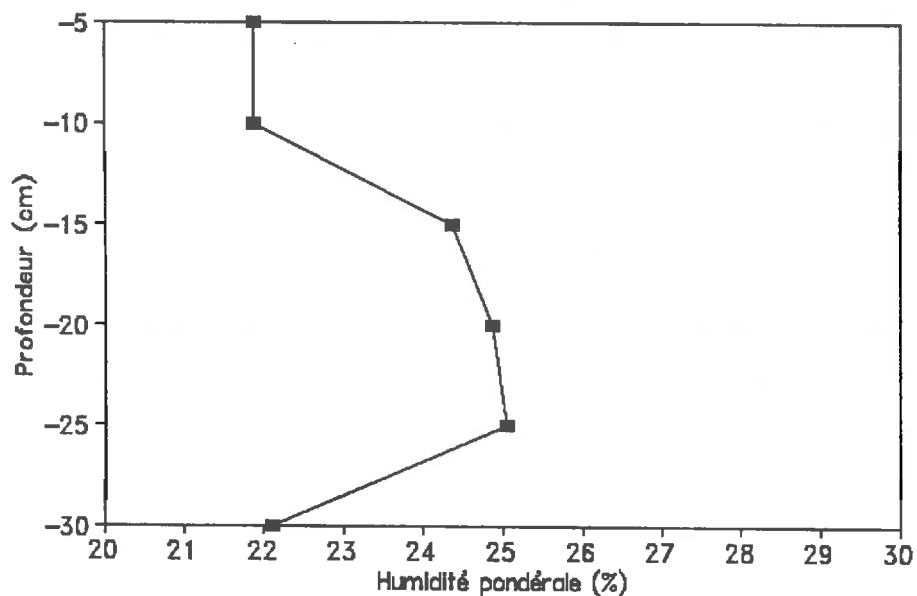


FIGURE II.B8 : Profil hydrique le jour du tassement dans TT2

II. CONDITIONS DE REALISATION DES TRAITEMENTS

La première date de tassement est le 25/04/90, la seconde le 11/06/90.

Le mois de mai étant marqué par un petit nombre de précipitations, nous avons dû arroser deux fois l'ensemble de la parcelle (le 5/06/90 et le 8/06/90) pour réaliser le second tassement, les pluies de début juin étant insuffisantes (Fig.II.B7). T1 et TT1 ont été arrosés de même que TT2. Les quantités d'eau apportées ont été 25 mm, puis 14 mm.

Après tassement, une opération de nivellement a été réalisée en surface, en particulier pour éliminer les bourrelets à la jonction de 2 passages successifs de tracteur. Ce nivellement a eu lieu:

- 9 jours après tassement dans TT1 et T1 ;
- le jour même dans TT2.

Dans TT1 et TT2, où l'on pouvait supposer qu'un passage supplémentaire ne modifierait que très peu la porosité du sol déjà fortement réduite, le nivellement a été réalisé à l'aide d'une herse rotative réglée très superficiellement (environ 4 cm).

Dans T1, où les risques de tassements supplémentaires étaient, par contre, plus grands, il a été réalisé manuellement à l'aide d'un râteau.

L'humidité sur 0-30 cm était en moyenne de :

- $W = 26\%$ ($\sigma=0.08$ (9)) lors des tassements dans TT1 et T1 ;
- $W = 23\%$ ($\sigma=1.6$) lors du tassement dans TT2.

L'écart-type est beaucoup plus élevé lors de la deuxième date de tassement, ce qui suggère un profil hydrique moins homogène dans TT2.

Les couches 0-10 cm et en dessous de 25 cm sont en effet plus sèches que la couche 10-25 cm (Fig.II.B8).

L'humidité de celle-ci est légèrement inférieure (1% de différence) à celle de la couche correspondante dans TT1 et T1. La différence de profil hydrique constatée est importante par rapport à la sensibilité au compactage, qui *a priori* est plus faible dans TT2 que dans TT1 compte-tenu de la couche sèche de surface (Guérif, 1984).

Nous avons suivi l'évolution de l'état hydrique de la couche à labourer au cours de l'intervalle de temps séparant le tassement du labour. Pendant les 40 premiers jours, il y a un dessèchement très important sur les cinq premiers centimètres plus continu et important dans TT1 que dans NT et T1 (Fig.II.B9, p. 70). Cette dessiccation affecte la couche sous-jacente (5-25 cm) dans les deux traitements tassés mais peu dans NT (Fig.II.B10, p. 70).

T1 reste plus humide jusqu'au deuxième arrosage. Les arrosages ont eu pour effet de gommer les différences.

(9) Par commodité, nous notons σ , l'estimateur non biaisé $\hat{\sigma}$.

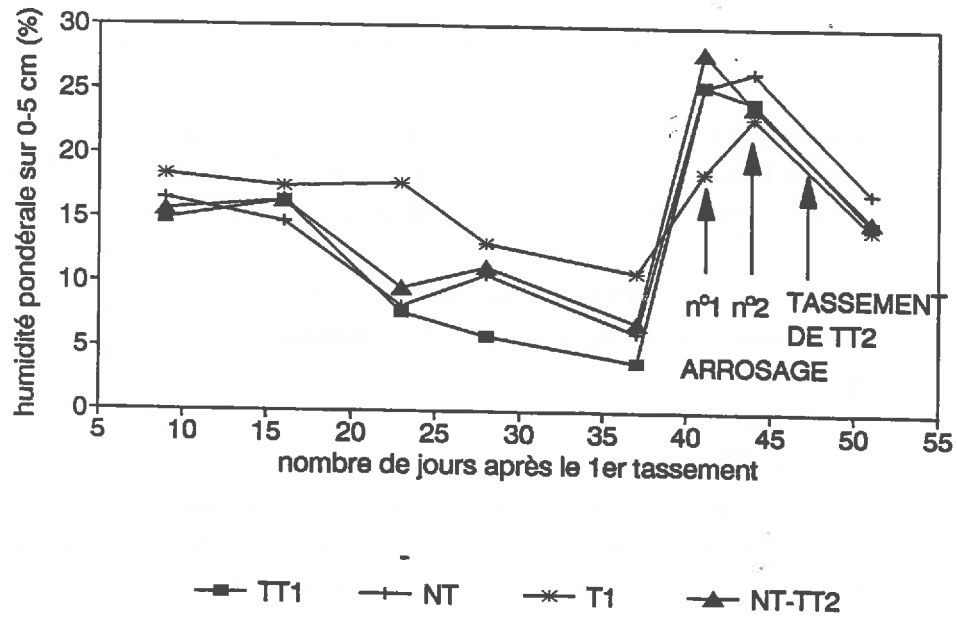


FIGURE II.B9 : Evolution de l'humidité pondérale de la couche 0-5 cm dans les traitements pendant la période séparant les deux tassements réalisés

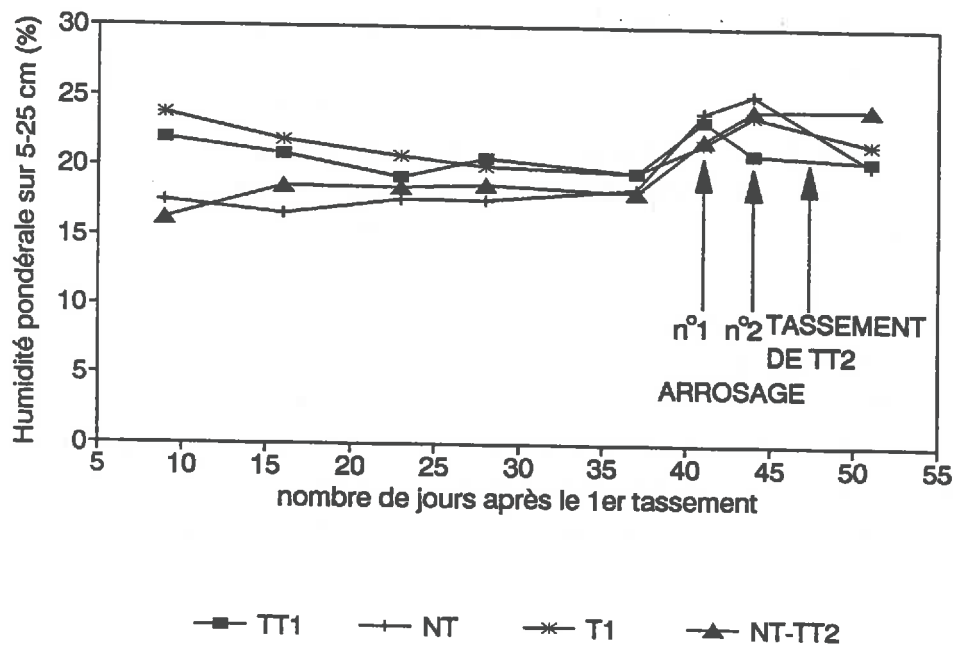


FIGURE II.B10 : Evolution de l'humidité pondérale de la couche 5-25 cm dans les traitements pendant la période séparant les deux tassements réalisés

III. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES ETATS OBTENUS

1) Caractérisation morphologique

Les profils culturaux effectués avant labour, soit deux mois dans NT et une semaine dans les traitements tassés, (dont la localisation figure sur le plan II.B1) montrent que l'on a effectivement créé une gamme de variation d'états structuraux dans le H5.

NT	Etat de type o Δ et b Δ fissurés. Importance du delta variable selon la position latérale.
T1	Etat rappuyé avec mottes delta et deltabis. Zones massives par endroits - Pas un état c typique. Existence d'une variabilité latérale portant sur le mode d'assemblage.
TT2	Etat c Δ
TT1	Etat c Δ avec présence de fissures liées probablement à l'évolution climatique de l'état du sol pendant le mois qui précède le labour

Tableau II.B1

A titre d'illustration nous présentons un exemple des différentes situations rencontrées (une photo par traitement, figures II.B11 à B14, p. 72 et 73).

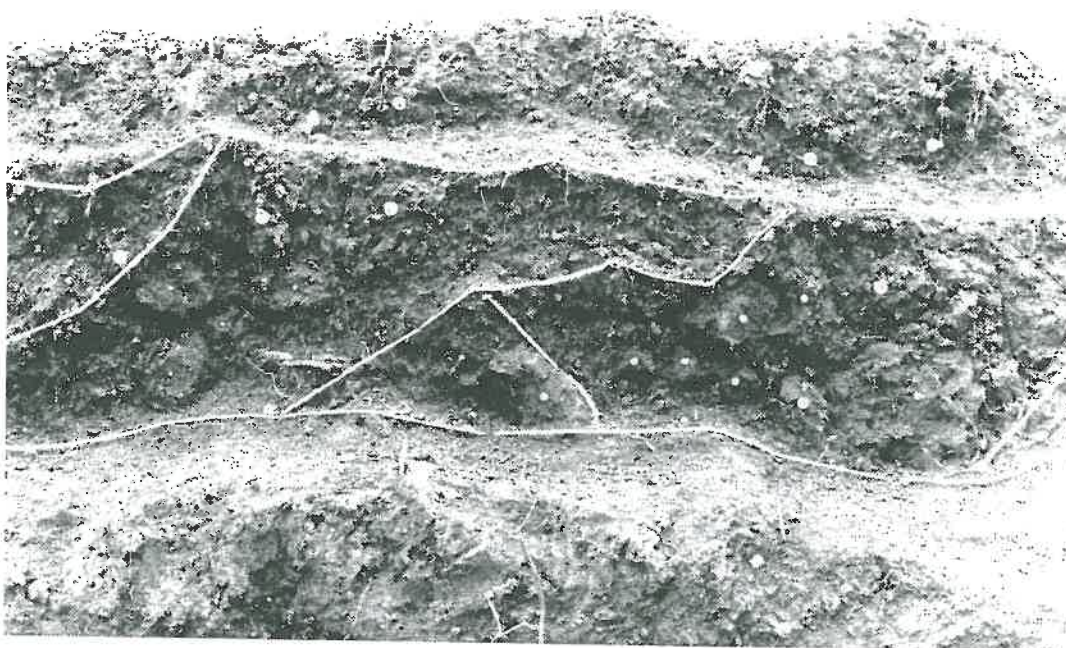


FIGURE II.B11 : Profil cultural avant labour dans NT

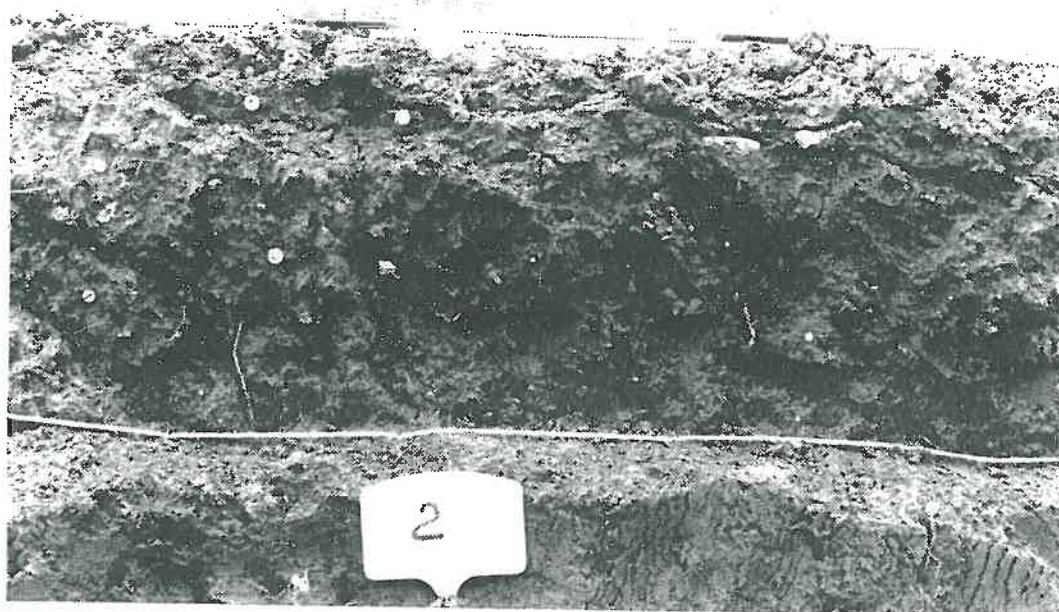


FIGURE II.B12 : Profil cultural avant labour dans T1

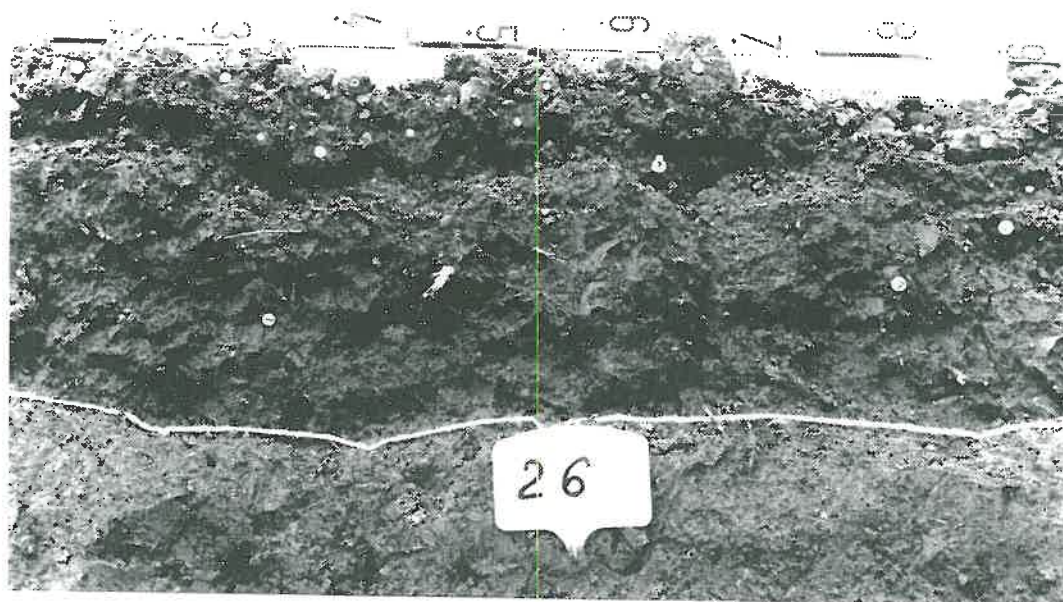


FIGURE II.B13 : Profil cultural avant labour dans TT1

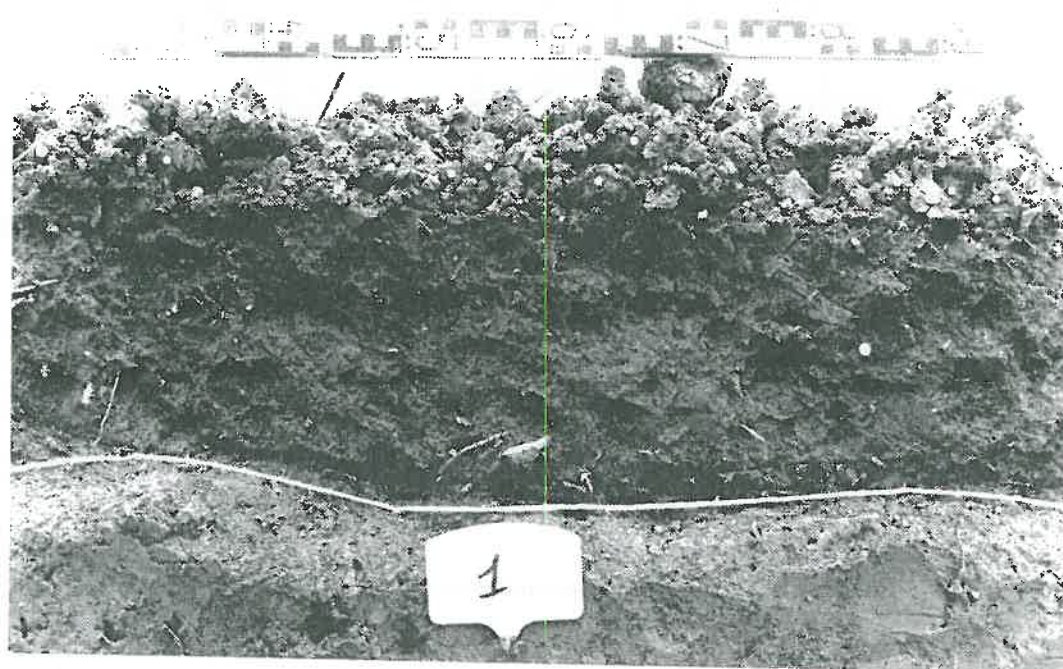


FIGURE II.B14 : Profil cultural avant labour dans TT2

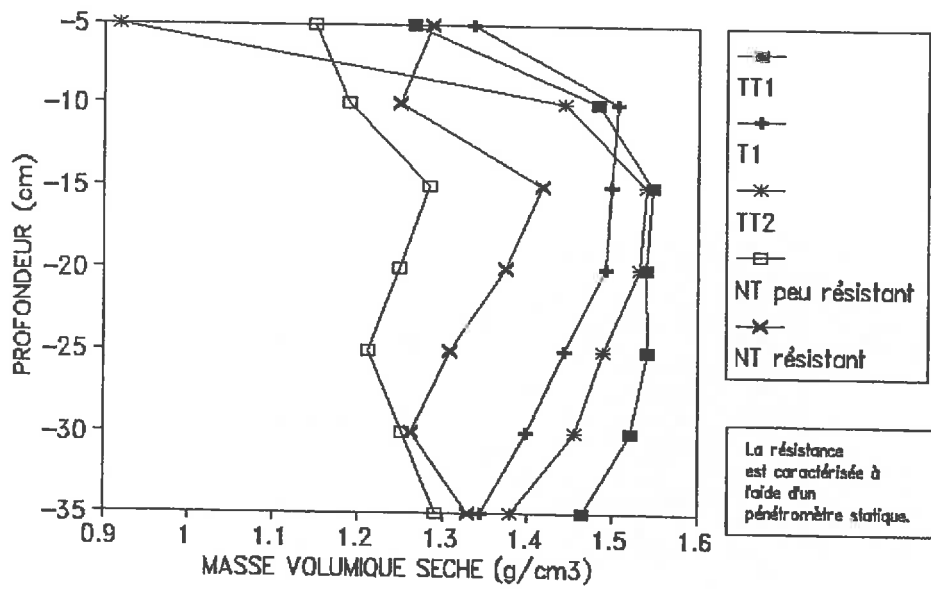


FIGURE II.B15 :
Profils de densité apparente
du sol sur les traitements
avant le labour de la parcelle
de Grignon

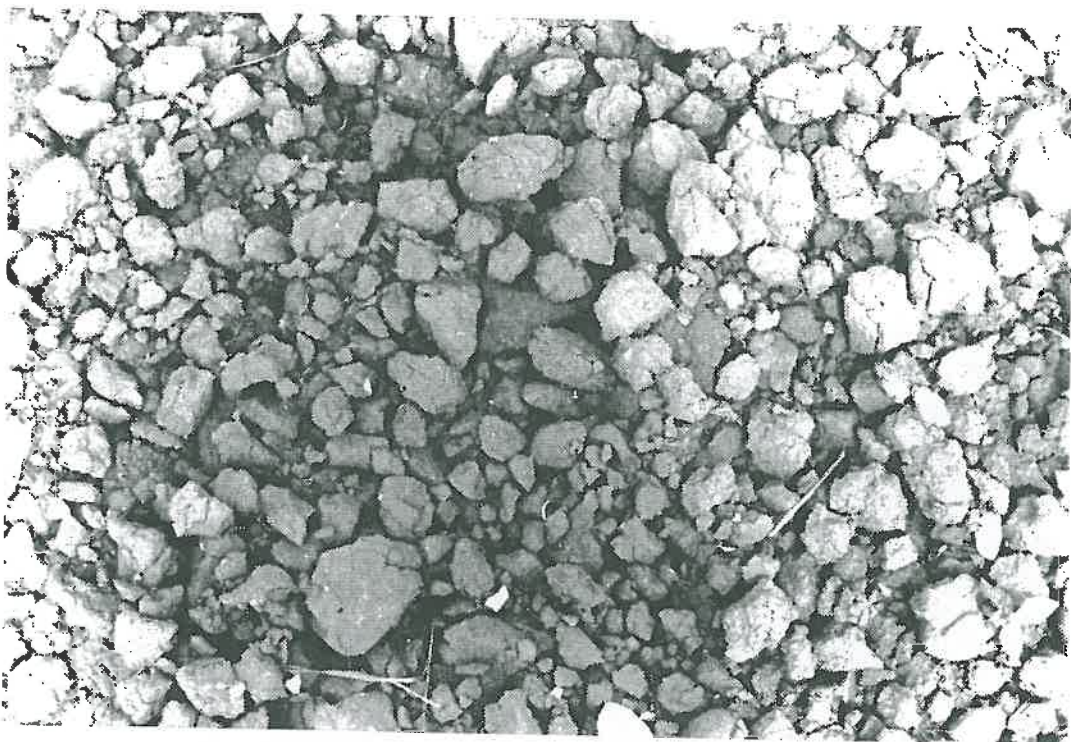


FIGURE II.B16 : Etat de surface avant labour dans TT1

2) Caractérisation de l'espace poral

a) Description des profils de densité (10)

Les profils de densité obtenus sont présentés figure II.B15. Ils ont été effectués à la même date pour tous les traitements soit une semaine avant le labour.

La densité correspond à celle de la couche de 5 cm d'épaisseur limitée en profondeur par le plan correspondant à la cote indiquée.

Pour chaque traitement on distingue une zone superficielle plus poreuse (H1) :

- préexistant sur la parcelle pour NT ;
- créée par l'opération de nivellement après tassement sur les autres traitements.

Cette reprise, effectuée sur 3 à 4 cm, a créé un horizon de 5 à 10 cm au maximum sur TT1 et TT2, de 5 cm au maximum sur T1.

Elle a conduit :

- sur TT1, à la création de mottes très compactes Δ inférieures à 5 cm (Fig.II.B16) ;
- sur TT2, à la création de petites mottes (< 5cm) composées de noyaux Δ sans tri de la terre fine étant donnée la teneur en eau plus élevée (Fig.II.B17, p. 76), ce qui explique une porosité importante en surface ; sur T1 l'effet a été moins important (Fig.II.B18, p. 76).

En-dessous de 10 cm, nous avons bien créé des situations de densités différentes :

- dans TT1 et TT2, la densité atteinte après tassement est supérieure à 1.45 jusqu'à 20 cm, alors qu'elle ne dépasse pas 1.4 dans NT ;
- dans NT, la stratification adoptée permet de distinguer deux types de profils jusqu'à 25 cm : densité de 1.2-1.275 (NTa) contre 1.3-1.4 (NTb) dans le H5 ; comme on pouvait le prévoir, la zone qui était la plus résistante (NTb) au pénétromètre est aussi celle qui est la plus dense ;
- T1 correspond à une valeur intermédiaire de 1.5 de 0 à 20 cm.

En-dessous de 20 cm la densité dans TT2 est légèrement plus faible que dans TT1, mais cela ne concerne qu'une faible part du volume ultérieurement travaillé (5 cm).

Ces résultats sont cohérents avec ceux de Guérif (1984) qui montrent que la sensibilité au compactage dépend :

- du nombre de passages sur la parcelle ;
- du profil hydrique initial.

(10) La densité est un nombre sans dimension, dont la valeur correspond à celle des mesures de masse volumique en g/cm³ présentées.

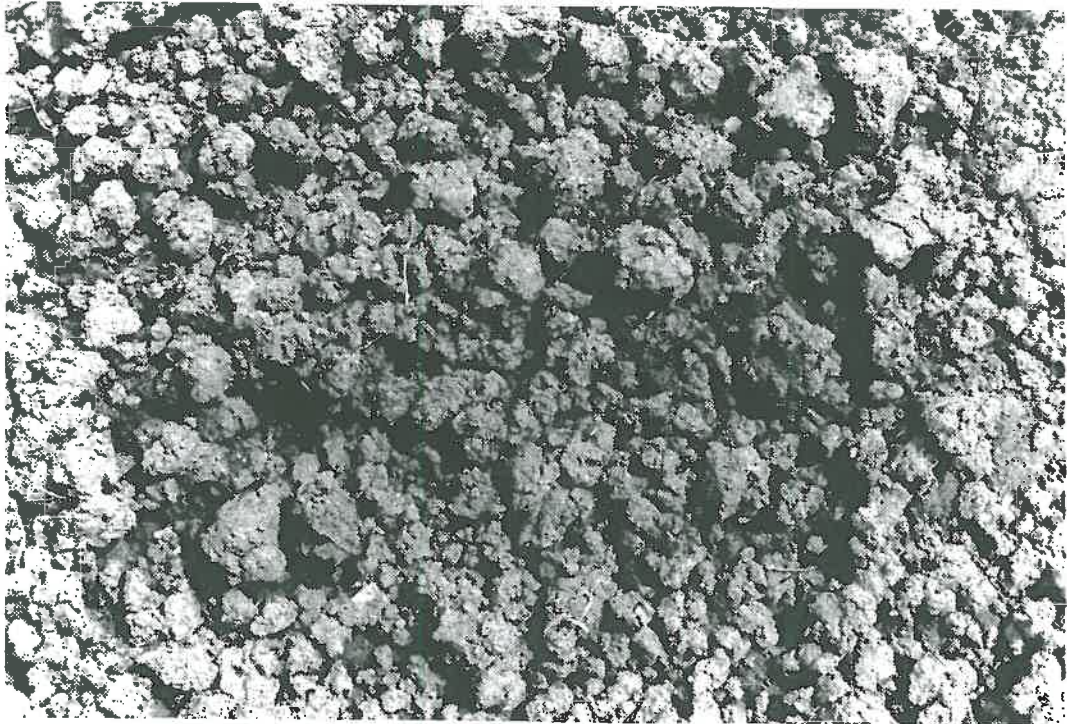


FIGURE II.B17 : Etat de surface avant labour dans TT2



FIGURE II.B18 : Etat de surface avant labour dans T1

A partir de 30 cm la différence entre les traitements n'est plus significative compte-tenu des erreurs relatives sur les mesures sauf pour TT1. Dans ce dernier cas, le tassement a pu affecter une plus grande profondeur mais on peut aussi suspecter une corrélation entre les deux mesures proches de l'interface entre la couche tassée et le sous-sol (de densité nettement inférieure : 1.55 au lieu de 1.3), d'où une valeur surestimée de la densité.

b) Analyse de la répartition de l'espace poral

La densité texturale est *a priori* la même pour toutes les situations, aussi les variations de densité apparente observées traduisent des organisations différentes de l'espace poral structural. Il est toutefois intéressant de décrire celui-ci à l'aide de l'analyse de la porosité dont nous avons parlé précédemment.

L'humidité dans la couche 10-25 cm était en moyenne lors des mesures de sonde gamma :

- de 22.7% dans les traitements tassés ;
- de 22.0% dans NT.

D'après la courbe de retrait texturale, l'indice des vides textural était donc :

- de 0.687 dans les traitements tassés ;
- de 0.672 dans NT.

D'après les profils réalisés (Cf. Chap. III) la teneur en delta (mottes fissurées ou non et deltabis) moyenne par rapport à la somme mottes + terre fine est :

- 76% dans TT1 ;
- 81% dans TT2 ;
- 52% dans T1 ;
- 15 à 21% dans NT.

La porosité de la couche 10-25 cm peut donc être décrite par les données présentées au tableau II.B2.

TRAITEMENTS	INDICE DES VIDES		
	Structural total	Structural entre mottes	Structural intramottes
TT1	0.061	0.032	0.029
TT2	0.061	0.041	0.020
T1	0.120	0.054	0.066
NTb	0.264	0.135	0.128
NTa	0.586	0.450	0.136

Les calculs ont été faits avec une densité solide de 2.71

Tableau II.B2

Ce tableau montre que l'indice des vides est plus faible dans les traitements tassés que dans NT et que la différence porte sur l'organisation de l'espace poral entre les mottes mais aussi sur leur état interne. Le compactage par les roues d'engin a été suffisant pour affecter à la fois le second et le premier niveau d'organisation même si les mottes présentes dans NT ont une porosité déjà assez faible.

Le traitement NT correspond à une large gamme d'indice des vides mais la variation concerne plus l'organisation entre les mottes que l'organisation interne des mottes.

Dans T1 la porosité interne des mottes est réduite mais elle n'a pas atteint sa plus faible valeur.

Dans TT1 et TT2 l'état interne des mottes est plus affecté que dans T1.

La différence entre TT1 et TT2 porte sur la répartition de l'espace poral entre les deux niveaux d'organisation. L'indice des vides total est le même mais la porosité interne des mottes est plus forte dans TT1. Cette différence est due en premier lieu (Cf. formule de calcul de l'indice au § A.II.3) à la différence de teneur en delta entre TT1 et TT2. Or, celle-ci n'est que de 5%, ordre de grandeur de la précision que nous offre la méthode utilisée.

Il paraît d'autre part nécessaire de tester la sensibilité des résultats à la densité des mottes delta et à la densité des mottes gamma que nous avons choisies, à titre indicatif, égales au mode des distributions proposées par De Leon pour ces types de mottes. Nous faisons figurer en annexe II.B1 les valeurs obtenues lorsqu'on effectue les calculs avec les premiers ou les troisièmes quartiles des distributions qu'il propose. Les résultats observés se conservent mais cela montre que la différence entre TT1 et TT2 peut aussi s'expliquer par le choix des valeurs de densité des mottes delta et gamma. La différence n'est donc pas significative.

IV. CONDITIONS DE REALISATION DU LABOUR

L'humidité moyenne de la couche labourée était de :

- 20% en moyenne sur TT1 et T1 ;
- 20.5% en moyenne sur NT ;
- 21% en moyenne sur TT2 avec une plus forte variabilité ;

(Fig.II.B19).

La charrue utilisée était une charrue Huard, munie de deux corps 14 pouces à versoirs universels avec un talon sur le corps arrière, d'une roue de jauge, sans rasette, trainée par un tracteur Massey Ferguson MF 595 de puissance maximale 88ch. Le troisième point était laissé flottant, avec seulement une chaîne pour permettre le relevage en bout de raie.

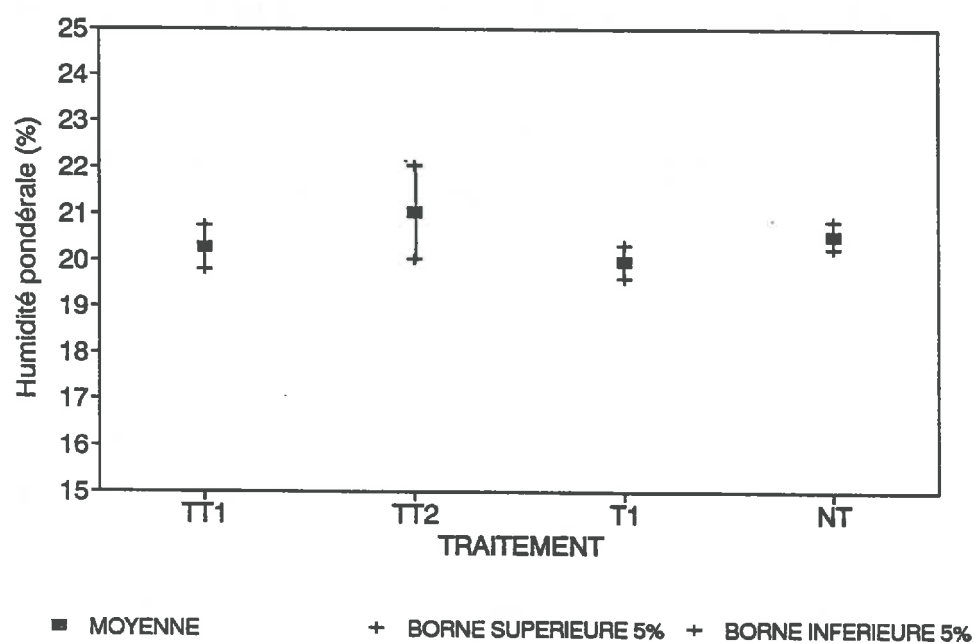


FIGURE II.B19 : Humidité pondérale de la couche labourée mesurée sur des prélèvements réalisés dans la muraille du labour des différents traitements (moyenne et intervalle de confiance)

Les vitesses d'avancement du tracteur v_T ont été enregistrées en continu (Cf. Chap. IV). Grâce à ces mesures, on peut distinguer 3 classes de vitesse au Tab. II.B3 :

- vitesse lente : $1.00 < v_T < 3.10$ km/h, et plus précisément $2.40 < v_T < 2.70$, sauf deux passages à respectivement 1.00 et 3.1 km/h (codée 1) ;

- vitesse moyenne : $4.00 < v_T < 5.00$ km/h, sauf un passage à 5.40 km/h dans NT (codée 2) ;

- vitesse rapide : $6.50 < v_T < 7.69$ km/h, qui n'a pu être réellement obtenue dans TT1 où $5.00 < v_T < 6.50$ (codée 3).

Deux répétitions (codées 1 et 2) ont été distinguées dans TT1 et NT. La vitesse lente n'est pas représentée sur T1.

Le tableau II.B3 (ci-dessous) résume les différentes situations en présence après labour.

SITUATION	ETAT INITIAL	VITESSE (km/h)	Code	REPETITION
NT11	NT (codé 2)	>2.4 et <3.1	1	1
NT12				2
NTm1		>4 et <5.5	2	1
NTm2				2
NTr1		>6.5 et <7.7	3	1
NTr2				2
T1m	T1 (codé 3)	>4 et <5.0	2	1
T1r		>6.5 et <7.7	3	1
TT21	TT2 (codé 4)	>2.4 et <2.7	1	2
TT2m		>4 et <5.0	2	2
TT2r		>6.5 et <7.7	3	2
TT111	TT1 (codé 1)	>1 et <2.7	1	1
TT112				2
TT1m1		>4 et <5.0	2	1
TT1m2				2
TT1r1		>5.0 et <6.5	3	1
TT1r2				2

La gamme de conditions est donc large pour un même site.

Une légère déviation de la charrue par rapport à sa direction initiale d'avancement, a été constatée dans T1 pour le passage en bordure de NT. La charrue risque, dans ce cas, d'avoir labouré une unité à cheval sur les deux traitements, donc une unité moins tassée que prévu. Nous déterminerons, lors de l'analyse des résultats, si cette unité se distingue ou non des autres unités de T1 et s'il convient donc de l'éliminer ou pas.

V. CONCLUSION

Sur la base d'une analyse de la variabilité des résistances pénétrométriques, nous avons déterminé la position des traitements en cherchant à minimiser la variabilité intratraitement de l'état structural du sol, mais sans pouvoir nous prémunir contre les gradients éventuels dans la longueur de la parcelle.

L'application des traitements a conduit à la création d'états structuraux contrastés tant sur l'organisation de l'espace poral entre mottes que sur leur état interne. Nous avons exploré trois classes de vitesses de labour distinctes couvrant la gamme des vitesses généralement utilisées dans les conditions agricoles.

C. DETERMINATION DES VARIABLES OPERATOIRES POUR DECRIRE LA VARIABILITE DE L'ETAT STRUCTURAL DU SOL

Nous rappelons que l'état que l'on caractérise après labour est le résultat :

- du labour lui-même ;
- de l'évolution de l'état créé par le labour, entre ce dernier et la date d'observation.

Pour décrire l'effet direct de cette opération nous avons cherché à réduire au maximum la période d'observation grâce à la méthode photographique adoptée.

Mais il faut aussi :

- adopter une stratégie d'observation qui permette de s'assurer que l'on n'introduit pas une confusion entre l'effet des facteurs que l'on cherche à mettre en évidence et l'évolution de l'état sous l'action du climat : celle-ci consiste en l'observation de situations analogues en début et en fin de période d'observation pour détecter un éventuel effet date ; nous avons cherché à privilégier la comparaison entre états structuraux ;

- ne retenir alors que les variables les plus représentatives de la variabilité de l'état obtenu qui sont indépendantes de la date d'observation.

Pour tester cet effet date, nous avons utilisé le traitement NT car la gamme de variation de l'état structural y est plus importante et plus à même de révéler des évolutions.

I. STRATEGIE D'OBSERVATION

Nous rappelons que l'unité expérimentale retenue est le passage de charrue. Dans chaque situation quatre passages de charrue jointifs sont observés successivement afin de disposer de plusieurs unités comparables par situation.

Nous avons privilégié la comparaison entre états structuraux en observant :

- en premier, pour une même vitesse (la vitesse moyenne) et une même répétition (la n°2), les situations correspondant à TT1, NT, puis TT2 ; puis T1 dans la répétition où il est représenté ;
- puis dans la même répétition, en respectant le même ordre entre les traitements, les situations correspondant aux vitesses rapides puis lentes ;
- puis dans TT1 et NT les situations de la répétition 1, en changeant l'ordre d'observation pour les différentes vitesses.

Nous avons alors complété l'analyse par l'observation des quatre derniers passages de NT dans la répétition 1 (vitesse lente, puis moyenne, puis rapide) puis la répétition 2 (vitesse rapide, puis moyenne, puis lente) pour tester l'effet date d'observation.

Le calendrier d'observation qui en résulte figure au tableau II.C1.

Tableau II.C1 : Dates d'observations des situations après labour

SITUATION	DATE D'OBSERVATION
TT1m2	20/06/90
NTm2	20/06/90
TT2m	21/06/90
T1m	21/06/90
TT1r2	22/06/90
NTr2	22/06/90
TT2r	23/06/90
T1r	23/06/90
TT112	24/06/90
NT12	25/06/90
TT21	25/06/90
TT1m1	27/06/90
NTm1	27/06/90
TT1r1	27/06/90
NTr1	28/06/90
TT111	28/06/90
NT11	28/06/90
NT11 (passages 4 à 8)	29/06/90
NTm1 (passages 4 à 8)	29/06/90
NTr1 (passages 4 à 8)	02/07/90
NTr2 (passages 4 à 8)	02/07/90
NTm2 (passages 4 à 8)	03/07/90
NT12 (passages 4 à 8)	03/07/90

Tableau II.C2 : Eléments structuraux caractérisés dans le profil

TYPES D'OBJETS		CODE VARIABLE %surface/section	
MOTTES	DELTA	Sd	SD
	DELTABIS DELTAFISSUREES 1 NIVEAU 2 NIVEAUX 3 NIVEAUX	Sddb Sdb S1n S2n S2S3n S3n	
	GAMMA	Sg	Sgtf
TERRE FINE		tf	
VIDES	INTERNES EXTERNES	Svi Svs	

II. DETERMINATION DES VARIABLES REPRESENTATIVES DE L'EFFET DIRECT DU LABOUR

Cette détermination des variables les plus représentatives de l'état obtenu par le labour s'est faite d'après l'analyse des situations observées après labour dans NT.

Nous avons commencé par analyser l'importance spatiale des objets reconnaissables : différents types de mottes, vides et terre fine, puis dans un second temps nous avons étudié la taille des mottes.

1) Analyse de la variabilité des surfaces occupées par les divers objets

Nous désirons mettre en relation les individus, c'est-à-dire les unités expérimentales, avec les variables indicatrices de l'importance proportionnelle des divers objets et comparer la variabilité inter et intrasituations.

Nous avons donc utilisé une méthode essentiellement descriptive l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), fondée sur la représentation des relations entre individus et variables dans un espace où les distances entre points sont des distances du χ^2 . Elle permet une comparaison des "profils" des individus pour les variables que l'on analyse.

a) Analyse statistique descriptive : détermination des critères de description

L'AFC a été faite sur les 48 unités observées dans NT et l'ensemble des variables correspondant aux surfaces occupées par les objets Sd, S1n, S2n, S3n, Sg, tf, Svi et Svs dont la signification est présentée au tableau II.C2 (p. 83). La variable Sdb étant nulle dans tous les cas, elle n'a pas été introduite dans l'analyse.

Le nuage est de dimension 8. En l'absence de structure particulière chaque axe correspondrait donc à 12.5% de l'inertie. Nous avons choisi ce seuil pour limiter l'interprétation des axes.

Les trois premiers axes apparaissent alors porteurs d'information. Ils expliquent 72.7% de la variabilité (35.2% ; 19.8% ; 17.7% pour les axes 1, 2 et 3).

Nous avons représenté figure II.C1 les projections des variables et des individus les mieux représentés ($\cos^2 \text{axe1} + \cos^2 \text{axe2} > 0.5$) sur les axes 1 et 2, soit 21 individus.

Les individus sont repérés par le nombre de jours entre le labour et l'observation ainsi que la vitesse de labour utilisée.

Le premier axe se caractérise par deux variables, S3n et Sg, qui ont pour contributions relatives 60.8 et 26.2% et qui ont des projections de signes différents.

Cela discrimine les unités labourées à vitesse rapide, en particulier celles observées trois jours après le labour qui ont de fortes valeurs de S3n.

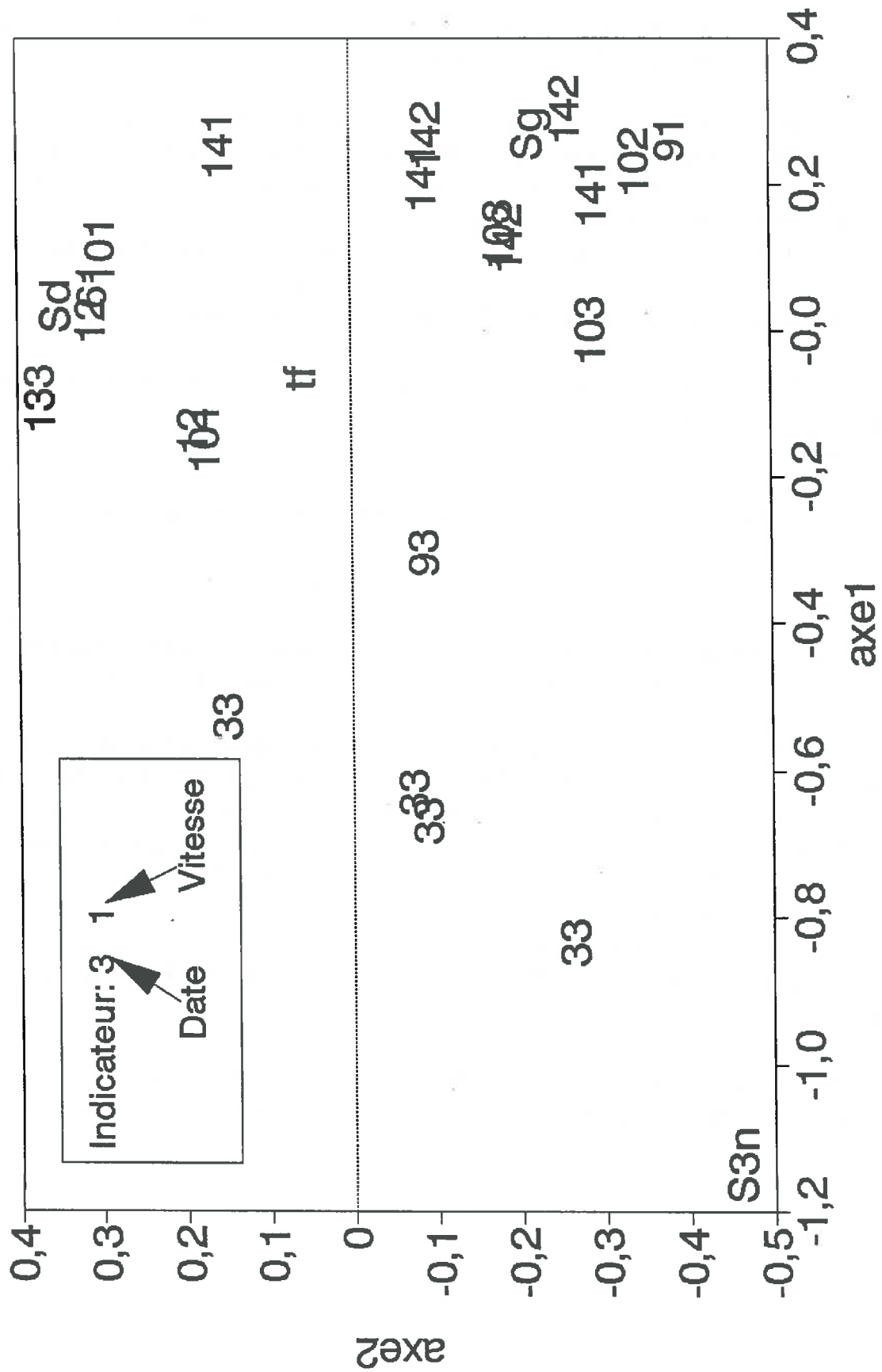


FIGURE II.C1 : Projections (sur les axes 1 et 2) des individus dont la somme des cosinus carrés des angles avec les axes principaux 1 et 2, issus de l'AFA réalisée sur les types d'objets après labour du traitement NT, est supérieure à 0.5

Le deuxième axe est formé par une opposition entre les variables Sg et Sd dont les contributions relatives à l'axe sont respectivement 29.3 et 28.8%.

Le troisième axe se caractérise par les variables S2n et Sg avec 69.4 et 14.5% de contributions relatives. Les variables ont des projections de signes différents.

Ces deux derniers axes discriminent les unités observées tardivement qui sont à forte teneur en gamma. Le troisième axe permet de distinguer parmi les unités à fortes teneurs en gamma, celles qui ont des mottes deltafissurées.

La contribution à l'axe 1 des quatre unités observées le troisième jour après le labour est très élevée (58.8%). Nous avons donc, dans un second temps, éliminé ces individus de l'AFC. Les trois premiers axes ne sont plus alors porteurs que de 67.2% de l'information (25.2 ; 23.3 ; 18.7% pour les axes 1, 2, et 3).

L'axe 1 oppose Sg à Sd et S2n (information donnée par les axes 2 et 3 de l'analyse précédente) avec 38.2, 23.1, et 18.2% de contributions relatives.

L'axe 2 se caractérise par S2n et S3n (59.8 et 19.4% de contributions relatives) dont les projections sur l'axe sont de signes opposés.

L'axe 3 se caractérise par S3n et Sg (56.6 et 18.2% de contributions relatives) de signes opposés sur l'axe.

Les variables détectées sont donc les mêmes que dans l'analyse précédente.

b) Description de la variabilité et tests d'hypothèse quant à son origine

Il semble d'après les analyses descriptives précédentes :

- qu'il y ait une relation entre la vitesse et la teneur en mottes très fissurées S3n ; ceci est confirmé par une augmentation de S3n au-dessus de 6 km/h (Fig.II.C2) ;

- que la teneur en mottes gamma augmente avec la date d'observation ; ceci est net à partir du 8ème jour après labour (Fig.II.C3) ; on constate une diminution parallèle de la teneur en terre fine (Fig.II.C4, p. 88) alors que la somme des deux variables $S_g + t_f = S_{gtf}$ varie peu au cours de la période considérée (Fig.II.C5, p. 88) ; ce changement brusque est associé à des événements climatiques les 7 et 8èmes jours (Fig.II.C6, p. 89) :

* de fortes pluies ;

* des températures de plus de 20°C ;

tout se passe donc comme s'il y avait eu reprise en masse de la terre fine sous l'action des pluies et formation de mottes gamma ;

- que la variabilité de S2n augmente avec la date d'observation (Fig.II.C7, p. 89) alors que cette tendance disparaît avec $S_{2n} + S_{3n} = S_{2S3n}$ (Fig.II.C8, p. 90).

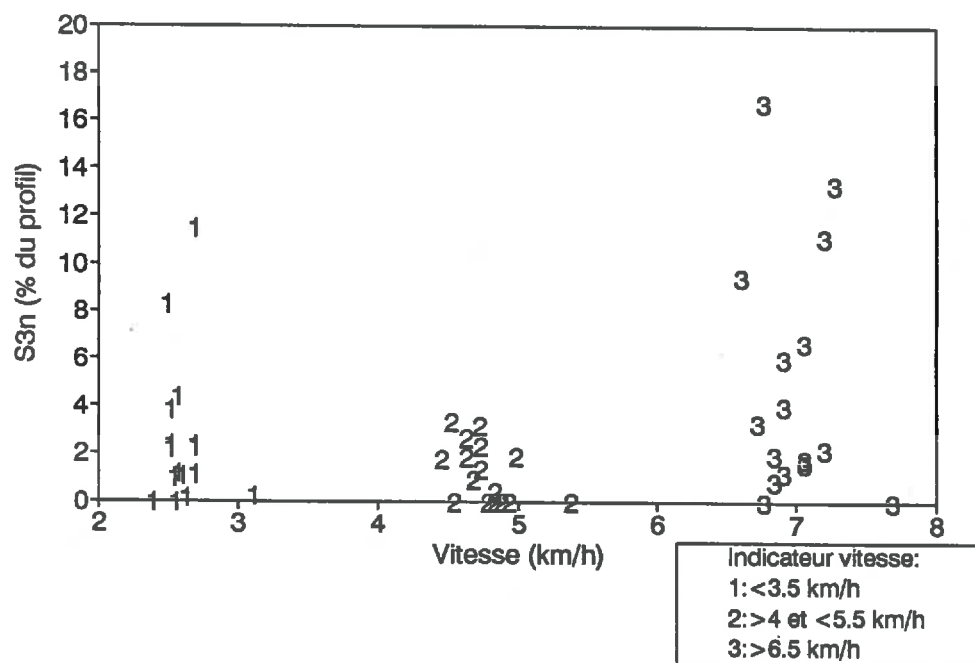


FIGURE II.C2 : Relation entre la teneur surfacique en mottes fissurées 3 niveaux et plus (S3n) après labour et la vitesse d'avancement du tracteur sur le traitement NT

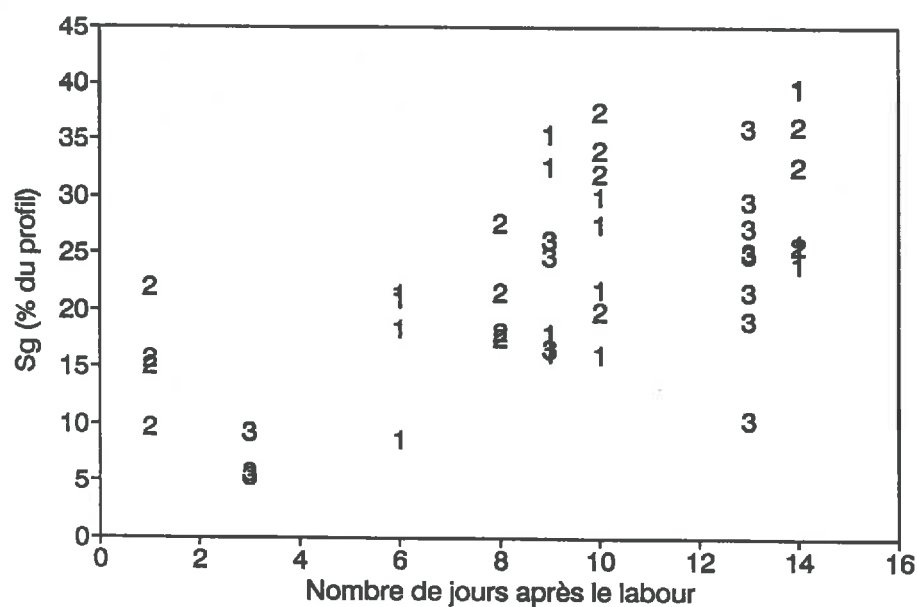


FIGURE II.C3 : Relation entre la teneur surfacique en mottes gamma (Sg) et le délai entre le labour et la date d'observation sur le traitement NT (Indicateur des individus : vitesse d'avancement du tracteur)

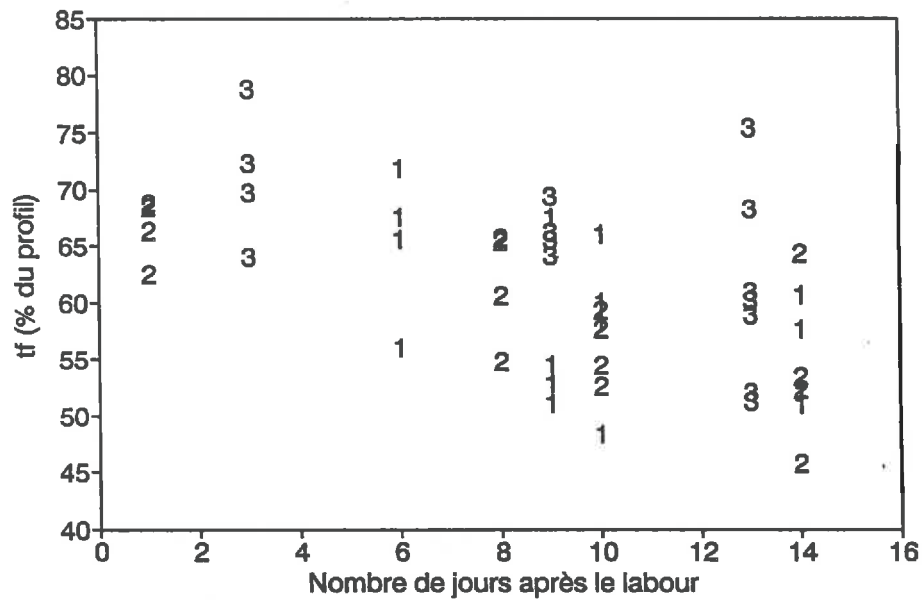


FIGURE II.C4 : Relation entre la teneur surfacique en terre fine (tf) et le délai entre le labour et la date d'observation sur le traitement NT (indicateur des individus : vitesse d'avancement du tracteur)

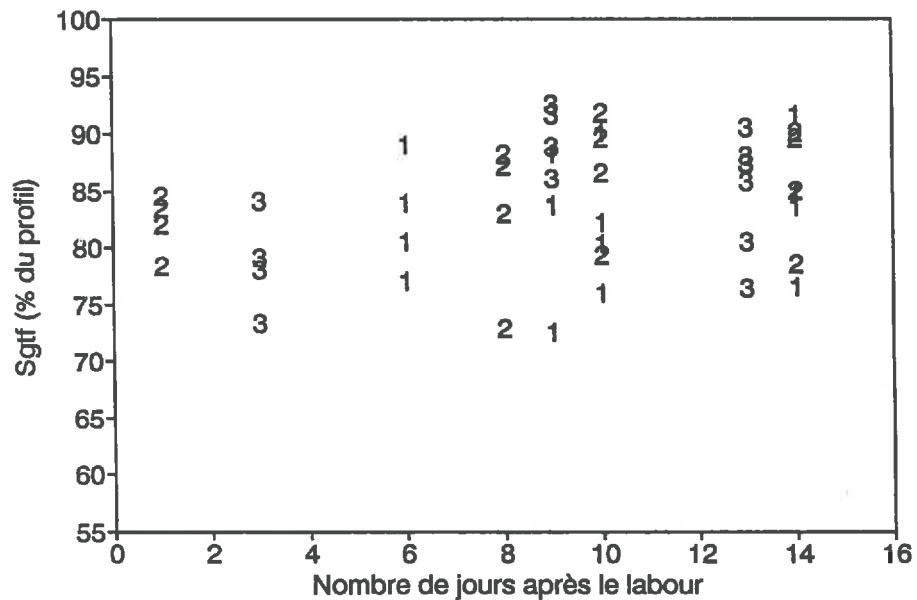


FIGURE II.C5 : Relation entre la teneur surfacique en mottes gamma et en terre fine (Sgtf) et le délai entre le labour et la date d'observation sur le traitement NT (indicateur des individus : vitesse d'avancement du tracteur)

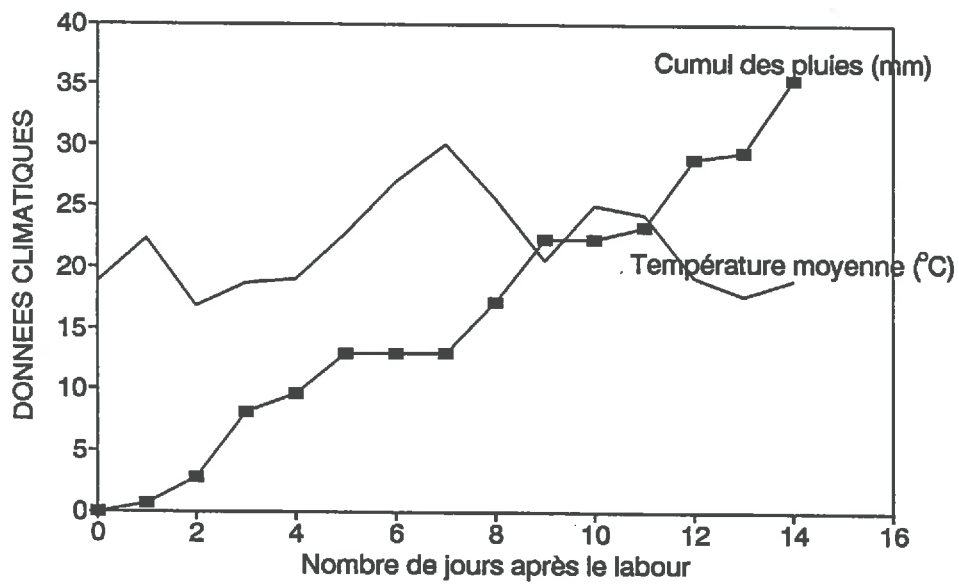


FIGURE II.C6 : Histoire climatique de la parcelle de Grignon entre le labour et les observations après labour les plus tardives

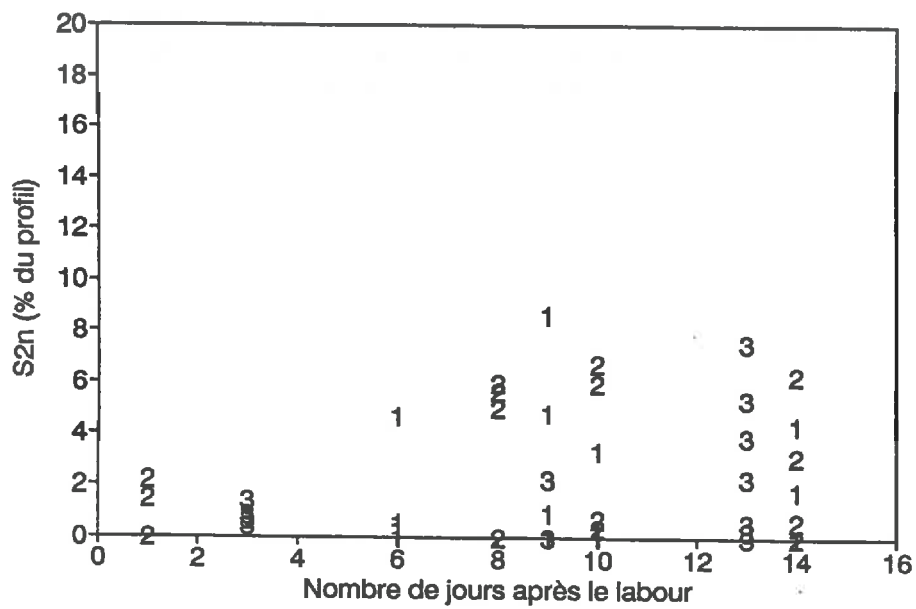


FIGURE II.C7 : Relation entre la teneur surfacique en mottes fissurées 2 niveaux (S2n) et le délai entre le labour et la date d'observation sur le traitement NT (Indicateur des individus : vitesse d'avancement du tracteur)

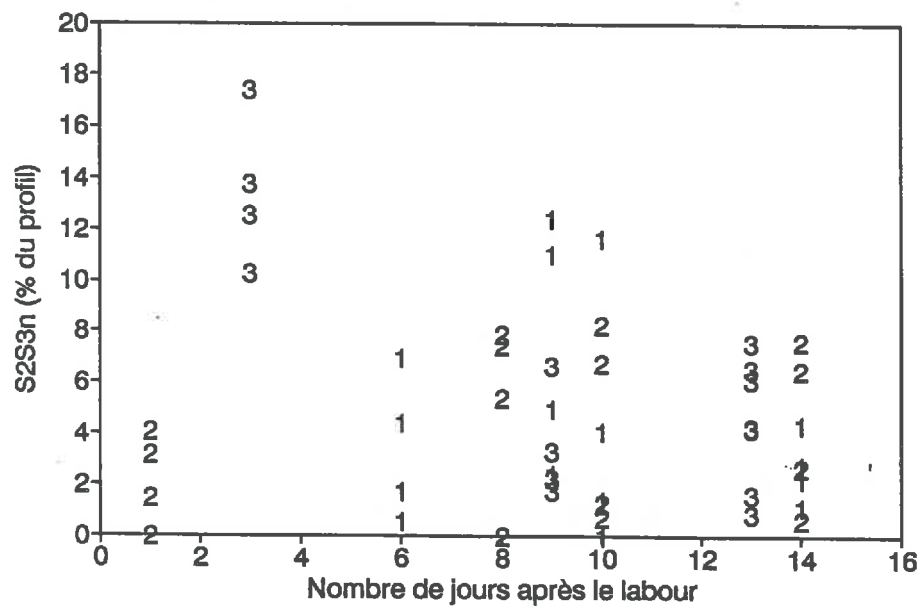


FIGURE II.C8 : Relation entre la teneur surfacique en mottes fissurées 2 niveaux et plus (S2S3n) et le délai entre le labour et la date d'observation sur le traitement NT (Indicateur des Individus : vitesse d'avancement du tracteur)

Pour tester la validité statistique de notre hypothèse de reprise en masse de la terre fine, nous avons utilisé une méthode non paramétrique de comparaison des résultats entre les différentes dates qui tient compte de l'ordre existant entre celles-ci. L'intérêt d'une telle méthode, dont la puissance est inférieure aux méthodes paramétriques, est qu'elle n'implique pas d'hypothèses contraignantes quant aux distributions des populations.

Le test utilisé est celui de KRUSKAL-WALLIS qui est un test des rangs appliqué à la comparaison de plusieurs échantillons indépendants. Il est fondé sur le classement de l'ensemble des observations par ordre croissant, la détermination du rang de celles-ci, et le calcul des sommes des rangs relatives aux différents échantillons. On calcule à partir de ces sommes une quantité qui conduit au rejet de l'identité des populations (ici les dates d'observation) au niveau $\alpha\%$ si elle est supérieure à la valeur théorique donnée pour α par la table associée à ce test (Dagnelie, 1975).

Nous faisons donc l'hypothèse que nos différentes unités sont indépendantes.

L'application de ce test à la variable Sg montre qu'il y a un effet date avec un risque d'erreur de 0.14%. Si l'on considère par contre la variable Sg_{tf} le risque d'erreur devient de 38.66% ce qui permet de conclure à l'absence d'effet date dans ce cas (annexe II.C1).

c) Conséquences sur les variables retenues

L'évolution de l'état structural au cours de la période d'observation est donc significative.

Si l'on veut étudier les effets propres à l'opération de labour, il nous faut retenir des variables qui ne sont pas sensibles à l'évolution :

- celles qui décrivent des compartiments qui, globalement, n'évoluent pas, même si des transferts entre les éléments constitutifs de ces compartiments ont lieu au cours de la période d'observation :

- * la teneur surfacique en mottes gamma et terre fine : Sg_{tf} ;
- * la teneur surfacique en mottes fissurées de un niveau et plus : S_{2S3n} ;

- celles qui décrivent des compartiments qui n'évoluent pas au cours de la période d'observation :

- * la teneur surfacique en mottes delta : S_d ;
- * la teneur surfacique en mottes fissurées de un niveau : S_{1n} ;
- * les teneurs surfaciques en vides internes, S_{vi} et S_{vs}, bien qu'elles n'expliquent qu'une faible part de la variabilité observée.

2) Analyse de la répartition des calibres

a) Critères de description

Pour décrire la taille des objets, nous avons choisi d'utiliser leur plus grande longueur. Nous aurions pu aussi utiliser leur surface. La plus grande longueur est de même dimension

qu'un diamètre de sphère, critère de description souvent utilisé pour décrire celle-ci. Dans la mesure où des formules de reconstruction des diamètres dans R^3 à partir de diamètres de cercles dans R^2 existent et où nous supposons les mottes homéomorphes de la sphère, il nous a paru judicieux d'utiliser ce critère de description en dimension 1. Nous avons tout de même vérifié que la relation entre cette plus grande longueur et la surface est bonne sur la gamme des tailles explorées la plus large que nous ayons rencontrée, c'est-à-dire sur les traitements tassés. Les résultats figurent en annexe II.C2.

Pour chaque catégorie de mottes, nous définissons le calibre médian comme le calibre pour lequel 50% de la surface occupée par le type de mottes considéré l'est par des mottes de taille inférieure à ce calibre.

De même nous définissons un premier et un troisième quartile aux seuils 25 et 75% de la surface cumulée.

Nous avons défini, dans un premier temps, ceux-ci à 5 cm près car nous avons classé les calibres de manière à avoir dix classes de même étendue sur l'ensemble des traitements, où ils variaient de 1 à 50 cm.

Nous avons vérifié que le calibre médian correspondant à SD n'était pas dépendant de la date d'observation ($\alpha = 91\%$, test des rangs en annexe II.C1).

Le calibre des mottes delta toutes catégories n'a donc pas évolué au cours de la période d'observation et peut être gardé comme critère de caractérisation des situations observées.

b) Analyse de la distribution des calibres

L'analyse des distributions surfaciques, pour chaque type de mottes sur la base des écarts interquartiles obtenus dans chaque unité (Fig.II.C9 et II.C10), montre que celles-ci sont :

- peu étalées dans le cas des mottes deltafissurées et des mottes gamma :
 - * premier écart interquartile entre 0 et 15 cm ;
 - * deuxième écart interquartile entre 0 et 5 cm pour les mottes delta fissurées et 0 et 15 cm pour les mottes gamma ;
- plus étalées dans le cas des mottes delta non fissurées :
 - * premier écart interquartile entre 0 et 30 cm ;
 - * deuxième écart interquartile entre 0 et 25 cm.

Les distributions de calibres ne sont pourtant pas parfaitement symétriques car les deux distributions des écarts interquartiles ne sont pas totalement identiques.

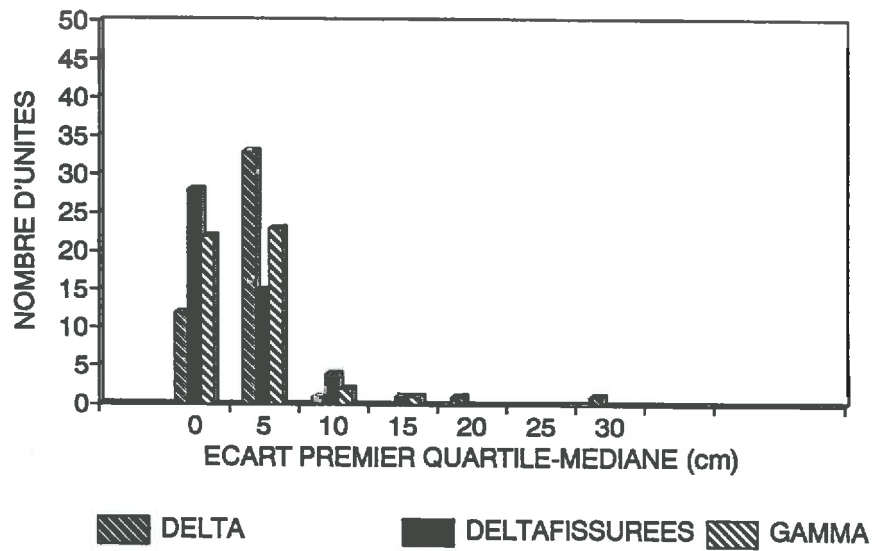


FIGURE II.C9 : Analyse des distributions des calibres des mottes delta, deltafissurées et gamma sur le traitement NT : fréquence du premier écart Interquartile

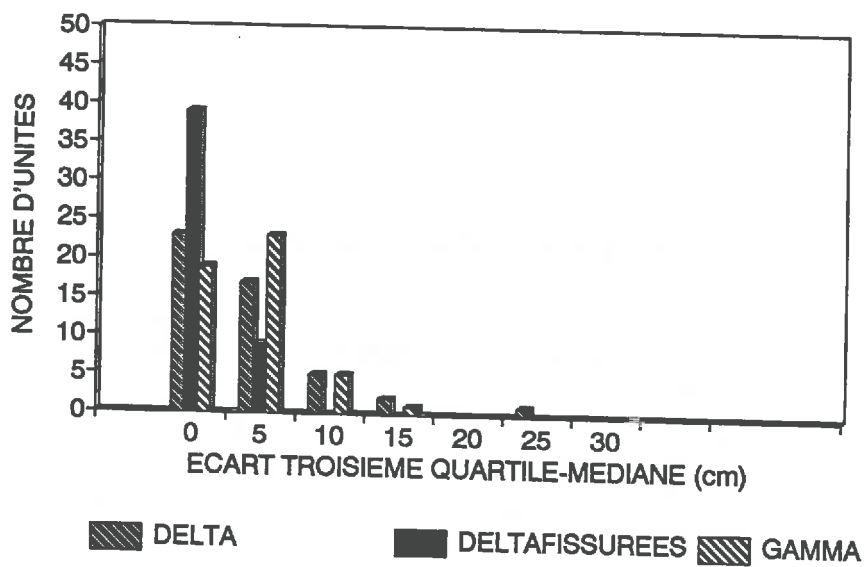


FIGURE II.C10 : Analyse des distributions des calibres des mottes delta, deltafissurées et gamma sur le traitement NT : fréquence du deuxième écart interquartile

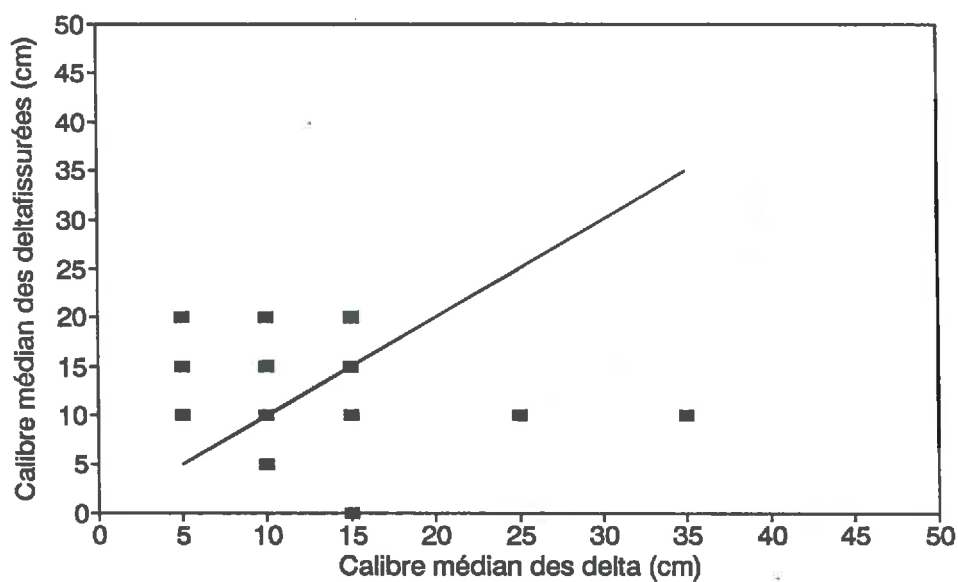


FIGURE II.C11 : Relation entre le calibre médian des mottes delta et celui des mottes delta fissurées sur le traitement NT

Tableau II.C3 : Classes de calibres

SURFACE OCCUPEE PAR LES MOTTES D'UN CALIBRE :	CODE
< 5 cm	5
>= 5 cm et <10 cm	10
>=10 cm et <15 cm	15
>=15 cm et <20 cm	20
>=20 cm	sup20

Dans le cas des mottes dont l'importance n'évolue pas au cours de la période d'observation (mottes delta fissurées et delta) nous constatons (Fig.II.C11) que :

- le calibre médian varie de 0 (absence de ce type de mottes) à 20 cm pour les premières, de 5 à 35 cm pour les secondes ;
- il n'y a pas coexistence des forts calibres des deux types de mottes dans une même unité.

Il est donc intéressant d'étudier les calibres de ces mottes indépendamment de leur état de fissuration (répartition par calibre de $S_d + S_{1n} + S_{2S3n} = S_D$) et d'analyser seulement dans un second temps les relations état de fissuration-calibre.

c) Conséquences sur les variables retenues

Se limiter à l'analyse du calibre médian pour étudier la variation du calibre des mottes avant comme après labour paraît peu raisonnable même si les distributions sont peu étalées dans la plupart des cas.

Nous avons donc, compte-tenu des gammes de variation des calibres indiquées par la figure II.C11, décidé qu'il était raisonnable de considérer les mottes par classes de 5 cm jusqu'à 20 cm et de ne pas faire de distinctions au dessus de ce seuil.

Le tableau II.C3 présente les variables retenues.

3) Conclusion

La stratégie adoptée visait à privilégier la comparaison entre états structuraux et à comparer des situations analogues observées à des dates différentes pour déterminer les critères sensibles à une évolution sous l'action du climat.

Les analyses descriptives concernant les surfaces occupées par les divers objets et les calibres des mottes nous ont permis de dégager des variables indépendantes de la date d'observation et révélatrices de la variabilité entre situations dans NT.

Nous les retenons pour caractériser l'opération labour. Ce sont :

- les surfaces occupées par les mottes delta (S_d), delta fissurées 1 niveau (S_{1n}) et plus de 1 niveau (S_{2S3n}) ;
- les surfaces occupées par les mottes gamma, cumulées avec celles occupées par la terre fine (S_{gtf}) ;
- les surfaces occupées par les vides (S_{vi} et S_{vs}) ;
- les cinq classes de calibre des mottes delta et delta fissurées présentées au tableau II.C3 ;
- les surfaces occupées par les mottes deltabis (S_{db}) lorsque celles-ci sont présentes.

D. CONCLUSION

Les traitements ont été positionnés en fonction de la variabilité de l'état structural que nous avons identifiée sur la parcelle. Nous avons cherché à minimiser la variabilité intratraitement car nous voulions privilégier l'étude de l'effet de l'état initial.

Nous avons ainsi créé des états structuraux très contrastés entre traitements. Les conditions au labour nous permettent alors d'étudier les effets de la vitesse sur une large gamme de vitesses mais nous n'avons pu prendre en compte l'effet d'éventuels gradients longitudinaux d'états structuraux.

Le plan de sondage que nous avons adopté présente l'avantage de décrire la variabilité de l'état structural à une même échelle avant et après labour, et de fournir les éléments nécessaires pour déterminer si les systèmes observés sont comparables.

La caractérisation morphologique sur profil fournit a priori une bonne représentation de ce qui se fait dans un volume. Elle nous offre la possibilité de quantifier l'évolution de l'état structural et son association avec la caractérisation volumique de l'espace poral nous assure de sa représentativité dans le volume.

La méthode offre la possibilité de limiter le temps d'observation sur le terrain. Mais, il demeure impossible d'analyser l'évolution de l'état structural sur un pas de temps équivalent à celui nécessaire à la charrue pour labourer. Notre stratégie d'observation nous a offert la possibilité de dégager les variables les plus sensibles à une évolution au cours de la période d'observation. Nous avons alors limité notre étude aux variables les plus indépendantes de cette évolution climatique. La combinaison des variables qui en résulte nous empêche d'analyser le comportement individuel, au cours du labour, des catégories morphologiques les plus sensibles à l'évolution climatique mottes gamma et terre fine.

Nous allons désormais analyser, avant et après labour, la variabilité intra et intertraitement des critères pour lesquels il est raisonnable d'admettre que l'évolution observée est liée au labour.

Nous déterminerons alors les possibilités de mise en relation entre l'état avant et l'état après labour.

CHAPITRE III :

RESULTATS CONCERNANT L'ANALYSE DE LA RELATION

ETAT INITIAL-ETAT TRANSFORME

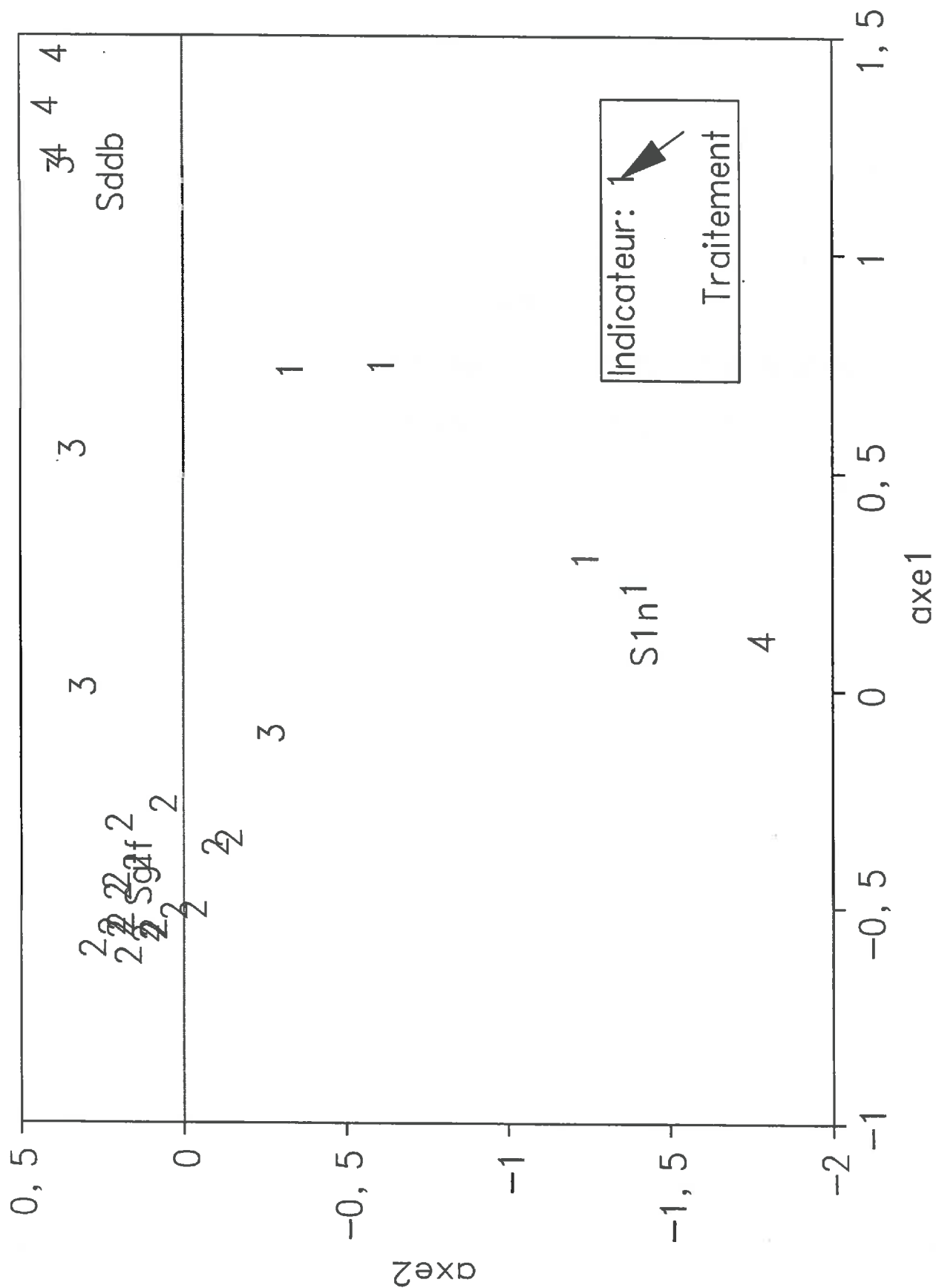


FIGURE III.A1 : Projections (sur les axes 1 et 2) des individus dont la somme des cosinus carrés des angles avec les axes principaux 1 et 2, issue de l'AFC réalisée sur les types d'objets avant labour, est supérieure à 0.5

A. ANALYSE DE LA VARIABILITE DE L'ETAT STRUCTURAL DU SOL AVANT LABOUR

Nous rappelons que l'unité expérimentale est la section correspondant à un passage de charrue. Nous avons distingué les unités de NT en fonction de leur situation longitudinale sur la parcelle (plan II.B1). Nous définissons ainsi quatre situations pour NT.

I. ANALYSE DE LA VARIABILITE DES TYPES DE MOTTES ET DES VIDES

1) Analyse statistique descriptive

Le traitement T1 se distingue des autres par une teneur surfacique non nulle en mottes deltabis (Sdb).

Ces mottes correspondant à un état interne voisin des mottes delta, nous avons analysé la variabilité des types de mottes dans les traitements sur la base de la variable Sddb qui cumule Sd et Sdb ainsi que des variables S1n, S2S3n, Sgtf, Svi et Svs, tout en gardant en mémoire l'importance de Sdb dans T1.

Nous avons réalisé une AFC sur ces variables et 31 individus dont 12 pour TT1-TT2 et T1 ; 19 pour NT (rappelons que les variables sont celles correspondant aux surfaces occupées et non aux teneurs surfaciques). Le nuage de points est de dimension 6 et en absence de structure particulière chaque variable explique 17% de la variabilité.

Seuls les deux premiers axes de l'AFC sont donc porteurs d'une information intéressante. Ils expliquent 93.3% de la variabilité totale (61.2% pour l'axe 1 et 32.1% pour l'axe 2).

Nous avons représenté à la figure III.A1 les individus (au nombre de 29) et variables les mieux représentés dans le plan 1-2 ($\cos^2 \text{axe1} + \cos^2 \text{axe2} > 0.5$).

Seuls deux individus (de NT20A et NT20B) sont, en fait, exclus.

Le premier axe se caractérise par les variables Sddb et Sgtf dont les projections sont de signes opposés (72 et 23% de contribution relative à l'axe). Cela discrimine les traitements tassés qui ont de fortes teneurs en delta, du traitement non tassé à faible teneur en delta. Trois individus, deux de TT2 et un de T1 contribuent pour 49% à l'axe ce qui est très fort mais la représentativité des individus est bonne.

Le deuxième axe est surtout lié à la variable S1n (88.9% de contribution). Il discrimine parmi les unités tassées celles qui sont fissurées. Il s'agit des unités de TT1 ainsi que d'une unité de TT2. Trois individus contribuent pour 71% à l'axe.

Nous retenons donc comme critères pour caractériser la variabilité observée :

- Sgtf ;
- SD et non pas Sddb car les distinctions entre les mottes delta qui ressortent de l'analyse ne concernent que la variable S1n que nous caractérisons par ailleurs ;
- S1n ;
- Sdb qui caractérise T1 de manière spécifique.

L'AFC montre :

- une disjonction pratiquement complète entre les quatre traitements ;
- la fissuration particulière d'une unité de TT2 et de deux unités de TT1.

2) Caractérisation de la variabilité : Effet des traitements

Nous présentons au tableau III.A1 les moyennes (μ) obtenues par situation pour les différentes variables repérées ainsi que l'écart-type associé (σ).

Tableau III.A1 : Teneurs surfaciques en types d'objets les plus représentatifs de la variabilité observée avant labour

TRAITEMENT	SD		S1n		Sdb		Sgtf	
	μ %	σ	μ %	σ	μ %	σ -	μ %	σ
TT1	73	3.3	38	14.6	0	-	23	2.8
TT2	79	5.7	16	31.7	0	-	18	6.6
T1	50	21.1	5	8.6	33	30.4	48	20.5
NT60A	16	1.2	5	3.6	0	-	82	1.9
NT40A	15	3.0	7	3.1	0	-	82	3.1
NT20A	20	7.7	3	1.5	0	-	76	7.8
NT20B	22	7.1	7	3.6	0	-	78	8.2

Les vides :

- * internes : sont inexistantes dans tous les traitements ;
- * externes : occupent 2 à 4% de la surface mais ils sont liés à l'aspérité de celle-ci et ne constituent pas d'incision dans la surface occupée par le sol.

Nous constatons que la structuration en traitements se retrouve.

a) Les traitements fortement tassés TT1 et TT2

* TT1 et TT2 sont riches en delta toutes catégories soit entre 70 et 80%. Ils se distinguent entre eux par le niveau de fissuration des mottes :

- 40% des mottes sont fissurées dans TT1 mais la fissuration est limitée car 38% des mottes correspondent à un niveau seulement ;
- la fissuration dans TT2 est hétérogène et la moyenne de S1n est relativement élevée en raison de la troisième unité que nous avons distinguée dans l'AFC pour laquelle S1n = 64%.

Ces fissures sont probablement apparues dans TT1 suite à l'action du climat pendant le mois précédant le labour alors que dans TT2 le délai entre tassement et labour est plus court, ce qui a dû limiter l'évolution.

La variabilité de TT2 peut être due :

- à un tassement un peu hétérogène lié à l'histoire de la parcelle : état initial hétérogène avant tassement entraînant un résultat différent pour une même contrainte appliquée ; nous avons néanmoins positionné ce traitement dans une zone *a priori* plus homogène que TT1. (Cf. § II.B) ;
- à une hétérogénéité de la contrainte appliquée ; mais il n'y a pas de raison particulière pour que celle-ci soit supérieure dans TT2.

La teneur en gamma et terre fine S_{gtf} de TT1 et TT2 est d'environ 20% avec une variabilité un peu plus forte dans TT2. Il s'agit dans les deux traitements de terre fine située dans l'horizon repris dont l'épaisseur varie quelque peu.

b) Le traitement tassé modérément T1

* T1 a une valeur de SD moyenne soit 50% dont 33% de deltabis avec une variabilité entre unités très importante.

L'unité 4 en bordure externe de la parcelle se distingue en particulier par S1n : 11% contre moins de 1% pour les autres.

Les unités 2 et 3 ont les valeurs les plus contrastées de SD et S_{gtf} : 78% contre 28% pour la première variable ; 21% contre 70% pour la seconde. L'unité 2 a un état assez proche de NT alors que l'unité 3 a un état plus proche de TT2.

Malgré sa forte hétérogénéité, T1 reste dans une gamme d'états intermédiaire entre NT d'une part, TT1-TT2 d'autre part.

c) Le traitement non tassé NT

*** NT se caractérise par des teneurs surfaciques en delta inférieures à 25%.**

La variabilité des unités de NT est faible d'après l'AFC. Nous pouvons néanmoins distinguer deux groupes de situations NT60A–NT40A contre NT20A–NT20B avec SD égal respectivement à 15% et 22%. SD est composée, dans le premier groupe, de plus de mottes légèrement fissurées (S_{1n}/SD de 30 à 50%) que dans le second groupe (S_{1n}/SD de 15 à 30%).

L'écart dépasse 5%, seuil de précision auquel on se situe, mais l'écart-type de SD est plus élevé dans le second groupe.

Il faut donc tester si le léger gradient constaté est d'ordre voisin ou supérieur à la variation latérale dans les situations.

Nous avons donc comparé les écarts-types précédemment calculés (indicateurs de variabilité latérale) à ceux obtenus entre situations pour des unités comparables sur NT20A–NT40A–NT60A (indicateurs de variabilité longitudinale).

Ils sont de même ordre de grandeur, voire légèrement supérieurs, comme le montre le tableau III.A2. Nous tiendrons donc compte de ce gradient dans l'analyse ultérieure.

Par ailleurs, l'unité de bordure de parcelle (n°4) a une teneur en delta plus forte que les autres : 22% en moyenne contre 14 à 16% en moyenne.

Tableau III.A2 : Variabilité latérale dans NT des teneurs surfaciques en types d'objets caractéristiques

TRAITEMENT	SD		S _{1n}		S _{gtf}	
NTA unité	μ %	σ	μ %	σ	μ %	σ
1	15	2.3	5	2.8	83	3.2
2	14	4.5	4	1.5	81	4.6
3	16	2.1	4	5.1	81	3.1
4	22	7.2	4	4.0	75	7.8

3) Conclusion

L'analyse descriptive effectuée montre que les traitements se différencient selon leur teneur en mottes delta et deltabis et leur teneur en vides Internes. Celles-ci sont plus importantes dans les traitements tassés que dans les traitements non tassés.

T1 se caractérise par la présence de mottes deltabis et une variabilité particulièrement importante de la teneur en mottes delta et deltabis. Celle-ci reste dans une gamme intermédiaire entre, TT1 et TT2 d'une part, NT d'autre part.

TT1 se distingue de TT2 par la présence, sur l'ensemble du traitement, d'une fissuration légère (1 niveau).

II. ANALYSE DE LA REPARTITION DES CALIBRES

1) Analyse statistique descriptive

Nous avons cherché à comparer la variabilité intra et intertraitement des calibres des mottes delta, deltabis et deltafissurées confondues (11) à l'aide d'une AFC sur les variables définies tableau II.C3 et les 31 individus précédents.

Les deux premiers axes expriment 87.2% de la variabilité (65.2% pour l'axe 1 ; 22% pour l'axe 2) :

- le premier oppose la variable sup20 (32.8% de contribution relative) aux autres variables particulièrement 20, et 10 (22.6 et 22.1% de contribution relative) ; il oppose les unités des traitements tassés sauf une de T1 (la quatrième) à celles de NT ; les premières sont à forte teneur en mottes de calibre supérieur à 20 cm alors que les secondes sont à forte teneur en mottes de moins de 20 cm ;

- le deuxième axe se caractérise par les variables 20 et 10 (72.4 et 10.6% de contribution relative) dont les projections sont de signe opposés ; parmi les unités de NT il permet de distinguer celles qui ont des mottes plus grosses que d'autres soit entre 15 et 20 cm ; celles-ci ne correspondent pas à une structure latérale ou longitudinale particulière.

(11) Nous rappelons que le calibre correspond à la plus grande longueur de l'objet et que, par conséquent, une zone continue de 1.60 m de longueur a pour calibre 160 cm et appartient à la classe sup20.

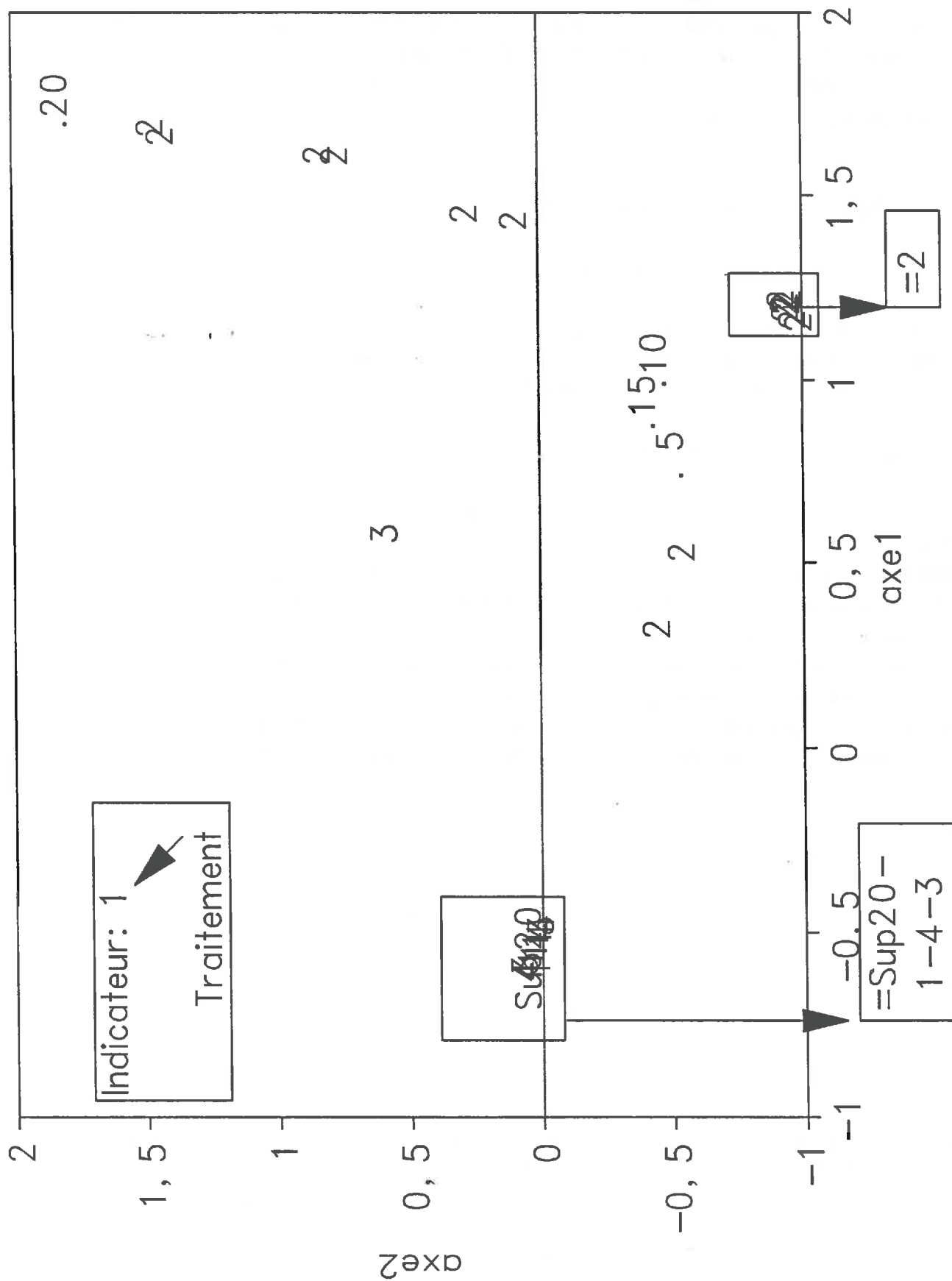


FIGURE III.A2 : Projections (sur les axes 1 et 2) des individus dont la somme des cosinus carrés des angles avec les axes principaux 1 et 2, issue de l'AFC réalisée sur les calibres des mottes delta et delta fissurées avant labour, est supérieure à 0.5

La figure III.A2 présente les projections des variables et des 27 individus les mieux représentés dans le plan 1-2 ($\cos^2 \text{axe1} + \cos^2 \text{axe2} > 0.5$).

Nous retenons donc les critères suivants pour caractériser la variabilité observée :

- la teneur surfacique en mottes delta de plus de 20 cm ;
- la teneur surfacique en mottes delta de moins de 10 cm.

L'analyse statistique descriptive de la répartition des calibres des mottes delta fait apparaître :

- une disjonction complète entre NT d'une part, TT1 et TT2 d'autre part ;
- le caractère intermédiaire et hétérogène de l'état de T1.

2) Caractérisation de la variabilité : Effet des traitements

Le tableau III.A3 présente pour chaque traitement la valeur moyenne associée à ces deux variables et l'écart-type associé. Nous retrouvons de même que pour les types de mottes une structuration selon les traitements.

Tableau III.A3 : Teneurs surfaciques en mottes de tailles caractéristiques de la variabilité observée avant labour

TRAITEMENT	sup20		5+10	
	μ %	σ	μ %	σ
TT1	66	4.0	6	1.3
TT2	72	7.0	5	0.5
T1	38	24.3	5	1.3
NT60A	0	-	11	1.9
NT40A	2	3.5	8	2.6
NT20A	10	14.1	4	1.7
NT20B	2	4.9	12	2.5

a) Les traitements tassés

* TT1 et TT2 sont riches en mottes de calibre $\geq 20\text{cm}$: $\text{sup20} = 66\%$ pour le premier, 72% pour l'autre.

La variabilité entre unités est faible.

La teneur en mottes $< 10\text{ cm}$ est d'environ 5% . Il s'agit des mottes situées dans la couche de surface (horizon H1).

*** T1 a une répartition des calibres intermédiaire entre TT1 et TT2 d'une part, NT d'autre part.**

En effet $\text{sup}20=38\%$ en moyenne avec une très forte variabilité entre unités.

L'unité 2 se distingue par une valeur particulièrement forte : 73%.

La teneur en petites mottes est de même ordre que dans les autres traitements tassés.

Pour les traitements tassés riches en mottes de plus de 20 cm on peut s'interroger sur l'existence de différences de distribution à l'intérieur de la classe supérieure à 20 cm.

Il apparaît que :

- 68% de la surface occupée par les mottes de plus de 20 cm l'est par des mottes de plus de 30 cm dans TT1 ;
- 87% dans TT2 ;
- 0 à 100% dans T1 où la variabilité entre unités est très forte.

b) Le traitement non tassé

*** Les situations observées dans NT n'ont pratiquement pas de mottes de plus de 20 cm ($\text{sup}20 < 10\%$ sauf dans la zone NT20A).**

La teneur en mottes de petit calibre varie entre 4 et 12% avec une variabilité importante entre unités dans les cas où elle est faible.

Lorsque nous étudions la distribution des variables $5/SD$; $10/SD$ et $(15 + 20 + \text{sup}20)/SD$, nous constatons par un test du χ^2 (annexe III.A1) qu'elles sont significativement différentes ($\alpha \approx 0$) si nous considérons tous les profils NT, mais ne le sont plus si nous éliminons NT20A ($\alpha = 17.0\%$).

Ce résultat est dû à la quatrième unité de NT20A dont les caractéristiques se rapprochent de T1. Il s'agit d'un emplacement en bordure de chemin ce qui en explique probablement l'état particulier.

3) Conclusion

L'analyse descriptive effectuée montre que la surface occupée par les mottes de plus de 20 cm est nettement supérieure dans les traitements tassés mais qu'une variabilité importante existe dans T1. Dans ce traitement, certaines unités ont des teneurs proches de celles de TT1 et TT2, alors que d'autres unités ont des teneurs proches de NT. TT2 se distingue par l'importance des calibres de plus de 30 cm.

III. CONCLUSION : DEFINITION A POSTERIORI DES TRAITEMENTS AVANT LABOUR

L'analyse de la variabilité des surfaces occupées par les types de mottes et leurs calibres montre que les traitements appliqués ont engendré des états fortement différenciés.

Il y a une disjonction complète entre NT d'une part, TT1 et TT2 d'autre part, aussi bien en ce qui concerne les types d'objets que la taille des mottes.

T1 correspond a un état intermédiaire hétérogène qui assure la jonction entre les deux groupes sans recoupement aussi bien pour l'état interne des mottes (présence de mottes deltabis) que pour leur taille.

La distinction entre TT1 et TT2 porte sur l'état de fissuration des mottes : présence de mottes fissurées dans TT1 et pas dans TT2.

Le tableau III.A4 présente la définition des traitements que nous pouvons alors faire.

SITUATION	SD %	S1n/SD %	Sdb/SD %	sup20 %	sup30/sup20 %	DESCRIPTION
TT1	73	52	0	66	68	Beaucoup de grosses mottes delta fissurées -
TT2 unité 3	72	88	0	64	100	Petites mottes en surface
TT2 autres unités	81	≤1	0	75	84	Beaucoup de grosses mottes delta - Petites mottes en surface
T1 unité 2	78	3	93	73	51	Présence de deltabis et peu de mottes fissurées sauf dans l'unité 4 Taille moyenne des mottes - Les petites ne sont pas qu'en surface.
unité 1	49	2	71	35	100	
unité 4	45	40	0	20	0	
unité 3	28	4	85	24	0	
NT 60A-40A 20A-20B	15 12 à 30	72 0 à 55	0 0	<1% 0 à 30	0 0	Peu de mottes delta - Taille faible des mottes - unité 4 NT20A avec plus de delta.

Tableau III.A4

En conclusion :

- la variabilité de l'état structural avant tassement que l'on conserve dans NT était loin d'être négligeable puisque :

- * la teneur en delta varie de 12 à 30% ;
- * la teneur en mottes de plus de 20 cm varie de 0 à 30% ;

- un tassement intermédiaire tel que celui correspondant au traitement T1 a eu tendance à accentuer la variabilité latérale puisque nous avons observé des écarts de teneur en delta ou deltabis et de teneur en mottes de plus de 20 cm entre unités pouvant aller jusqu'à 50% ;

- par un tassement plus intense nous avons par contre diminué cette variabilité latérale initiale et créé un état plus continu.

Notre objectif était d'obtenir une variabilité intertraitement supérieure à la variabilité intratraitement. Il a été atteint.

Les choix de localisation des traitements ont permis de créer une large gamme de variation des états :

- en obtenant des états tassés dans les traitements TT ;
- en consacrant les zones les moins tassées de la parcelle au traitement NT.

B. ANALYSE DE LA VARIABILITE DE L'ETAT STRUCTURAL APRES LABOUR

I. ANALYSE DE LA VARIABILITE DES TYPES DE MOTTES ET DES VIDES

1) Analyse statistique descriptive

Nous avons utilisé la même démarche qu'avant labour en réalisant une AFC sur les variables Sd, S1n, S2S3n, Sgtf, Svi et Svs et les 92 unités correspondant aux passages de charrue effectués dans les différents traitements.

Seuls les trois premiers axes sont porteurs d'une information intéressante. Ils expliquent 94% de la variabilité totale (58.2% pour l'axe 1, 19.2% pour l'axe 2, 16.6% pour l'axe 3).

Le premier axe oppose la variable Sgtf (36% de contribution relative à l'axe) aux variables Sd et S1n (22.6% et 27.2% de contributions relatives à l'axe). Il discrimine le traitement non tassé à forte teneur en gamma et terre fine des traitements tassés à forte teneur en delta.

Le deuxième axe est caractérisé par les variables S1n et S2S3n (57.6% et 29.3% de contribution relative) de signes opposés sur l'axe. Six individus contribuent pour 45.8% à l'axe. Ils correspondent à des unités tassées et des labours faits à vitesse moyenne ou rapide.

Le troisième axe est caractérisé par les variables S2S3n et Sd (55.4% et 36.3% de contribution relative) dont les projections sont de signes opposés. Six individus contribuent pour 46.1% à l'axe. Il s'agit d'unités situées dans les traitements tassés et labourées à vitesse lente sauf deux unités situées dans T1 et labourées à vitesse rapide.

Les axes 2 et 3 discriminent donc parmi les traitements tassés les unités les plus fissurées (S2S3n fort).

Nous avons représenté figure III.B1 (p. 110) les 82 individus et les variables les mieux représentées dans le plan 1-2 ($\cos^2 \text{axe1} + \cos^2 \text{axe2} > 0.5$). Les individus éliminés et bien représentés sur l'axe 3 sont des unités tassées localisées principalement dans T1 et TT2. Elles se caractérisent par leur faible valeur en S2S3n.

La variable Svi contribue peu à la variabilité totale mais est bien représentée sur l'axe 1 et est associée aux traitements tassés.

L'AFC fait donc ressortir :

- la disjonction complète après labour entre NT et les traitements tassés avant labour ;
- une variation du niveau de fissuration dans les unités tassées qui permet de distinguer TT1 des autres traitements.

Tableau III.B1 : Teneurs surfaciques en types d'objets les plus représentatifs de la variabilité observée après labour

TRAITEMENT	SD		S2S3n		Sgtf		Svi	
	μ %	σ	μ %	σ	μ %	σ	μ %	σ
NT11	16	5.7	6	5.0	82	5.8	0	0.3
NT12	15	5.0	3	2.1	83	5.3	0	0.0
NTm1	14	6.8	5	3.5	85	6.2	0	0.0
NTm2	14	3.1	3	2.7	84	4.4	0	0.2
NTr1	13	4.6	4	2.7	86	5.4	0	0.0
NTr2	16	5.3	9	4.9	83	5.9	0	0.2
TT111	62	4.8	20	11.8	33	4.0	2	0.7
TT112	60	3.7	13	7.7	34	3.4	2	1.3
TT1m1	64	3.9	5	1.8	33	4.6	1	0.5
TT1m2	60	8.3	24	8.8	31	4.5	3	0.7
TT1r1	60	9.0	10	6.4	35	8.0	2	1.2
TT1r2	60	7.1	12	4.4	33	8.9	2	1.5
T1m	47	5.9	2	2.5	48	7.6	2	0.7
T1r	52	13.8	13	16.8	43	12.1	2	1.0
TT21	57	6.8	3	5.3	36	8.1	4	1.8
TT2m	58	4.4	8	9.2	37	4.1	2	2.1
TT2r	54	2.1	2	4.7	40	6.9	2	1.6
T1m (passage 2 à 4)	50	3.1	2	2.9	44	2.7	2	0.7
T1r (passage 2 à 4)	59	3.3	16	19.5	37	2.5	1	1.1

2) Caractérisation de la variabilité

Nous présentons au tableau III.B1 (p. 111) la moyenne par situation et l'écart-type associé des valeurs obtenues pour les variables SD, S2S3n et Sgtf ainsi que Svi.

Ce tableau montre que :

- la teneur en delta demeure plus importante après labour dans les traitements tassés que dans NT : SD varie de 47 à 64% contre 14% à 16% dans NT ; inversement Sgtf décroît de NT à TT1 ;

- SD croît de T1 à TT2 puis à TT1 ;

- la variabilité de SD dans T1 est forte, particulièrement dans la situation correspondant à la vitesse rapide ; elle est due à la première unité de T1 qui est en bordure de NT et comme nous l'avons prévu, se distingue des autres unités de T1 (Cf. Chap. II.B.IV) ; nous avons donc décidé de l'éliminer ; la variabilité devient alors plus faible ;

- dans TT2 la situation labourée à vitesse rapide a une teneur en delta un peu plus faible que les situations labourées à des vitesses inférieures ; nous ne pouvons pourtant pas prendre en considération cette différence car elle n'est que de 4% soit de l'ordre du niveau de précision auquel on peut prétendre (5%) ;

- la fissuration est plus développée :

- * dans TT1 soit S2S3n variant de 10 à 24% sauf dans la situation de la répétition 1 labourée à vitesse moyenne où SD est par contre plus élevée ;

- * dans l'unité 2 de la situation de T1 labourée à vitesse rapide, soit S2S3n supérieure à 38%, ce qui explique la forte valeur de l'écart-type pour cette situation ; ailleurs S2S3n est inférieure à 8% ;

- la surface occupée par les vides internes de plus de 1 cm est faible quelle que soit la situation, soit moins de 4%, mais des différences entre traitements apparaissent en termes de présence et d'absence : il n'y a aucun vide interne dans NT alors qu'il y a des vides internes dans tous les profils des traitements tassés : entre 2 et 3% en moyenne.

3) Conclusion

L'analyse que nous avons effectuée montre que les types de mottes après labour demeurent dépendants des traitements effectués avant labour. En effet :

- la teneur en mottes delta demeure plus importante dans les traitements tassés ;

- les traitements tassés peuvent être hiérarchisés selon leur teneur en delta ; l'analyse de Sgtf donne le même classement entre les traitements ;

- T1 reste marqué par une forte variabilité intratraitement même si une part de celle-ci est liée à la trajectoire de la charrue ;

- TT1 se distingue toujours par un état de fissuration supérieur ;

- Il apparaît des vides internes sur les traitements tassés mais pas sur NT ; les teneurs sont trop faibles pour que cette analyse mérite d'être complétée par une quantification de la variabilité entre unités d'une même situation mais elle permet tout de même de considérer ce critère comme discriminatoire par rapport aux traitements ; cette conclusion paraît d'autant plus acceptable que l'erreur sur la surface réelle des vides, dans les profils où ils existent, est probablement plus importante que pour d'autres éléments structuraux car on a tendance à sous-estimer les zones à longues fissures d'une largeur centimétrique.

II. ANALYSE DE LA VARIABILITE DES CALIBRES

1) Analyse de la variabilité de l'importance des calibres dans la section travaillée

a) Analyse statistique descriptive

En utilisant les mêmes classes qu'avant labour, nous avons étudié la variabilité de la surface occupée par les mottes delta et deltafissurées d'un calibre donné à l'aide d'une AFC.

Seuls les trois premiers axes nous intéressent. Ils décrivent 96.4% de la variabilité totale (52.9% pour l'axe 1 ; 23% pour l'axe 2 ; 20.5% pour l'axe 3).

La figure III.B2 (p. 114) présente les projections des individus et des variables les mieux représentés sur les axes 1 et 2.

L'axe 1 est caractérisé par la variable sup20 dont la projection est de signe opposé aux variables 10 et 15 (63.3%, 17% et 11.7% de contribution relative à l'axe).

Les unités où les mottes de calibre supérieur à 20 cm sont les plus importantes sont toutes dans des traitements tassés.

L'axe 2 distingue la variable 20 (Cf. Tab. II.C3) dont la projection est de même signe que celle de la variable 15 (53.6% et 5.4% de contributions relatives) et est opposée à celles des variables 10 et 5 (32.7% et 8.1% de contributions relatives). Il permet de distinguer les unités avec les plus faibles calibres. Il s'agit d'unités situées dans NT ainsi que certaines unités de T1 et TT2.

L'axe 3, non représenté, se caractérise par les variables 20 et 15 (26.5% et 64.5% de contribution à l'axe) dont les projections sont opposées. Il permet de distinguer parmi les unités de NT celles qui ont des calibres moyens.

Les variables principalement retenues sont donc :

- la surface des mottes delta de plus de 20 cm par rapport à la section ;
- la surface des mottes delta de moins de 10 cm par rapport à la section.

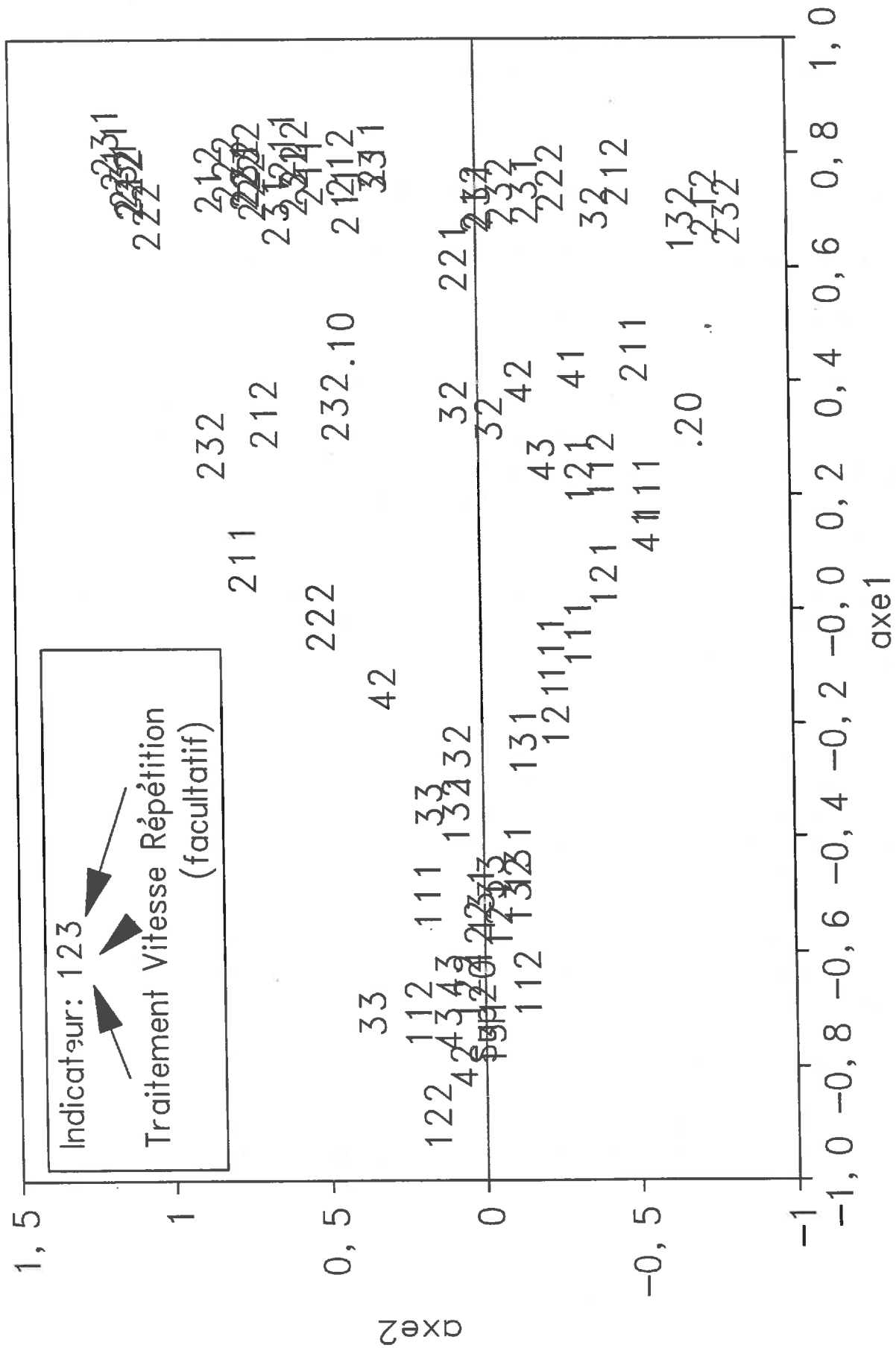


FIGURE III.B2 : Projections (sur les axes 1 et 2) des individus dont la somme des cosinus carrés des angles avec les axes principaux 1 et 2, issus de l'AFC réalisée sur les calibres des mottes delta et détaillées avant labour, est supérieure à 0.5

Nous garderons aussi la surface des mottes delta de plus de 30 cm par rapport à la section, bien que nous ne l'ayons pas introduite dans cette analyse, car cette variable était apparue intéressante dans l'analyse avant labour. Nous justifierons ultérieurement son intérêt.

b) Caractérisation des états observés

Le tableau III.B2 (p. 116) présente les moyennes par situation des variables retenues. Nous y faisons figurer pour mémoire la variable sup30 mais nous ne la présenterons qu'après justification de son intérêt.

Nous constatons que :

- les mottes de plus de 20 cm occupent moins de 1% de la surface dans les traitements NT alors que dans les traitements tassés elles occupent de 12 à 38% ;
- les mottes de moins de 10 cm occupent moins de 20% de la section dans tous les traitements et en particulier moins de 10% dans NT ;
- la variable sup20 permet de classer les traitements tassés ; les plus grosses mottes sont dans TT1 (sup20 varie de 25 à 38%) puis TT2 (sup20 varie de 14 à 25%) ; dans T1 il faut distinguer la situation labourée à vitesse rapide, qui a une teneur voisine (35%) de celles de TT1, de celle labourée à vitesse moyenne qui a une teneur plus faible (12%) ;
- la variabilité entre unités est forte ce qui nous incite à analyser plus finement la fraction de plus de 20 cm.

Nous avons représenté figure III.B3 (p. 116), par traitement, les courbes cumulées des surfaces occupées par les différents calibres rapportées à la section travaillée.

Les différences de répartition des calibres parmi les mottes de plus de 20 cm interviennent dans les traitements tassés mais au-delà de 35 cm le classement ne bouge plus.

L'analyse de la variable sup30 est donc nécessaire.

Les valeurs obtenues sont :

- 6 à 15% pour TT1 ;
- 2 à 5% pour TT2 ;
- 0 à 16% pour T1, la forte valeur correspondant au labour à vitesse rapide qui donne des résultats voisins de ceux obtenus sur TT1.

Les tendances observées pour les traitements se conservent mais la variabilité entre situations demeure importante, puisqu'elle dépasse 5% dans TT1 et T1. D'autre part, la variabilité entre unités est forte.

Les résultats présentés dépendent de l'importance que les mottes delta occupent dans la section.

Aussi, pour affiner notre étude, il convient de distinguer le plateau de la courbe, analysé au § I, de la répartition des calibres.

Tableau III.B2 : Teneurs surfaciques en mottes de tailles caractéristiques de la variabilité observée après labour

TRAITEMENT	sup20		5+10		sup30	
	μ %	σ %	μ %	σ %	μ %	σ %
NT11	1	1.5	9	2.6	0	0.0
NT12	0	1.0	8	3.5	0	0.0
NTm1	0	0.7	7	4.2	0	0.0
NTm2	1	2.7	9	3.0	1	2.0
NTr1	0	0.0	8	2.4	0	0.0
NTr2	1	1.6	9	2.3	1	1.4
TT111	25	10.9	15	2.8	7	11.9
TT112	30	14.5	13	2.9	6	12.1
TT1m1	26	11.2	14	3.4	15	18.2
TT1m2	38	11.3	12	1.7	17	21.6
TT1r1	35	10.6	11	2.5	9	11.5
TT1r2	25	17.5	15	2.8	11	13.0
T1m (passage 2 à 4)	12	5.1	20	3.7	0	0.0
T1r (passage 2 à 4)	35	4.7	16	3.8	16	18.6
TT21	14	4.2	14	4.1	2	4.1
TT2m	24	14.5	20	7.3	5	10.5
TT2r	25	14.5	14	3.7	3	6.2

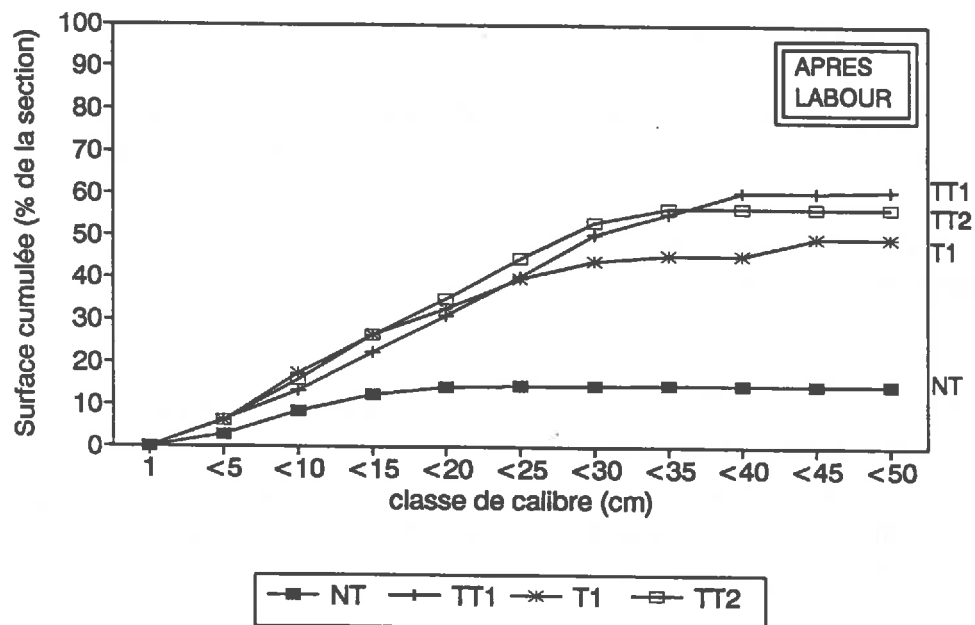


FIGURE III.B3 : Courbes cumulées par calibre des surfaces occupées par les mottes delta fissurées et non fissurées après labour sur les traitements

2) Etude de la répartition des calibres au sein des mottes delta et delta fissurées

a) Méthode d'analyse adoptée

Nous avons rapporté les surfaces par calibre aux surfaces occupées par les mottes delta fissurées et non fissurées (SD). Nous obtenons le tableau III.B3 (p. 118).

Les différences observées sont globalement significatives au niveau 1% (Cf test du χ^2 en annexe III.B1).

Pour les étudier et déterminer leurs caractéristiques nous avons :

- effectué une classification automatique de manière à déterminer des groupes de situations apparemment homogènes ; les individus sont les différentes situations, les variables sont les classes de calibres ;
- déterminé les caractéristiques des groupes ainsi formés ;
- testé l'absence de différence de distribution entre les membres des groupes ;
- déterminé les caractéristiques des situations pouvant conduire au rejet de l'hypothèse d'égalité entre situations d'un même groupe.

Pour constituer les groupes, nous avons utilisé une classification ascendante hiérarchique avec calcul d'une distance du χ^2 entre individus, distance généralement utilisée pour comparer les distributions.

Cette méthode d'analyse des données consiste à calculer les distances entre tous les objets, puis réunir par étapes successives les deux objets les plus proches. A la fin de chaque étape on recalcule les distances entre les groupes nouvellement créés et le reste des objets. Lorsque tous les individus ont été finalement réunis dans un groupe, on dresse un arbre hiérarchique dont les noeuds représentent les fusions successives (Roux, 1985). Le recalcul des distances entre groupes a été fait selon la formule de la distance maximale : la nouvelle distance entre un groupe et un point sera égale à la plus grande des distances calculées entre un membre du groupe et ce point. Nous avons choisi cette formule car elle a l'avantage d'éviter des agrégations entre objets trop différents lors de la constitution des classes. Nous ne voulions pas utiliser une moyenne pondérée des distances individuelles dans la mesure où, comme nous allons le voir ultérieurement, la structuration entre groupes est nettement liée aux traitements appliqués sur lesquels l'échantillonnage n'est pas le même.

Nous avons obtenu l'arbre hiérarchique (p.119)(à chaque ramification nous avons indiqué le n° du noeud). Nous avons limité notre troncature au noeud 30 ce qui nous permet de distinguer 5 classes.

Au tableau III.B4 (p. 119), nous avons représenté la contribution des variables aux classes.

Tableau III.B3 : Teneurs surfaciques en mottes de tailles caractéristiques de la variabilité après labour calculées par rapport à la surface occupée par les mottes delta fissurées ou non

SURFACE/SD (%)	CALIBRE (cm)						
TRAITEMENT	5	10	15	20	25	30	>30
NT11	17	38	33	8	5	0	0
NT12	17	35	28	18	2	0	0
NTm1	16	37	27	18	2	0	0
NTm2	25	45	14	5	0	6	5
NTr1	22	36	33	9	0	0	0
NTr2	20	38	17	19	2	0	3
TT111	10	13	16	20	5	24	11
TT112	11	11	12	15	16	25	10
TT1m1	11	11	18	20	7	9	23
TT1m2	11	9	13	4	29	6	29
TT1r1	10	8	15	9	27	16	15
TT1r2	10	15	15	16	9	15	20
T1m (passage 2 à 4)	10	29	19	17	25	0	7
T1r (passage 2 à 4)	11	15	10	4	11	21	27
TT21	7	18	27	22	11	11	4
TT2m	13	21	13	12	23	9	8
TT2r	13	12	15	11	18	25	6

ARBRE HIERARCHIQUE ISSU DE LA CLASSIFICATION AUTOMATIQUE:

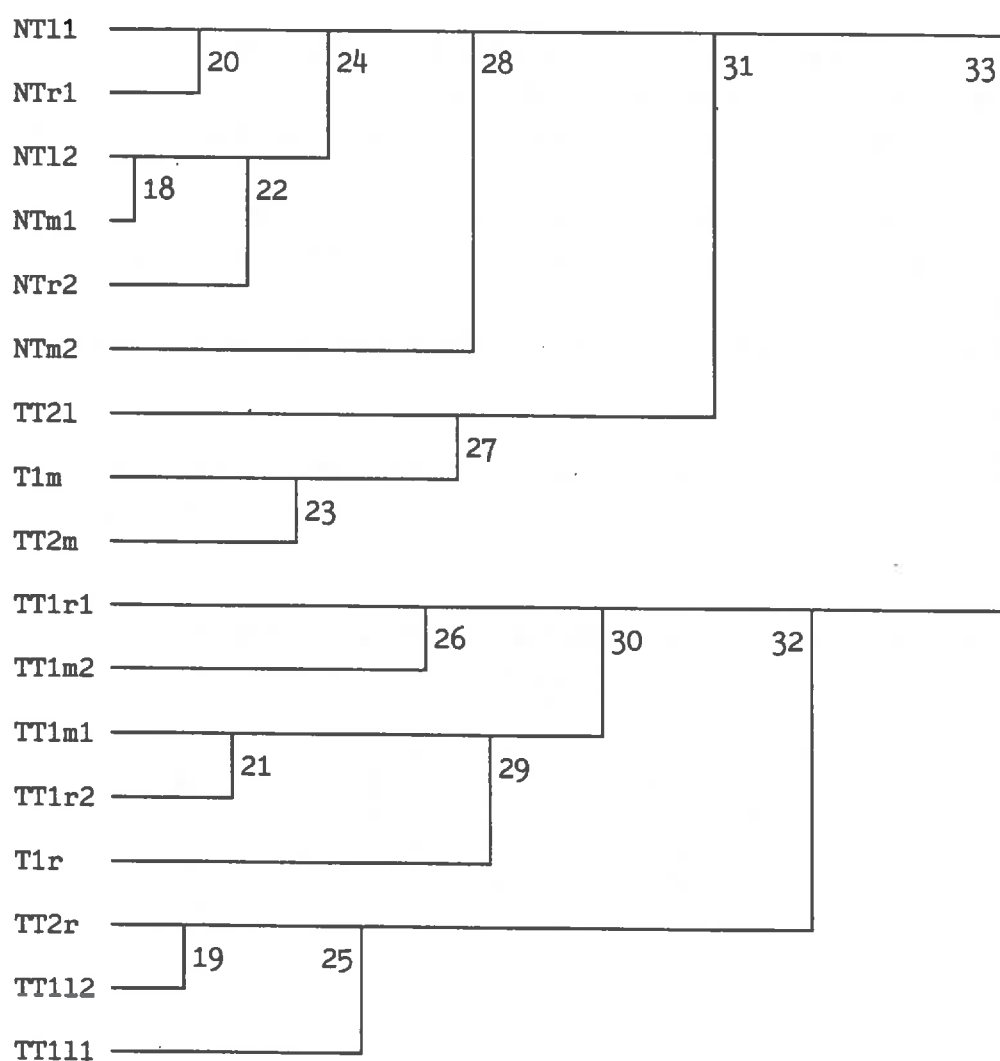


Tableau III.B4 : Contribution des variables aux classes

VARIABLE	5	10	15	20	25	30	sup30
CLASSE 1	+6	+42	+7	0	-17	-14	-13
CLASSE 2	-2	-32	-6	+1	+1	+58	0
CLASSE 3	-3	-26	-7	0	-2	+8	+54
CLASSE 4	-1	-29	-4	-7	+39	0	+20
CLASSE 5	-12	0	0	+11	+58	-8	-10

Ce tableau montre que :

- la classe 1 se caractérise par de fortes proportions de surface occupées par les calibres de moins de 15 cm, particulièrement entre 5 et 10 cm ;
- la classe 2 se caractérise par l'importance des mottes de plus de 15 cm, particulièrement entre 25 et 30 cm ;
- la classe 3 se caractérise par l'importance des mottes de plus de 30 cm ;
- la classe 4 est marquée par les mottes de plus de 20 cm, particulièrement entre 20 et 25, et plus de 30 cm ;
- la classe 5 se caractérise par l'importance des calibres intermédiaires, c'est-à-dire entre 15 et 25 cm.

Avant de décrire plus précisément les caractéristiques des classes, nous avons testé aux niveaux 1 et 5% la différence de distribution entre les éléments constitutifs des classes (annexe III.B1).

Le tableau III.B5 présente les résultats obtenus (différence significative : au niveau 1% = ** ; au niveau 5% = * ; non significative au niveau 5% : NS).

N°DE CLASSE	EFFECTIF	MEMBRES DES CLASSES	TEST
1	6	NT11, NT12, NTm1, NTm2, NTr1; NTr2;	**
2	3	TT111; TT112; TT2r ;	NS
3	3	TT1m1; TT1r2; T1r	NS
4	2	TT1m2; TT1r1	NS
5	3	T1m; TT21; TT2m	**

Tableau III.B5

Nous constatons que la classe 1 et la classe 5 ne sont pas homogènes. Pour la classe 1, il semble que la distribution de NTr1 est marquée par une teneur surfacique en mottes de plus de 15 cm particulièrement faible. Nous avons donc testé la différence de distribution en l'absence de ce membre. Elle devient non significative au niveau 5%.

Pour la classe 5, nous avons procédé de même. Les comparaisons des membres deux à deux montrent que ceux-ci sont significativement différents au niveau 5%.

Les classes 3 et 4 sont toutes deux marquées par les plus forts calibres. Leur différence est faible puisque certains des membres de chacune des classes ont des distributions qui ne sont pas significativement différentes au niveau 1% : TT1r1 et TT1r2.

b) Caractérisation des états observés

Sur la base des variables caractéristiques des classes, et des différences constatées intraclasse nous décrivons dans le tableau III.B6 les situations observées.

SITUATIONS	CARACTERISTIQUES (Les surfaces par calibre sont rapportées à SD)
Classe 1 NT dont NTr1	Peu de calibres de plus de 15 cm SD $\geq$ 15 cm:<25% SD $\geq$ 15 cm=5%
Classe 2 TT111 TT112 TT2r	Beaucoup de calibres de plus de 20 cm, moins de plus de 30 cm SD $\geq$ 20 cm:>40% mais SD $\geq$ 30 cm:<11%
Classe 3 TT1m1 TT1r2 T1r	Beaucoup de mottes de plus de 30 cm SD $\geq$ 30 cm:>20% 20 $\leq$ SD<25 cm:<11%
Classe 4 TT1m2 TT1r1	Beaucoup de mottes de plus de 30 cm et beaucoup entre 20 et 25 cm SD $\geq$ 30 cm:>15% avec 20 $\leq$ SD<25 cm: 27 à 29%
Classe 5 T1m TT21 TT2m	Peu de mottes de plus de 30 cm:SD $\geq$ 30 cm:<10% mais beaucoup de plus de 20 cm:SD $\geq$ 20 cm:>25% SD $\geq$ 30 cm:7% et SD $\geq$ 20 cm:32% SD $\geq$ 30 cm:4% et SD $\geq$ 20 cm:26% SD $\geq$ 30 cm:8% et SD $\geq$ 20 cm:40%

Tableau III.B6

Nous remarquons :

- que NT se distingue bien des traitements tassés par un état à plus faibles calibres ;
- TT2 a des calibres intermédiaires entre NT et TT1 ;
- les zones de TT1 sont peu différentes entre elles ;
- la situation labourée à vitesse moyenne dans T1 donne des résultats voisins de celle labourée à vitesse lente et moyenne dans TT2 ;
- la situation labourée à vitesse rapide dans T1 présente des analogies avec celles de TT1.

Les profils ayant les plus faibles calibres dans les traitements tassés sont : T1 vitesse moyenne et TT2 vitesse lente. Les mottes y demeurent plus grosses que dans NT.

Dans le cas des traitements tassés, où les différences constatées peuvent concerner des classes successives on peut se demander si elles ne sont pas artificiellement liées au choix de la taille des classes. Nous avons donc pour chaque profil recalculé les surfaces occupées par classes de 1 cm. Nous retrouvons les mêmes résultats. Ils figurent en annexe III.B2.

Les limites des classes choisies jouent donc peu sur les différences observées.

3) Conclusion

Notre analyse montre que :

- **l'effet des traitements sur les calibres est important puisque :**
 - * les calibres sont plus faibles dans NT que dans les traitements tassés ;
 - * un classement de NT, TT2 et TT1 selon la taille des mottes est possible ;
 - **l'effet de la vitesse sur la taille des mottes est assez faible par rapport à celui de l'état structural ;**
- et dans les cas où il paraît exister il est contraire à celui attendu (Cf. Chap. I.C.II.2), puisque les calibres :
- * sont plus faibles à vitesse lente qu'à vitesse moyenne et rapide, dans TT2 et TT1 ;
 - * sont plus faibles à vitesse moyenne qu'à vitesse rapide dans T1.

Il convient de confronter maintenant les deux types de critères que nous venons d'étudier soit types d'objets et calibres.

III. CONFRONTATION ENTRE TYPES DE MOTTES ET CALIBRES

L'analyse descriptive des deux types de critères fait apparaître des différences notables entre traitements. L'effet des traitements semble important alors que celui de la vitesse de labour paraît réduit.

A titre indicatif, nous présentons un test de cette hypothèse par analyse de variance, utilisant l'analogie de notre dispositif avec un dispositif en criss-cross.

1) Test de l'effet des traitements

Le dispositif est considéré comme un dispositif déséquilibré en criss-cross à :

- deux facteurs :
 - * traitement : quatre modalités TT1-NT-T1-TT2 avec une seule répétition dans T1 et TT2 ;
 - * vitesse : trois modalités lente-moyenne-rapide avec la vitesse lente manquant dans T1 ;
- deux répétitions.

Le passage 1 de T1 a été éliminé car il est en bordure de NT et son état n'est pas représentatif de T1.

Les données ont été traitées par le logiciel AVARE (Daudin, 1983).

Les variables étudiées sont SD, Sgtf, S2S3n, sup20, 5+10.

Comme il s'agit de variables correspondant à des proportions nous avons utilisé une transformation des variables pour stabiliser la variance (transformation arcsinusracine).

Pour toutes les variables, le modèle s'avère globalement adéquat. L'interaction entre les deux facteurs est testée par rapport à la résiduelle. L'effet des facteurs est testé par rapport à l'interaction facteur X répétition.

Nous obtenons les résultats présentés au tableau III.B7 (Signification : *** = 0.5% ; ** = 1% ; *(*) = 2.5% ; * = 5% ; NS: > 5%).

VARIABLE arcsin/	TRAITEMENT (F) F calculé		VITESSE (F) F calculé		INTERACTION(F) F calculé		μ
SD	433	***	0.64	NS	1.16	NS	35
Sgtf	116406	***	1.02	NS	0.68	NS	52
S2S3n	9	NS	0.20	NS	2.26	NS	14
Sup20	1944	***	0.38	NS	1.63	NS	15
5+10	93	***	0.36	NS	1.17	NS	19

Tableau III.B7

L'effet du traitement sur l'importance des mottes delta et des gros calibres apparaît nettement alors qu'aucun effet vitesse ni aucune interaction n'apparaît. Aucun effet sur la fissuration ne ressort.

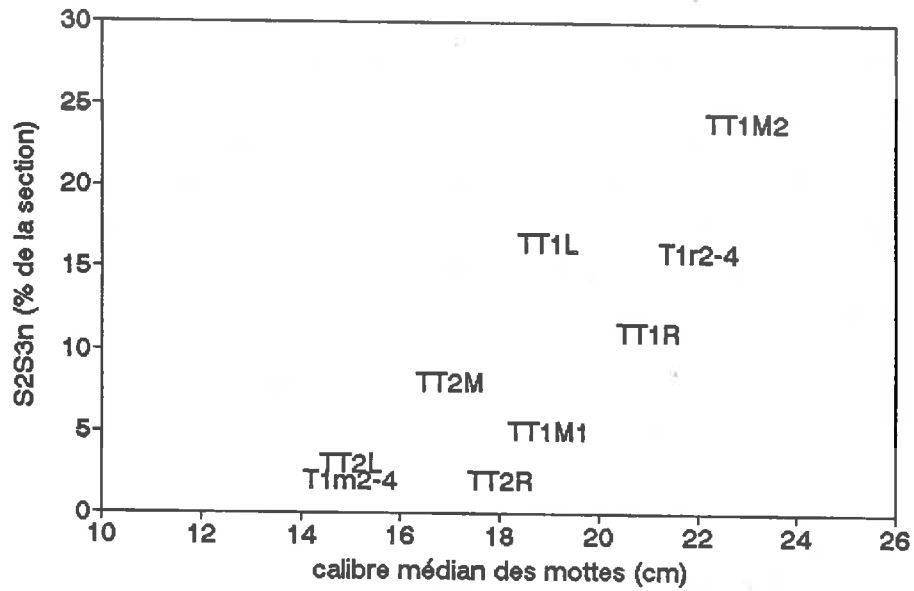


FIGURE III.B4 : Relation entre la surface occupée par les mottes à niveau de fissuration élevé et le calibre médian des mottes sur les situations des traitements tassés

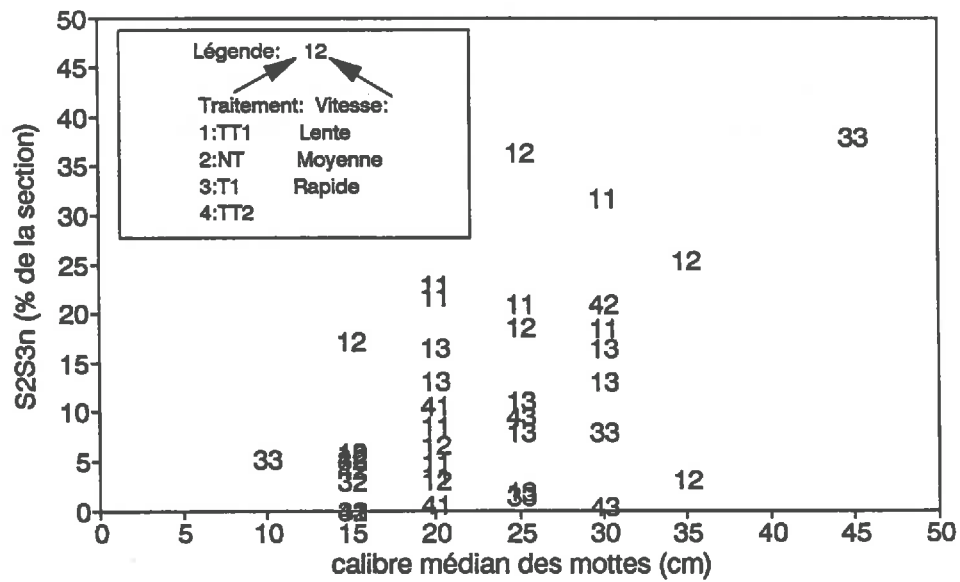


FIGURE III.B5 : Relation entre la surface occupée par les mottes à niveau de fissuration élevé et le calibre médian des mottes sur les unités des traitements tassés

2) Etude de la relation entre niveau de fissuration et taille des mottes

Dans TT1, les calibres sont plus gros que dans les autres traitements et la fissuration est plus développée. Dans les autres traitements tassés les zones les plus fissurées sont aussi celles aux plus forts calibres.

Nous avons représenté figure III.B4 la surface occupée par les mottes à plus de deux niveaux de fissuration en fonction du calibre médian des mottes delta toutes catégories.

Une forte fissuration est associée à un fort calibre sauf dans le cas des zones de TT1 labourées à vitesse lente où la fissuration est plus élevée que le calibre ne le laisse présager.

Sachant qu'il existe une variabilité non négligeable entre unités nous avons étudié la relation à cette échelle (Fig.III.B5) mais pour une précision plus faible du calibre médian (à 5 cm près). La relation devient plus lâche mais se conserve sauf pour TT1.

Dans T1 (situation labourée à vitesse moyenne) et TT2 la fissuration est la moins développée mais la taille des mottes est plus petite.

*** Une liaison entre calibre et fissuration existe donc.**

3) Conclusion

L'analyse de variance effectuée confirme l'importance de l'effet des traitements sur l'état interne et le calibre des mottes après labour. Ces deux critères ne sont pas affectés de manière indépendante puisque la fissuration est plus développée sur les mottes aux calibres les plus élevés.

En revanche, aucun effet de la vitesse n'apparaît nettement.

IV. CONCLUSION : Caractérisation de l'effet des traitements

Les analyses descriptives des données que nous avons faites montrent que l'effet de traitements sur l'état structural après labour est très important alors que l'effet de la vitesse est faible.

Une différence nette entre les situations d'un même traitement, labourées à des vitesses différentes n'apparaît que dans T1. Il semble qu'il y ait une plus faible fragmentation à vitesse rapide, ce qui est contraire aux résultats attendus. Une confusion d'effet entre vitesse et état structural, liée à la structure du dispositif semble néanmoins très probable dans ce cas. Cet effet des traitements se manifeste sur les critères de la structure suivants :

- l'état interne des mottes ;
- les vides internes ;
- les calibres des mottes.

Le traitement NT se caractérise par une forte proportion de terre fine et mottes gamma et par de faibles calibres.

Par contre, les traitements tassés se caractérisent par des teneurs en terre fine et mottes gamma beaucoup plus faibles et des mottes de taille plus importante.

TT2 et TT1 se distinguent essentiellement par les calibres des mottes et leurs niveaux de fissuration. Ceux-ci sont plus importants dans TT1. La zone de T1 labourée à vitesse moyenne donne des résultats voisins de ceux observés sur TT2 mais la teneur surfacique en delta y demeure un peu plus faible. La zone de T1 labourée à vitesse rapide donne des résultats plus proches de ceux de TT1.

Nous avons résumé ces résultats dans le tableau III.B8.

TRAITEMENT	CARACTERISTIQUES
NT (toutes vitesses)	SD ~15% avec S2S3n= 3 à 9% Sgtf ~85% 75% SD occupés par mottes <15 cm
T1 (vitesse moyenne)	SD = 50% avec S2S3n = 2% Sgtf = 44% 32% SD occupés par mottes > 20 cm 7% SD occupés par mottes > 30 cm
(vitesse rapide)	SD = 59% avec S2S3n = 15% Sgtf = 37% 59% SD occupés par mottes > 20 cm 27% SD occupés par mottes > 30 cm
TT2	SD ~55% avec S2S3n<10% Sgtf entre 35 et 40% moins de 50% SD occupés par mottes > 20 cm moins de 10% SD occupés par mottes > 30 cm
TT1	SD ≥60% avec forte variation de S2S3n soit jusqu'à 20% d'écart entre situations Sgtf ~30% 40 à 65% SD occupés par mottes > 20 cm 10 à 50% SD occupés par mottes > 30 cm

Tableau III.B8

Nous devons maintenant confronter état initial et état final pour interpréter les états observés après labour comme les résultats d'actions mécaniques modifiant l'état avant labour.

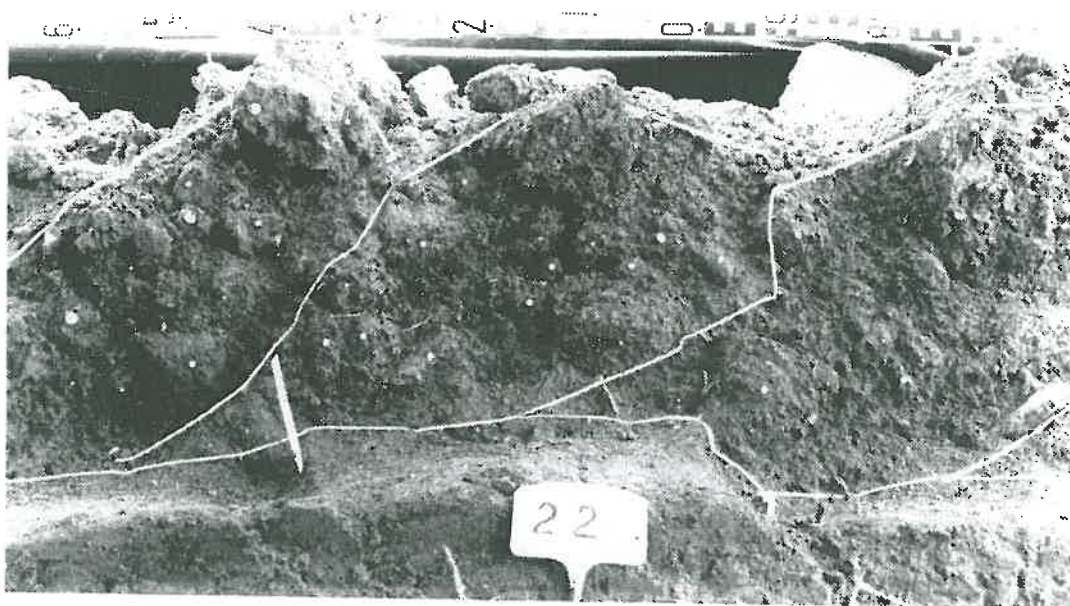


FIGURE III.B6 : Profil cultural après labour dans NT

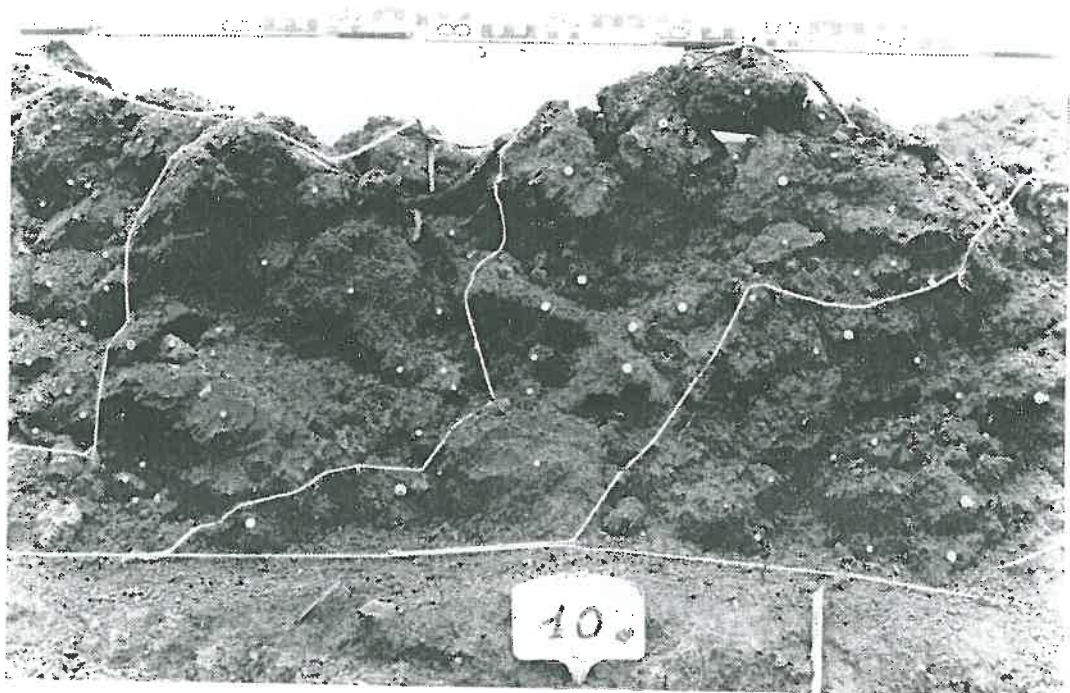


FIGURE III.B7 : Profil cultural après labour dans T1

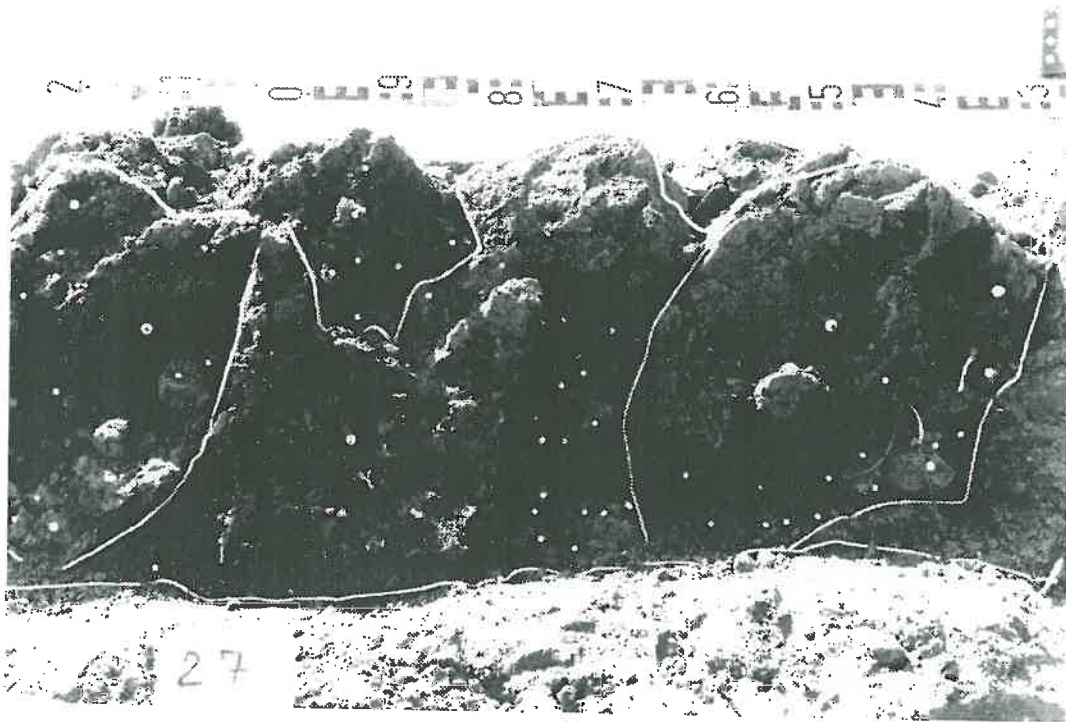


FIGURE III.B8 : Profil cultural après labour dans TT1

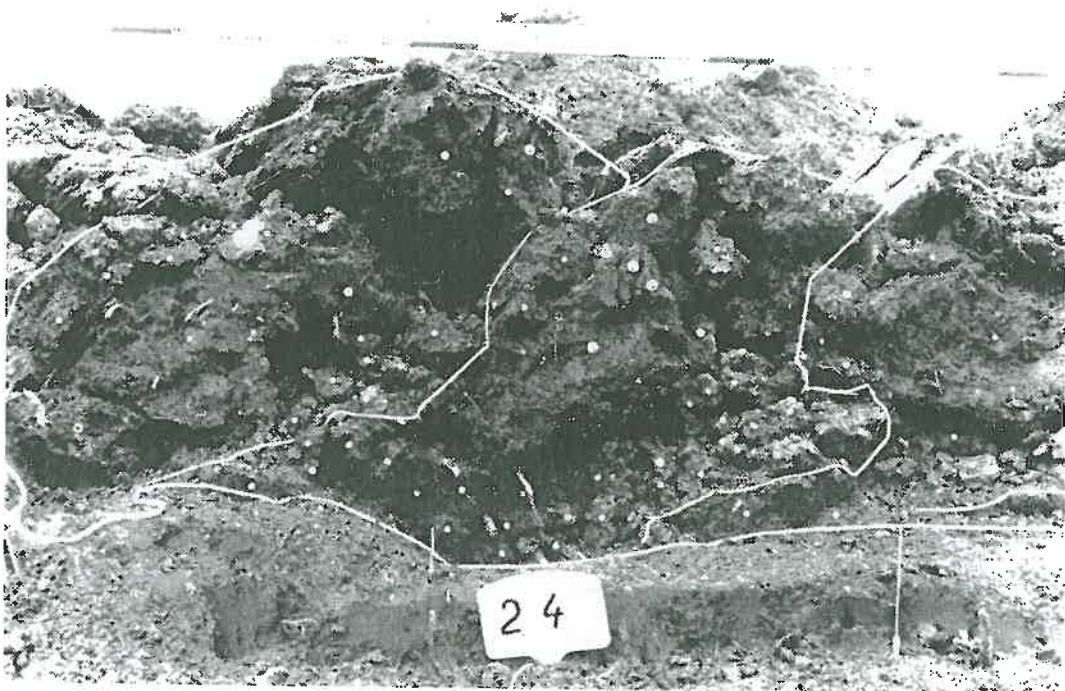


FIGURE III.B9 : Profil cultural après labour dans TT2

C. COMPARAISONS DES ETATS STRUCTURAUX AVANT ET APRES LABOUR : ANALYSE DE L'EVOLUTION DES ETATS

L'analyse de la variabilité des états structuraux avant et après labour montre que le labour ne gomme pas une différence d'état initial et que la différence de résultat peut être appréciée de façon quantitative.

Il convient maintenant :

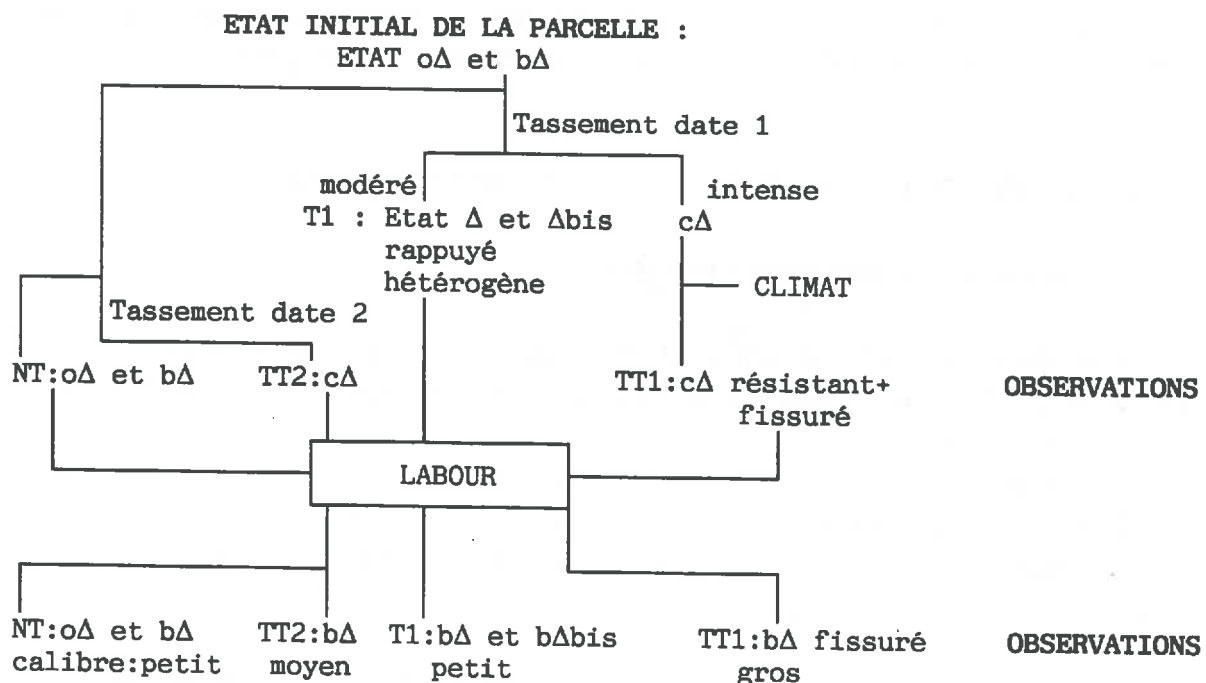
- de déterminer s'il y a interaction entre les processus de fragmentation et l'état structural ; dans ce cas les différences observées après labour ne sont pas le simple reflet d'un état de départ différent ;

- d'analyser les transformations en jeu au travers de bilans entre les variables caractéristiques de l'état structural avant et après labour, sans s'intéresser aux étapes intermédiaires pendant le labour.

L'analyse précédente aboutit à la présentation schématique ci-dessous.

Schéma de l'évolution

(ne prenant pas en compte les éventuelles variations de volume apparent de la couche travaillée au cours du labour)



Nous formulons alors les hypothèses suivantes :

- l'état interne delta se conserve en totalité au cours du labour ;
- le calibre varie peu dans NT alors que son évolution est plus importante dans les traitements tassés ;
- la variation de calibre dépend de l'état de fissuration Initial.

I. INTERPRETATION HISTORIQUE DES ETATS OBSERVES

Nous rappelons que toute notre analyse de l'état structural repose sur l'hypothèse que la surface observée est représentative du volume travaillé. Nous avons vu au chapitre II, qu'il pouvait en résulter une légère sous-estimation de la taille réelle des objets dans le volume.

L'analyse de l'évolution que nous désirons faire implique donc de pouvoir distinguer :

- **une évolution volumique d'une catégorie morphologique** (définie par son état interne, son calibre) liée à une augmentation de sa porosité sans transfert de matière entre catégories ;

- **d'une évolution volumique accompagnée d'une évolution massique** de la catégorie liée à un changement d'affectation de certains éléments structuraux, en particulier transformation de mottes en terre fine.

. Nous devons donc :

- **nous assurer que les systèmes observés avant et après labour sont comparables**, c'est-à-dire que le volume observé après labour avait pour caractéristiques initiales celles du volume observé avant labour ;

- **analyser l'évolution volumique globale du système puis sa décomposition entre les différentes catégories en utilisant des variables additives dont la variation est indépendante de l'évolution d'autres catégories du système** ; cela exclut l'utilisation de variables telles que les teneurs surfaciques, qui dépendent du volume global du système, et implique l'utilisation des surfaces réelles occupées par chaque catégorie.

II. ANALYSE DE L'EVOLUTION GLOBALE DU SYSTEME ETUDIE

1) Mises en correspondance possibles

Le système caractérisé avant labour correspond à l'horizon Ap limité par le fond de labour le plus ancien que nous avons repéré à l'aide de l'observation visuelle du changement de couleur de la terre.

Nous avons cherché dans tous les traitements à labourer ce système c'est-à-dire à fixer la profondeur de labour au niveau de ce changement de couleur.

La compatibilité des systèmes observés avant et après labour implique donc de vérifier :

- que les cotes du changement de couleur caractérisées dans un traitement sont représentatives des cotes sur toute la parcelle, dans la mesure où elles sont caractérisées latéralement sur l'ensemble des traitements ; il s'agit en fait de tester la répétabilité longitudinale des cotes observées ;

- que la profondeur labourée correspond à la profondeur du changement de couleur.

La position du changement de couleur étant un résultat de l'histoire de la parcelle avant tassement, nous avons vérifié la première hypothèse sur les profils réalisés en vis-à-vis (Cf. Fig. II.B1) pour caractériser l'état structural de la zone non tassée à 20, 40 et 60 m (NT20A, NT40A, NT60A).

Nous constatons figure III.C1 (p. 132) que la variabilité latérale du changement de couleur est très forte, particulièrement à 40 m et supérieure à la variabilité longitudinale mais que les valeurs moyennes sont voisines avec une très légère augmentation de la profondeur moyenne entre les positions 20 et 60 m (environ 1 cm).

La figure III.C2 (p. 132) montre que le gradient s'accroît entre 60 et 80 m.

Nous considérerons que le système caractérisé avant labour est représentatif de l'ensemble du traitement mais nous étudierons la déformation des relations établies liée au gradient détecté.

La correspondance entre profondeur de labour et profondeur du changement de couleur a été établie sur les murailles de chaque passage de charrue.

Le tableau III.C1 montre que, à l'échelle du profil (4 passages dans les traitements tassés, 8 passages dans le traitement NT), les valeurs moyennes des deux variables sont voisines (l'écart n'excède pas 2 cm) sauf dans T1 où l'écart atteint 7 cm, et que la profondeur de labour n'excède pas la profondeur du changement de couleur.

TRAITEMENT	PROFONDEUR DU CHANGEMENT DE COULEUR (cm)		PROFONDEUR DE LABOUR (cm)	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
NT	31.4	1.6	30.1	0.9
TT1	26.6	1.2	26.1	2.3
TT2	27.4	2.2	25.3	1.4
T1	29.7	0.6	22.5	1.4

Tableau III.C1

Les systèmes travaillés sont donc comparables dans TT1, TT2, et NT.

Nous constatons par contre figure III.C3 (p. 133) qu'il n'y a pas stricte correspondance entre les deux variables à l'échelle du passage de charrue, l'écart pouvant atteindre localement 5 cm et l'horizon H6 (dont le fond correspond au fond de Ap) pouvant être légèrement affecté par le labour. Cela nous interdit par conséquent de prendre le passage comme système unitaire pour l'analyse de l'évolution quantitative de l'état structural.

Nous analyserons donc l'évolution des catégories morphologiques à l'échelle du profil en supposant les deux systèmes égaux, mais nous testerons la sensibilité des résultats à une variation du système égale à l'écart entre la cote du fond du labour et celle du changement de couleur.

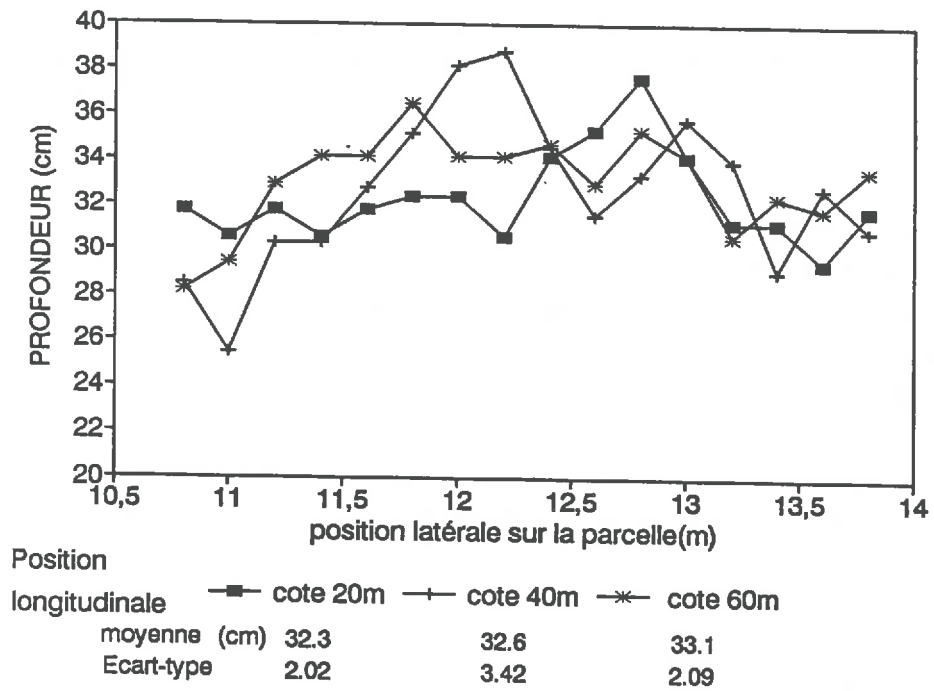


FIGURE III.C1 : Profondeur du fond de H6 (changement de couleur) en fonction de la position latérale sur la parcelle

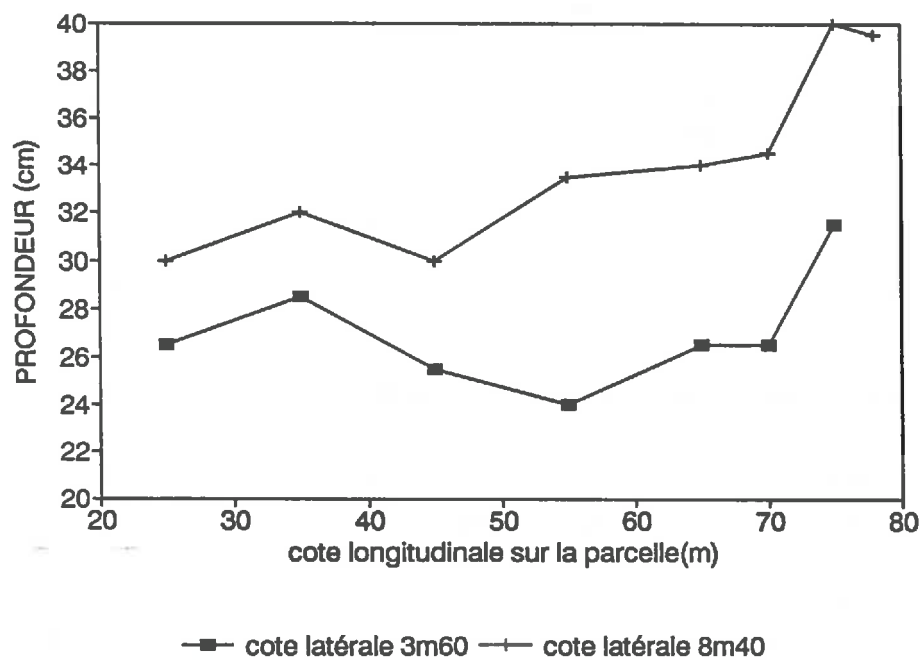


FIGURE III.C2 : Profondeur du fond de H6 (changement de couleur) en fonction de la position longitudinale sur la parcelle

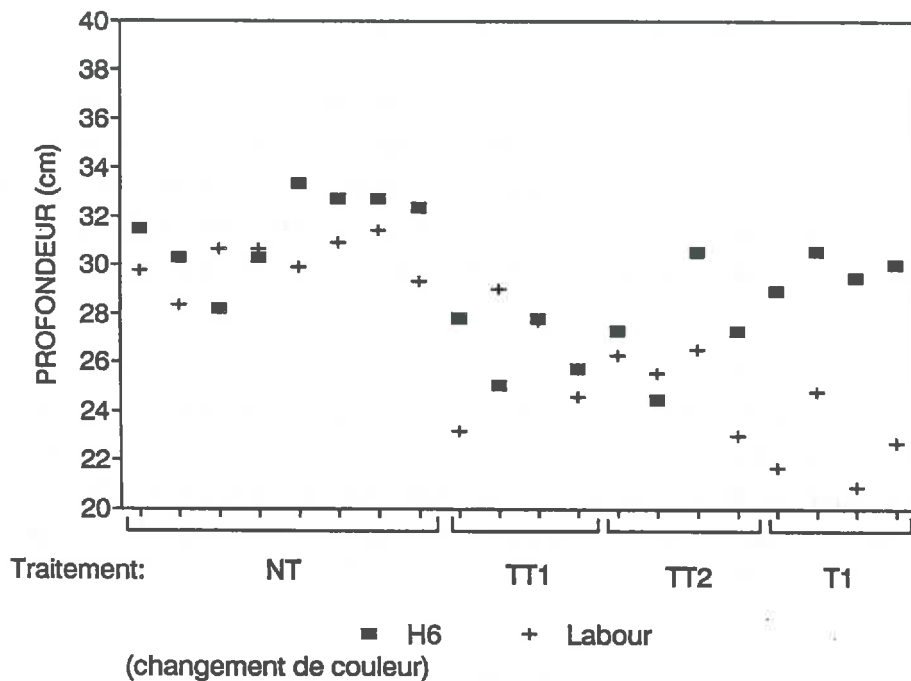


FIGURE III.C3 : Profondeur du fond de H6 (changement de couleur) et du labour sur les unités des traitements étudiés

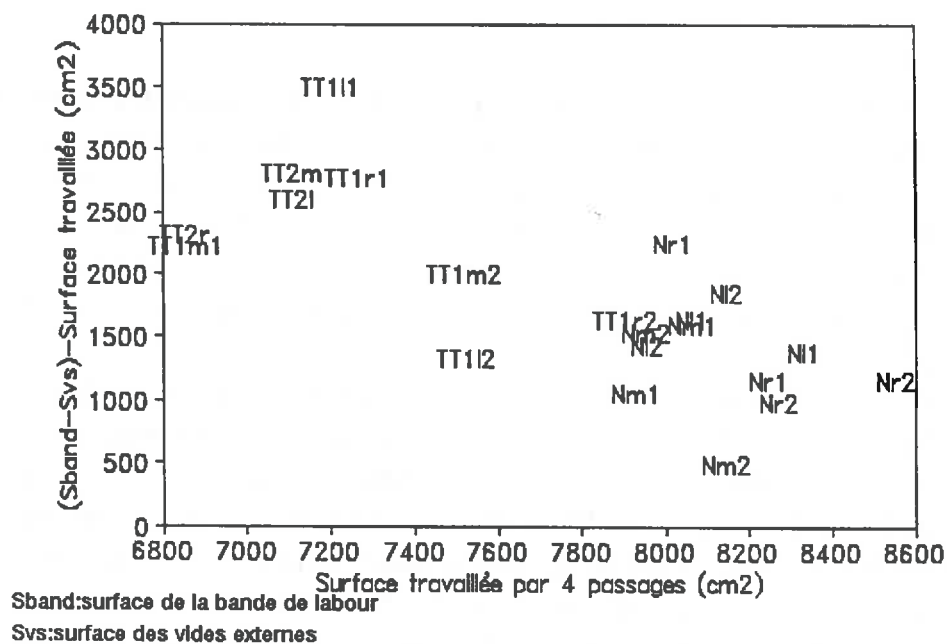


FIGURE III.C4 : Augmentation du volume apparent en fonction du volume travaillé par quatre passages de charrue (individus repérés par leur situation)

Le traitement T1 sera exclu de cette analyse car :

- le système travaillé ne correspond pas à l'horizon Ap puisque la profondeur de labour y est d'environ 23 cm alors que celle du changement de couleur y est d'environ 30 cm ;
- une redéfinition du système initial ne permettrait pas de s'abstraire de l'hétérogénéité latérale de l'état structural au sein de ce traitement avant et après labour (Cf. § III.A. et III.B.) qui empêche l'analyse à l'échelle du profil dont nous venons de justifier l'intérêt pour les autres traitements.

Pour TT1, TT2 et NT nous associerons donc à chaque catégorie morphologique détectée comme caractéristique de l'état structural, la surface qu'elle occupe avant labour dans Ap sur une largeur équivalente à quatre (ou huit pour NT) passages de charrue et celle qu'elle occupe après labour au sein des bandes de labour correspondant à ces passages.

2) Evolution du volume de l'horizon labouré dans TT1, TT2 et NT

Sur la base de mesures de profondeur et de largeur de labour effectuées sur la muraille de chaque passage de charrue en avant de chaque profil correspondant à une situation donnée (traitement x vitesse x répétition), nous avons évalué à l'échelle de quatre passages de charrue la surface correspondant au volume théoriquement travaillé. Nous l'avons comparée à la surface occupée par les bandes de labour à laquelle nous avons soustrait celle des vides externes qui est très contingente de la règle de définition du contour de bande.

On constate figure III.C4 (p. 133) que **l'augmentation de volume est positive dans tous les traitements et qu'elle est plutôt supérieure dans les traitements tassés**. Elle est néanmoins assez variable d'une situation à l'autre particulièrement dans TT1. Elle semble supérieure dans la répétition 1 surtout dans la zone de TT1 labourée à vitesse lente. Cela pourrait être dû au volume initial de Ap qui est légèrement plus important dans cette zone située à l'extrémité de la parcelle (75 m) comme l'indique la position du changement de couleur (Cf. 1, p. 130)).

En effet, des phénomènes d'arrachement du fond du labour ont été constatés au cours de l'opération. Ils sont plus importants lorsque le fond de Ap se situe en dessous du fond du labour et lorsque l'état est tassé. Cet arrachement semble être facilité par une différence de résistance au contact entre les deux horizons. Pour un même réglage de profondeur et donc un même volume théoriquement travaillé, le volume réellement travaillé est probablement un peu supérieur dans les zones considérées. Ces arrachements sont néanmoins difficiles à quantifier. Dans un premier temps nous les négligerons dans l'analyse. Dans un second temps, nous étudierons la sensibilité des résultats à une variation d'épaisseur du système pouvant correspondre à des arrachements. Par contre, nous n'étudierons pas, pour les arrachements dépassant le fond de Ap, l'effet de la texture de la couche sous-jacente.

3) Conclusion

Le labour a pour conséquence une augmentation globale du volume de l'horizon labouré. Son ampleur dépend de l'état structural du sol et ne peut être évaluée correctement que si l'on s'assure de l'identité des systèmes observés avant et après labour. Ceux-ci dépendent de la variabilité de l'état structural du sol et du volume travaillé. Cela nous oblige à limiter la quantification de l'évolution aux traitements TT1, TT2 et NT, et à n'effectuer les bilans de volume qu'à l'échelle de quatre passages de charrue.

Nous devons maintenant rechercher l'origine de cette augmentation globale de volume.

III. ORIGINE DE LA VARIATION DE VOLUME

1) Hypothèses

La variation de volume observée peut être le reflet :

- d'une variation du volume occupé par les mottes d'état Interne Δ fissurées ou non ;
- d'une variation du volume occupé par les mottes gamma et la terre fine ;
- d'une variation du volume occupé par les vides internes de plus de 1 cm.

2) Analyse des hypothèses

a) Résultats des bilans de volumes pour les fractions étudiées

Nous avons quantifié la variation de surface de chaque catégorie avant (B) et après labour (A) par rapport à la surface totale travaillée au niveau d'un profil (C) que l'on admet être celle caractérisée lors des observations d'état initial. Dans le cas de NT nous avons testé l'effet d'un gradient longitudinal d'état initial sur la parcelle en évaluant la variation avec les données du profil effectué à la cote 20 m en vis-à-vis des observations après labour puis avec celles obtenues aux cotes 40 et 60 m sur une largeur équivalente à celle labourée.

Tableau III.C2 : Bilan des surfaces occupées par types d'objets

VARIATION DE SURFACE/ SURFACE INITIALE (%)	MOTTES DELTA ET DELTA FISSUREES	MOTTES GAMMA ET TERRE FINE	VIDES INTERNES
TT1l1	+13	+22	+3
TT1m1	+1	+15	+1
TT1r1	+3	+23	+3
TT1l2	-4	+16	+3
TT1m2	+3	+16	+4
TT1r2	+2	+19	+3
TT2l	+4	+33	+6
TT2m	+6	+36	+3
TT2r	-2	+36	+2
/NT40-60m :			
NT1l	+2	+9	0
NTm1	-1	+8	0
NTr1	-1	+14	0
NTr2	+2	+8	0
NTm2	-2	+6	0
NTl2	+2	+10	0
/NT20m :			
NT1l	-2	+18	0
NTm1	-5	+16	0
NTr1	-5	+23	0
NTr2	-3	+16	0
NTm2	-6	+14	0
NTl2	-3	+18	0

Nous constatons (Tab. III.C2) que :

- la surface occupée par l'état interne delta et deltafissuré ne varie que très peu dans tous les profils : variations inférieures à $\pm 6\%$ sauf dans TT111 où elle atteint $+ 13\%$; elle semble plutôt légèrement diminuer dans NT si l'on adopte comme état initial celui caractérisé à 20 m ;

- la surface occupée par les mottes gamma et la terre fine augmente particulièrement dans TT2 :

- * 15 à 23% dans TT1 et NT voire un peu moins dans ce dernier lorsqu'on affecte l'état initial caractérisé à 40 et 60 m ;

- * environ 35% dans TT2 ;

- des vides internes apparaissent dans les traitements tassés ; ils représentent 1 à 6% de la surface avant labour.

b) Calculs d'erreurs sur les résultats

L'erreur relative sur l'évaluation des surfaces n'est pas indépendante de la taille et de la forme de l'objet considéré (Cf. annexe II.A3), mais nous pouvons raisonnablement admettre qu'elle est comprise entre $- 5$ et $+ 5\%$ dans tous les cas.

En affectant une même erreur relative de $\pm 5\%$ à toutes les surfaces nous maximisons l'erreur absolue E (%) sur le rapport $100x(\%)$ avec $100x = 100 * (A - B)/C$.

E augmente avec :

- la teneur surfacique initiale de la catégorie considérée $100 * B/C$;
- le rapport x .

Nous avons :

$$E = 10x + 0.1 * 100 * B/C, \text{ si } x > 0 ;$$

$$E = 0.1 * 100 * B/C, \text{ si } x < 0.$$

Pour chaque valeur du tableau III.C2, nous avons calculé E . Le tableau III.C3 (p. 138) qui en résulte montre que :

- aucune des valeurs observées ne remet en cause l'hypothèse d'une variation nulle du volume de delta dans les traitements tassés sauf pour TT111 ; dans ce profil, l'augmentation plus importante du volume de delta peut néanmoins être associée à la plus forte augmentation de surface totale constatée au 2) : le changement de couleur y étant plus profond, le tassement ayant affecté l'horizon A_p a créé un volume initial en delta plus important que celui que nous avons caractérisé, volume que nous retrouvons après labour ;

- dans NT, nous ne pouvons exclure une légère diminution du volume de delta surtout, dans les zones situées près de 20 m (NTm2 ; NT12) étant donné le caractère systématique de cette variation ;

- aucune des valeurs observées ne remet en cause l'hypothèse d'une augmentation du volume occupé par les mottes gamma et par la terre fine qui se traduit par une augmentation d'environ 20% de la surface en mottes gamma et en terre fine pour TT1 et NT et de 35% pour TT2.

Tableau III.C3 : Erreurs sur le calcul du bilan des surfaces occupées par les types d'objets

ERREUR VARIATION DE SURFACE/ SURFACE INITIALE (%)	MOTTES DELTA ET DELTAFISSUREES	MOTTES GAMMA ET TERRE FINE	VIDES INTERNES
TT111	8.6	4.5	0.3
TT1m1	7.4	3.8	0.1
TT1r1	7.6	4.6	0.3
TT112	7.3	3.9	0.3
TT1m2	7.6	3.9	0.4
TT1r2	7.5	4.2	0.3
TT21	8.3	5.1	0.6
TT2m	8.5	5.4	0.3
TT2r	7.9	5.4	0.2
/NT40-60m :			
NT11	1.75	9.1	0
NTm1	1.55	9.0	0
NTr1	1.55	9.6	0
NTr2	1.75	9.0	0
NTm2	1.55	8.8	0
NT12	1.75	9.2	0
/NT20m :			
NT11	2.1	9.5	0
NTm1	2.1	9.3	0
NTr1	2.1	10.0	0
NTr2	2.1	9.3	0
NTm2	2.1	9.1	0
NT12	2.1	9.5	0

Tableau III.C4 : Test de sensibilité du bilan établi pour les surfaces occupées par les types de mottes

VARIATION DE SURFACE/ SURFACE INITIALE (%)	MOTTES DELTA ET DELTAFISSUREES	MOTTES GAMMA ET TERRE FINE
TT1l1 TT1m1 TT1r1 TT1l2 TT1m2 TT1r2	+15 +3 +5 -3 +5 +4	
TT2l TT2m TT2r	+12 +13 +5	
/NT40-60m : NT1l NTm1 NTr1 NTr2 NTm2 NT12 /NT20m : NT1l NTm1 NTr1 NTr2 NTm2 NT12		+13 +11 +18 +11 +9 +13 +21 +20 +26 +19 +18 +22

c) Test de sensibilité des résultats

Nous devons tester la sensibilité de ces résultats vis-à-vis des écarts entre profondeur de labour et changement de couleur.

Si nous admettons que le changement de couleur est plus profond que le labour (Cf. II.1), il y a diminution dans les bilans de :

- la surface avant labour dans TT1 et TT2 ;
- la surface en Γ et terre fine dans NT ; nous admettrons dans ce traitement que les petites mottes delta au fond de Ap représentent une surface négligeable ; au demeurant, elles auraient tendance à diminuer la variation de surface en delta constatée.

Nous avons recalculé les bilans dans les cas concernés. Le calcul consiste à soustraire à la surface initiale précédente, la surface comprise entre la cote du changement de couleur et le fond du labour, qui est une surface en delta dans TT1 et TT2, en mottes gamma et terre fine dans NT.

Le tableau III.C4 (p. 139) qui en résulte indique que :

- pour TT1 et NT les conclusions précédentes ne sont pas remises en cause ;
- pour TT2 nous ne pouvons exclure une légère augmentation de la surface en delta ; celle-ci demeure néanmoins faible.

d) Conclusion

L'augmentation du volume total de la couche de sol au cours du labour ne peut donc avoir pour origine une variation de la porosité des mottes delta puisque le volume de ces mottes ne varie pratiquement pas, voire diminue peut-être légèrement dans NT.

Elle ne peut être liée qu'à :

- une variation de l'arrangement entre les mottes delta, c'est-à-dire de la disposition des mottes les unes par rapport aux autres ;
- une augmentation de la porosité interne des mottes gamma et de la terre fine.

Dans NT, le volume occupé par les mottes d'état interne gamma ou la terre fine croît alors qu'aucun espace poral macroscopique (vides > 1 cm) n'apparaît et que la diminution de surface en delta est trop faible pour expliquer cette augmentation.

C'est donc l'augmentation de la porosité interne des mottes gamma et de la terre fine qui est la plus probable.

Dans les traitements tassés, le labour crée un espace poral macroscopique dont l'origine ne peut être expliquée que par la première hypothèse (apparition de vides internes > 1 cm). Le volume des mottes gamma et de la terre fine augmente simultanément. Toutefois, cette augmentation n'est peut-être pas aussi importante, car la méthode de

caractérisation conduit à sous-estimer dans ces traitements les vides de plus de 1 cm au profit des mottes gamma et de la terre fine.

Variation de l'arrangement entre les mottes delta et augmentation de la porosité interne des mottes gamma et de la terre fine semblent donc avoir lieu simultanément dans les traitements tassés.

L'état structural initial conditionne donc la taille de l'espace poral créé au cours du labour.

L'analyse de l'évolution quantitative de l'espace poral au cours du labour que nous venons de faire doit être complétée par celle de l'évolution de sa répartition spatiale qui ne se traduit pas forcément par une variation quantitative. Mais, auparavant, on peut se demander à titre indicatif si les variations d'espace poral constatées se retrouvent avec l'analyse de la porosité.

3) Confrontation des résultats avec ceux obtenus par l'analyse de la porosité

A partir de la variation de volume au cours du labour que nous avons quantifiée précédemment, nous avons réévalué les indices des vides, structural total, entre mottes et intramottes après labour pour toutes les situations de TT1, TT2 et NT. Nous avons alors quantifié la variation des indices au cours du labour. Les résultats sont résumés au tableau III.C5.

Ils montrent :

- une augmentation de l'espace poral total dans tous les traitements ; celle-ci est plus forte dans les traitements tassés que dans les traitements non tassés ;
- une augmentation de l'espace poral entre mottes dans tous les traitements ;
- une diminution de l'espace poral intramottes dans toutes les situations de NT ;
- une variation négligeable de l'espace poral intramottes dans les traitements tassés.

TRAITEMENTS	VARIATION D'INDICE DES VIDES		
	STRUCTURAL TOTAL	STRUCTURAL ENTRE MOTTES	STRUCTURAL INTRAMOTTES
NT	+ 0.308	+ 0.416	- 0.055
TT1	+ 0.565	+ 0.572	+ 0.003
TT2	+ 0.677	+ 0.665	+ 0.012

Tableau III.C5

Ces résultats, donnés à titre indicatif, sont cohérents avec ceux donnés par l'observation morphologique. L'augmentation de volume est supérieure dans les traitements

tassés. Elle concerne essentiellement l'espace entre mottes, c'est-à-dire l'arrangement entre les mottes delta, la porosité de la terre fine et celle des mottes gamma (non dissociées de la terre fine).

4) Conclusion

Le bilan effectué sur les surfaces occupées par les éléments structuraux avant et après labour permet de montrer que l'origine de la variation de volume dépend de l'état structural initial.

Dans le traitement non tassé, il s'agit d'une simple augmentation de la porosité des mottes gamma et de la terre fine. Dans les traitements tassés, l'apparition d'un espace poral macroscopique liée à un réarrangement entre les mottes delta, s'ajoute au phénomène précédent.

IV. EVOLUTION DE LA REPARTITION DE L'ESPACE PORAL AU SEIN DES MOTTES DONT LE VOLUME GLOBAL VARIE PEU

1) Hypothèses

Au sein d'une catégorie dont le volume global ne varie pas notablement (les mottes delta et deltafissurées), il peut y avoir modification de la répartition de l'espace poral par :

- apparition de fissures ;
- modification de l'arrangement entre les mottes, en particulier comme conséquence de la réduction du calibre.

Nous avons donc étudié l'évolution de l'état de fissuration et de la taille des mottes concernées au cours du labour.

2) Evolution de la fissuration

a) Description

Le tableau III.C6 montre :

- l'apparition de niveaux de fissuration supérieurs ou égaux à 2 dans les traitements tassés soit 4 à 27% dans TT1 et 4 à 10% dans TT2 accompagnée d'une diminution équivalente des mottes delta légèrement fissurées dans TT1, des mottes delta pures dans TT2 ;

- une légère diminution de la surface occupée par les mottes légèrement fissurées d'environ 5% dans NT (alors que l'erreur est inférieure à 4%) et une augmentation simultanée de même ordre des mottes delta non fissurées.

**Tableau III.C6 : Bilan des surfaces occupées par les mottes delta
suivant leur niveau de fissuration**

VARIATION DE SURFACE/ SURFACE INITIALE (%)	MOTTES DELTA FISSUREES 2 NIVEAUX ET PLUS	MOTTES DELTA FISSUREES 1 NIVEAU	MOTTES DELTA NON FISSUREES
TT1l1	+27	-16	+2
TT1m1	+4	-4	+1
TT1r1	+11	-20	+12
TT1l2	+15	-6	-13
TT1m2	+31	-29	+1
TT1r2	+14	-27	+15
TT2l	+4	+7	-16
TT2m	+10	-6	-8
TT2r	+4	+9	-25
/NT40-60m :			
NT1l	+2	-5	+6
NTm1	0	-5	+4
NTr1	-1	-5	+4
NTr2	+5	-5	+1
NTm2	-2	-5	+6
NTl2	-2	-3	+7
/NT20m :			
NT1l	-2	-5	+4
NTm1	-3	-5	+3
NTr1	-4	-4	+3
NTr2	+2	-5	0
NTm2	-5	-5	+4
NTl2	-5	-3	+5

Tableau III.C7 : Bilan des surfaces occupées par les mottes delta dans NT lorsqu'on ne tient pas compte des mottes situées après labour sous la roue de rale du passage suivant

VARIATION DE SURFACE/ SURFACE INITIALE (%)	MOTTES DELTA NON FISSUREES
/NT40-60m :	
NT11	+3
NTm1	+2
NTr1	+2
NTr2	+0
NTm2	+2
NT12	+3
/NT20m :	
NT11	+1
NTm1	0
NTr1	+1
NTr2	-2
NTm2	+1
NT12	+2

L'apparition dans les traitements tassés d'un espace poral de fissures au sein des mottes serait indicatrice d'un travail effectif de fragmentation au cours du labour et doit donc être analysée avec l'évolution du calibre des mottes.

L'apparition de mottes delta non fissurées dans NT serait indicatrice d'un compactage au cours du labour.

Le labour est une opération dont l'objectif est de fragmenter. On peut donc s'interroger sur la plausibilité de l'existence d'un processus de compactage concomitant à la fragmentation.

b) Analyse de l'hypothèse d'un compactage au cours du labour

La création de delta dans NT pourrait résulter :

- d'un tassement par la roue de raie de la bande créée au passage précédent par le dernier corps de la charrue ; l'ampleur de ce phénomène dépend du dégagement de la raie et de la largeur du pneumatique ;

- d'un compactage propre au travail du corps de charrue (par exemple lors du trajet sur le versoir) ;

- d'un tassement par la roue de guérêt du passage précédent ; cette hypothèse est à rejeter dans notre cas, car nous n'avons pas constaté visuellement que les bandes de labour correspondant au passage de la roue de guérêt avaient des teneurs supérieures en delta.

Pour tester l'hypothèse d'un tassement par la roue de raie, nous avons quantifié la surface des mottes delta situées sous la roue de raie et nous avons soustrait cette surface à la surface en delta évaluée précédemment pour NT avant labour (nous faisons l'hypothèse que toutes les mottes delta sous la roue de raie ont pour origine un tassement par celle-ci). Nous avons alors réestimé la variation de surface en delta avant et après labour. Nous constatons sur le tableau III.C7 que celle-ci devient pratiquement nulle.

L'hypothèse d'un compactage par la roue de raie semble donc acceptable dans NT.

Ce phénomène n'est visible que dans NT. Trois hypothèses peuvent être avancées pour expliquer son absence dans les traitements tassés où le dégagement de la raie était pourtant plus mauvais :

- les mottes situées sous la roue de raie étaient déjà d'état interne delta non fissuré avant le passage de celle-ci ;

- dans le cas d'un sol non tassé il y a plus de débordement de la terre par dessus le versoir que dans le cas d'un sol tassé ; terre qui retombe en fond de raie où elle est alors tassée par la roue de raie du passage suivant ;

- le calibre résultant du travail du dernier corps de charrue y était trop important pour que l'état interne soit affecté par le passage de la roue de raie et que des fissures existantes disparaissent ; les travaux de De Leon (1991) montrent en effet que l'état interne résultant d'un compactage dépend du calibre initial des mottes et qu'au laboratoire l'état delta non fissuré n'a pu être obtenu que par compactage de la terre fine ; or, le calibre des mottes

delta et deltafissurées après labour est plus important dans les traitements tassés que dans NT.

c) Conclusion

L'apparition d'un espace poral de fissure semble indiquer l'existence d'un travail de rupture des mottes dans les traitements tassés.

Dans le traitement non tassé, l'hypothèse d'un compactage par la roue de rale est acceptable alors que dans les traitements tassés, il n'apparaît pas de diminution de l'espace poral intramottes. Il est probable que cette différence entre traitements est liée à l'effet de l'état structural initial sur les processus de compactage mais on ne peut exclure qu'elle soit liée à la trajectoire des mottes sur le versoir.

Une analyse de la variation des calibres des mottes au cours du labour s'impose donc maintenant.

3) Variation du calibre des mottes delta et deltafissurées au cours du labour

a) Hypothèses

Notre objectif est de tester la plausibilité des deux hypothèses suivantes.

HYPOTHESE 1 : Le calibre des mottes varie réellement au cours du labour suite à une division en mottes de plus faibles tailles, accompagnée ou non d'une érosion légère du pourtour des mottes résultant du frottement des mottes le long du versoir et entre elles lors de leur parcours. Pour un calibre donné la présence d'une fissuration supérieure à celle constatée avant labour est révélatrice d'une division incomplète. L'opération consiste en un réel travail de fragmentation des mottes.

HYPOTHESE 2 : Le calibre des mottes de taille inférieure à la largeur de prise de raie ne varie pas ou peu au cours du labour suite éventuellement à une érosion légère du pourtour des mottes. La fragmentation des mottes est alors limitée.

Elle n'est pas nulle car, quel que soit le traitement, les mottes dont la taille est supérieure à la largeur de prise de raie sont découpées par le coutre créant une unité d'un calibre égal ou inférieur à la largeur de prise de raie.

Nous désirons donc déterminer si une fragmentation indépendante de la découpe du coutre est plausible.

Sous l'hypothèse 1, le nombre de mottes des classes correspondant aux calibres les plus élevés inférieurs à la largeur de prise de raie doit diminuer et celui des classes de calibre faible ou moyen augmenter.

Sous l'hypothèse 2, le nombre de mottes des classes de calibres les plus élevés ne doit pas varier. Il y a juste réduction de ces calibres à la largeur de prise de raie s'ils y étaient supérieurs. Le nombre des mottes de calibre inférieur à 5 cm ne varie pas ou augmente (formation de petites mottes par érosion).

b) Analyse des hypothèses

Nous avons cherché à comparer pour les trois traitements l'évolution de la distribution du nombre de mottes par classe. La méthode de caractérisation que nous avons adoptée implique de quantifier le nombre de mottes sur une surface que nous supposons être représentative du volume étudié. Il est probable que la représentativité de notre observation est plus faible en terme de nombre qu'en terme de surface occupée (Cf. Chap. II.A). Nous risquons par conséquent d'être moins pertinents pour l'analyse de ce critère. Pour augmenter la pertinence de celle-ci, il nous a paru nécessaire d'augmenter la surface sur laquelle nous évaluons ce nombre.

Nous n'avons donc pas choisi comme échelle un passage de charrue mais quatre, soit l'échelle correspondant au plus petit taux d'échantillonnage utilisé pour caractériser une situation (traitement x vitesse x répétition) sur la parcelle.

Pour comparer les situations, nous avons ramené les effectifs observés à cette échelle, sachant que le taux d'échantillonnage n'est pas le même entre les situations. Il est trois fois plus important après qu'avant labour dans TT2, six fois dans TT1 et NT. Il est deux fois plus fort après labour dans TT1 que TT2, et deux fois plus fort dans NT que TT1.

Pour tous les traitements, les comparaisons statistiques des distributions avant et après labour ont par contre été faites sur les effectifs réellement observés.

D'après les figures III.C5 et III.C6 (p. 148), le nombre total de mottes est multiplié par 2.8 au cours du labour dans TT1 et TT2 et les distributions sont significativement modifiées au niveau 1%. Les classes inférieures à 35 voire 40 cm (largeur de prise de raie) augmentent toutes, ce que l'hypothèse 2 d'une simple érosion ne permet pas d'expliquer. Nous constatons en particulier dans TT2 l'apparition de mottes entre 10 et 25 cm inexistantes avant labour.

Dans TT1 l'augmentation du nombre des mottes de calibre de moins de 5 cm est plus importante que dans TT2 où le nombre de mottes entre 5 et 10 cm s'accroît plus. On peut penser que les divisions dans TT1 avaient une maille un peu plus fine sur les pourtours des mottes suite à la légère fissuration initiale notée dans TT1. L'amorce des fissures en périphérie des blocs de TT1 y aurait entraîné une érosion du type de celle proposée dans l'hypothèse 2 sans que l'on puisse réduire le travail effectué à ce seul phénomène.

Dans les deux traitements tassés l'hypothèse 1 est donc la plus probable mais on ne peut exclure l'action simultanée du phénomène indiqué dans l'hypothèse 2.

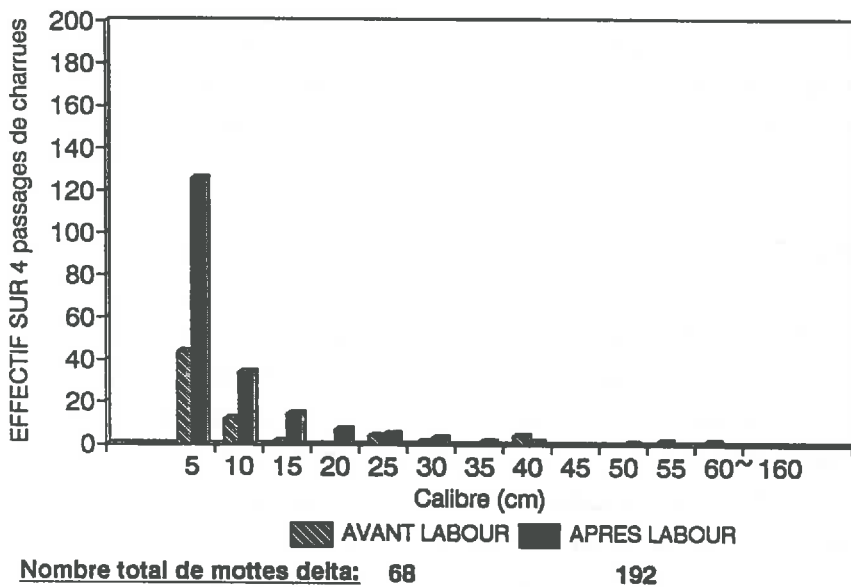


FIGURE III.C5 : Comparaison des distributions en nombre avant et après labour des calibres des mottes delta (fissurées ou non) sur le traitement TT1

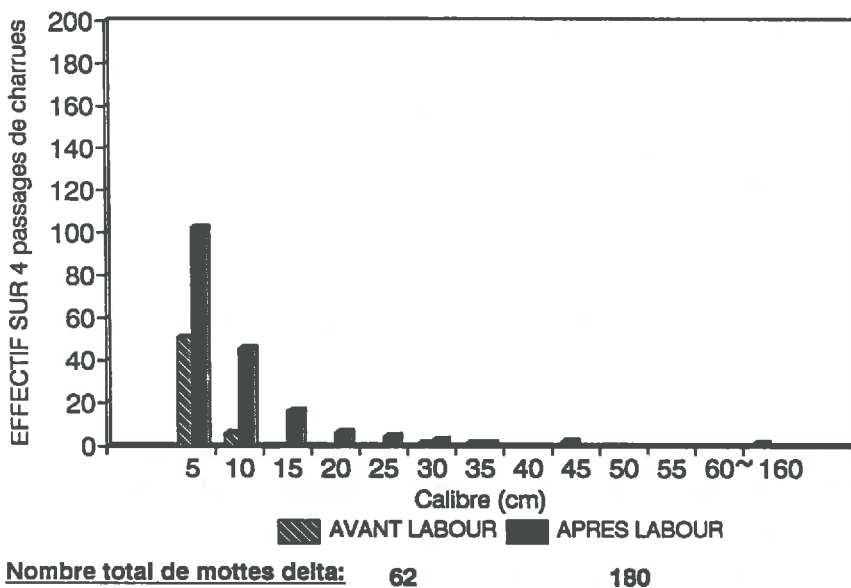


FIGURE III.C6 : Comparaison des distributions en nombre avant et après labour des calibres des mottes delta (fissurées ou non) sur le traitement TT2

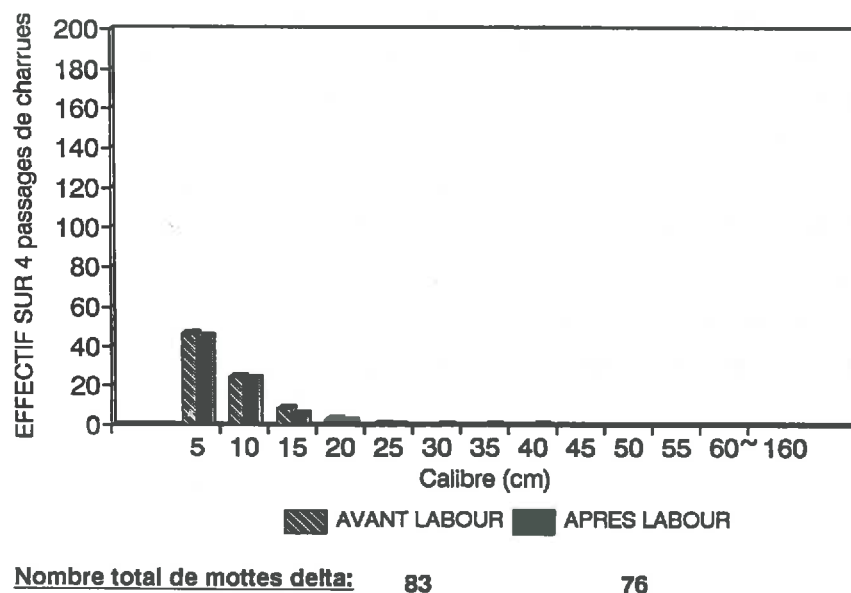


FIGURE III.C7 : Comparaison des distributions en nombre avant et après labour des calibres des mottes delta (fissurées ou non) sur le traitement NT

Par contre, d'après la figure III.C7, le nombre total de mottes n'augmente pas dans NT et aurait plutôt tendance à diminuer d'environ 7%. Dans la mesure où la surface en mottes delta semble légèrement diminuer au profit de la surface en mottes gamma et terre fine, l'hypothèse émise au paragraphe I. d'un transfert de faible ampleur des mottes delta de petite taille dans la catégorie terre fine est assez probable.

L'apparition de quelques grosses mottes est liée au compactage par la roue de raie.

Si l'on ne distingue pas la répartition des mottes de plus de 20 cm (liée à ce compactage) la distribution des calibres ne varie néanmoins pas significativement au cours de l'opération au niveau 5% (test du χ^2 en annexe III.C1).

L'hypothèse 2 d'une simple érosion des mottes semble dans NT la plus probable.

4) Relation entre fissuration et réduction de calibre : modification des hypothèses

Au paragraphe précédent, nous avons analysé des hypothèses sur les processus de fragmentation intervenant au cours du labour.

Afin de préciser notre analyse nous devons maintenant :

- **déterminer si la division des mottes constatée dans TT1 et TT2 n'a pas été accompagnée d'une fissuration sur certains calibres ;**
- **si l'absence de division dans NT n'est pas associée à une augmentation de la fissuration.**

Les figures III.C8 et III.C9 (p. 150) montrent que dans TT1 et TT2 l'augmentation du nombre de mottes concerne essentiellement les mottes delta non fissurées et les mottes fissurées de 2 niveaux et plus.

Les fissures de niveaux 2 et plus apparaissent sur les mottes de plus de 10 cm (classes 15 à 40), c'est-à-dire des mottes dont la taille n'a pas été fortement réduite. On peut donc penser que l'état fissuré correspond à un état de division incomplète.

Il y a eu fissuration mais pas rupture complète des grosses mottes.

La rupture est moins complète dans TT1 que TT2. Ce fait est probablement dû à un réarrangement de la phase solide non visible nettement à l'oeil avant labour dans TT1, entraînant une résistance supérieure. Des mesures pénétrométriques effectuées la veille du labour montrent que la résistance était en effet en moyenne supérieure dans TT1 (Fig.III.C10, p. 151).

La figure III.C11 (p. 151) montre que dans NT :

- le nombre de mottes avec 1 niveau de fissuration diminue nettement, celui des mottes delta non fissurées augmente ;
- le nombre de mottes delta fissurées à 2 niveaux varie très peu.

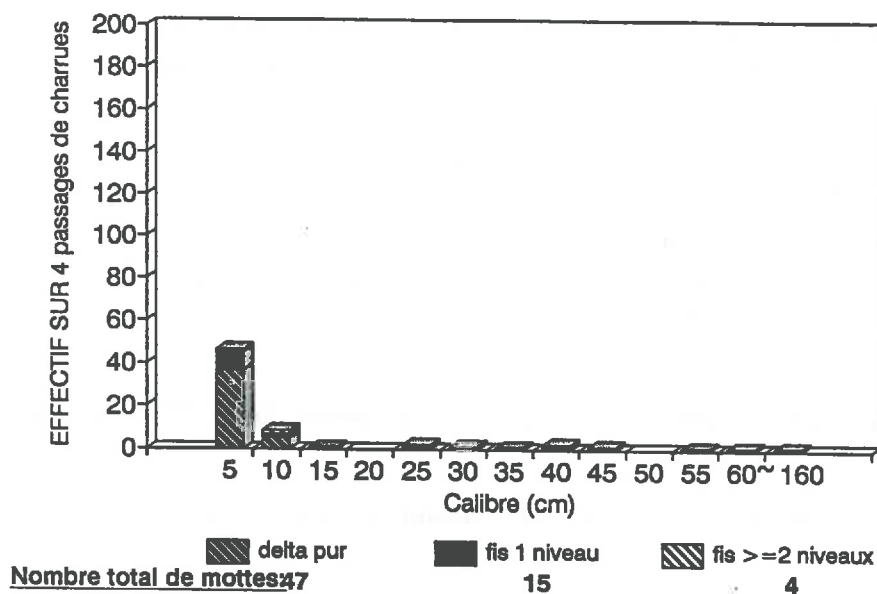


FIGURE III.C8 : Distributions en nombre avant labour des calibres des mottes delta selon leur niveau de fissuration sur les traitements TT1 et TT2

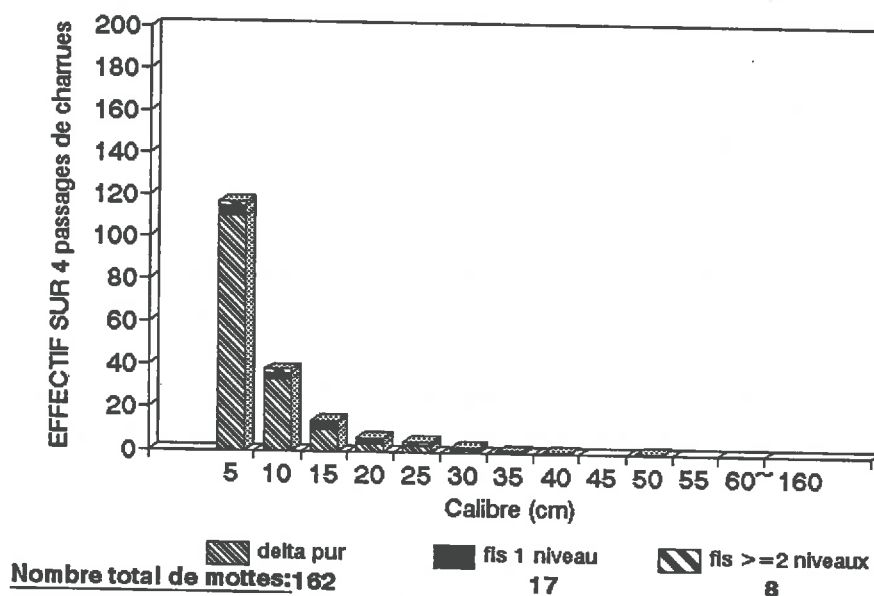


FIGURE III.C9 : Distributions en nombre après labour des calibres des mottes delta selon leur niveau de fissuration sur les traitements TT1 et TT2

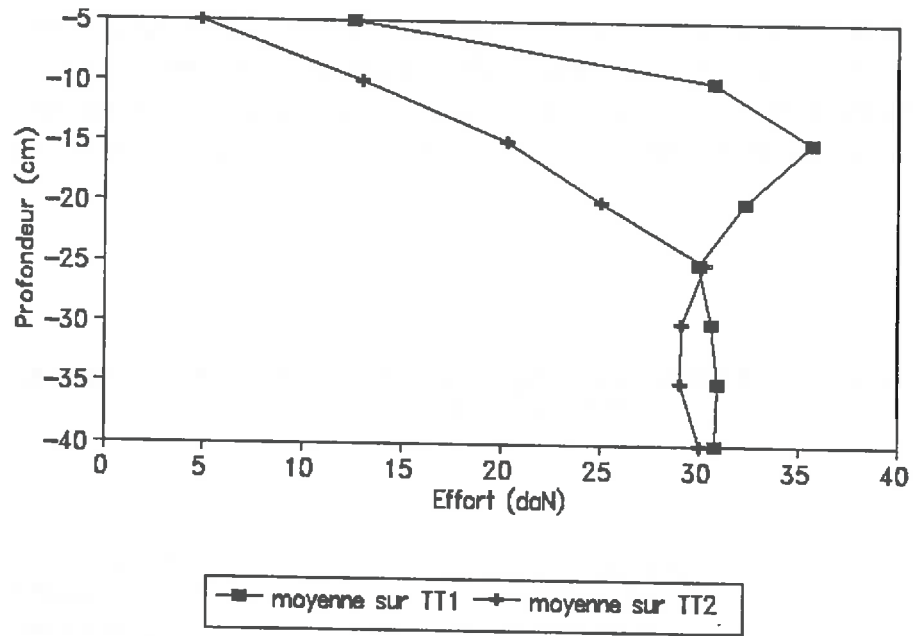


FIGURE III.C10 : Profils de résistance pénétrométrique sur les traitements TT1 et TT2 la veille du labour

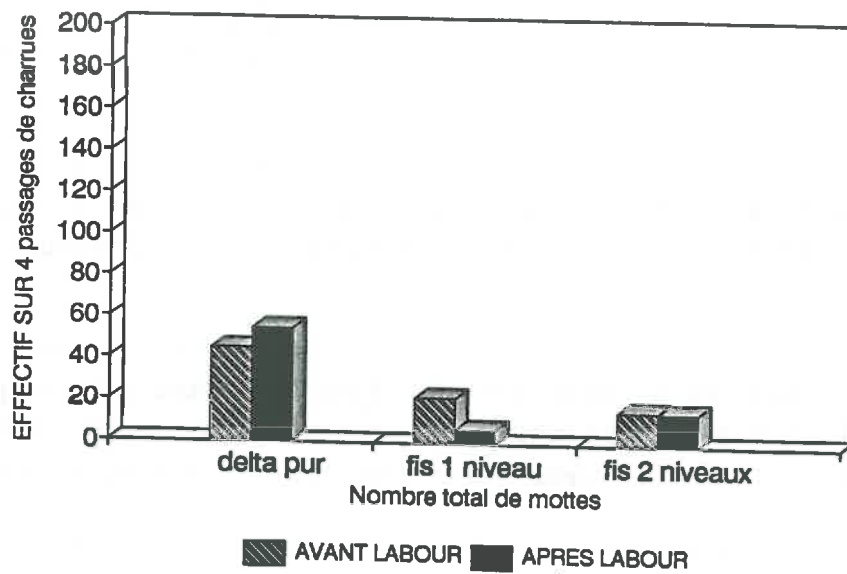


FIGURE III.C11 : Comparaison des nombres de mottes avant et après labour selon leur niveau de fissuration sur le traitement NT

D'après le tableau III.C8, la diminution du nombre des mottes avec 1 niveau de fissuration affecte toutes les classes de calibre, alors que l'augmentation des mottes delta non fissurées hors roue de raie se limite aux classes 5 et 10. Le nombre des mottes fissurées à 2 niveaux de la classe 15 semble diminuer légèrement au profit des classes 5 et 10.

Tableau III.C8 : Evolution au cours du labour du nombre des mottes fissurées d'un calibre donné dans NT

CLASSE DE CALIBRE (cm)	NOMBRE DE MOTTES AVANT LABOUR (4 passages)			NOMBRE DE MOTTES APRES LABOUR (4 passages)		
	DELTA NON FISSUREES	DELTA FISSUREES 1 Niveau	2 Niveaux	DELTA NON FISSUREES	DELTA FISSUREES 1 Niveau	2 Niveaux
5	32.5	8.5	5.0	35.2	3.4	5.8
10	9.5	9.5	5.0	15.0	2.5	6.3
15	2.0	3.0	3.5	2.8	0.5	2.3
20	1.0	0.5	1.5	0.9	0.1	0.8
25			1.0	0.4		
30				0.1		
35				0.1		
40				0.1		

Il y a donc une diminution globale du nombre de mottes fissurées associée à une augmentation des faibles calibres de mottes non fissurées ou plus fissurées, qui pourraient s'expliquer par un éclatement des premières en terre fine ou en mottes de plus faible calibre.

L'hypothèse 2 reste donc valide dans NT dans la mesure où l'on y inclut la possibilité d'un éclatement des mottes fissurées en mottes de plus faible calibre voire en terre fine, pouvant conduire à une réduction légère du nombre total de mottes.

5) Effet de la vitesse

Nous n'avons pu détecter de réels effets de la vitesse sur les distributions des surfaces occupées par les différents calibres de mottes dans les profils analysés au § III.B.

Nous devons néanmoins déterminer si le nombre total de mottes varie avec la vitesse et quelles classes sont alors affectées. Une création d'un nombre non négligeable de petites mottes peut en effet passer inaperçue au niveau volumique compte-tenu de leur faible volume.

Les figures III.C12, III.C13 et III.C14 (p. 154) confirment que les différences entre vitesses de labour sont faibles dans tous les traitements. Les distributions de calibres ne sont pas significativement différentes dans TT1 et NT au niveau 5% alors que dans TT2 le nombre de mottes de faible calibre (< 10 cm) est moins important à vitesse lente. La différence est significative au niveau 1%. (test du χ^2 en annexe III.C1).

Néanmoins, le nombre total de mottes est plus important dans les zones labourées à vitesse rapide dans TT1 et NT. Dans TT2, ce résultat ne se confirme pas car c'est à vitesse moyenne qu'il est le plus important. L'effectif le plus faible est celui correspondant à la vitesse lente.

La fragmentation serait donc légèrement plus faible à vitesse lente mais dans tous les cas la différence concerne principalement les classes 5 et 10.

Il est donc probable que la vitesse modifie essentiellement le phénomène d'érosion mentionné précédemment suite à une augmentation des frottements dans la bande labourée. Ce phénomène étant peu important, son effet est peu perceptible au niveau des surfaces occupées par les différents calibres de mottes (résultats du § III.B). L'arrangement des mottes est donc peu affecté par la vitesse.

6) Conclusion

Le labour a pour conséquences une réduction du calibre des mottes de plus de 2 cm (particulièrement importante dans les traitements tassés) et une modification de l'état interne des mottes delta (augmentation de la fissuration dans les traitements tassés, réduction de la porosité interne dans le traitement non tassé).

Les processus de transformation en jeu varient selon l'état structural initial. L'effet de la vitesse d'avancement du tracteur sur ces processus est par contre peu discernable.

Dans les traitements tassés, une division, accompagnée d'une érosion du pourtour des mottes et d'une fissuration des mottes de calibre important, semble plausible. Par contre, dans le traitement non tassé, une érosion légère du pourtour des mottes et un compactage des mottes situées sous la roue de rale suffisent à expliquer les résultats observés.

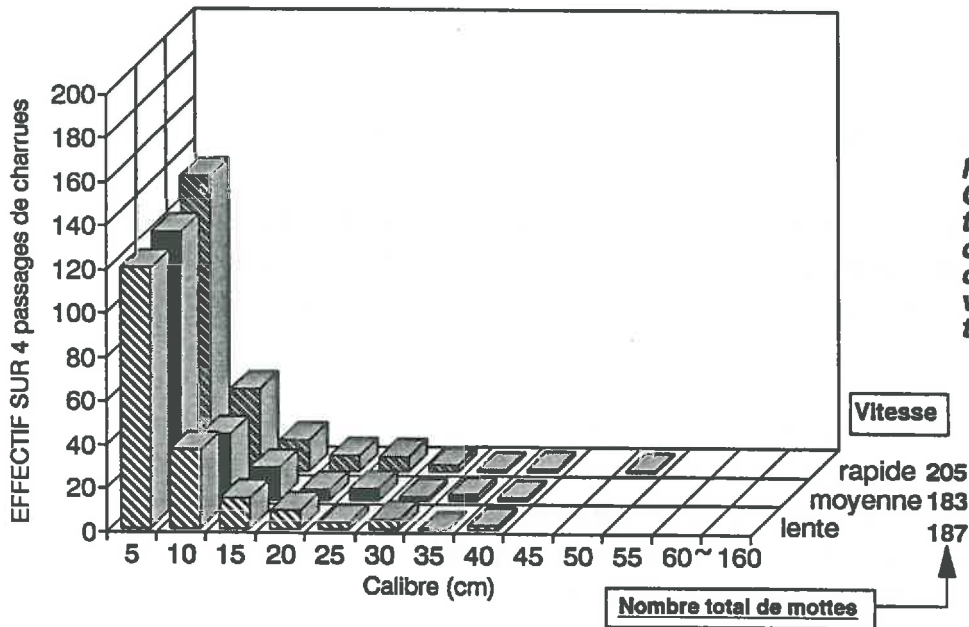


FIGURE III.C12 :
Comparaison des distributions en nombre des calibres des mottes delta (fissurées ou non) après labour selon la vitesse de labour sur le traitement TT1

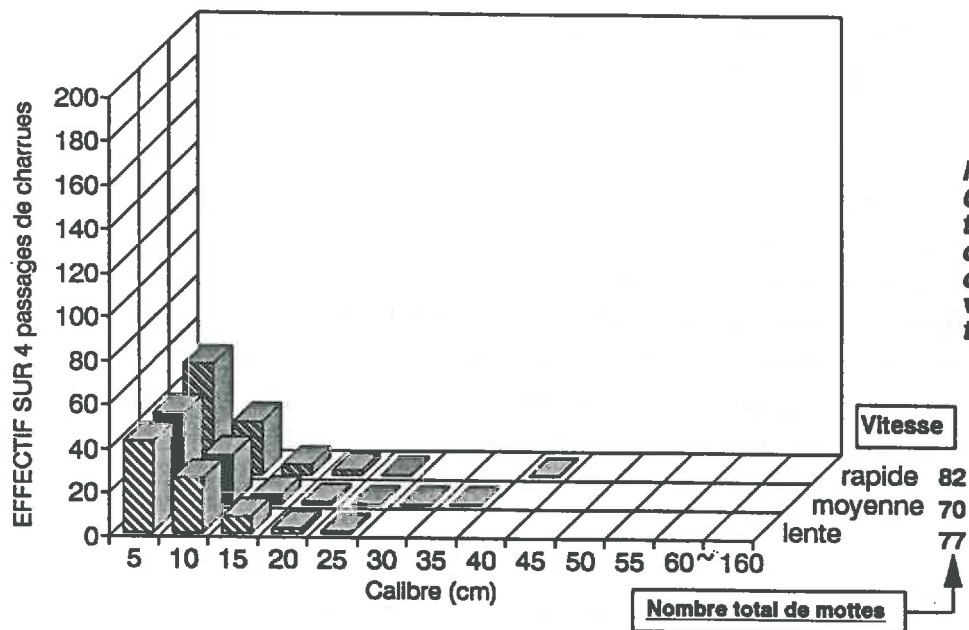


FIGURE III.C13 :
Comparaison des distributions en nombre des calibres des mottes delta (fissurées ou non) après labour selon la vitesse de labour sur le traitement NT

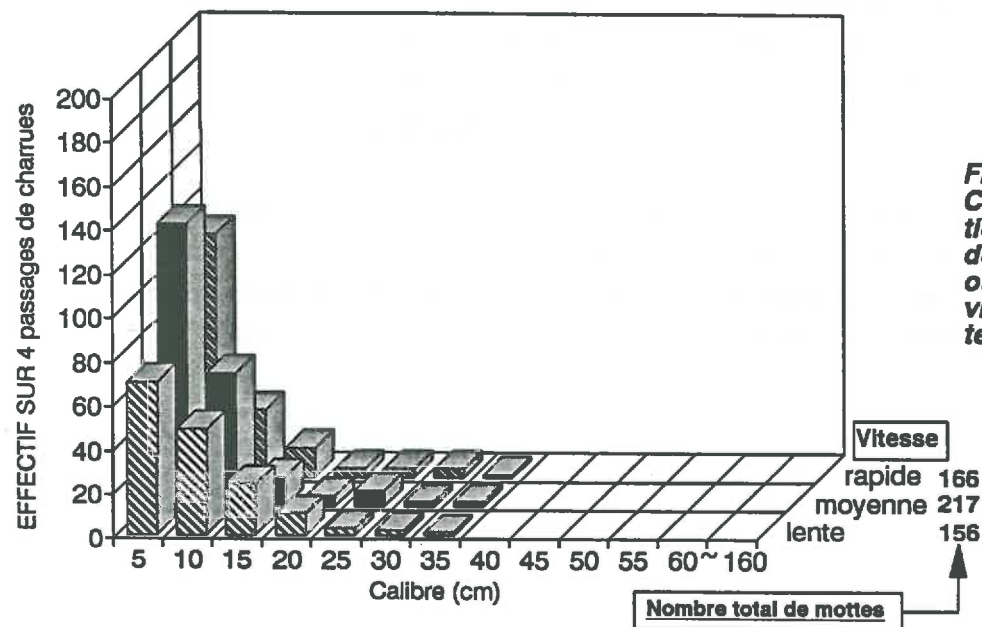


FIGURE III.C14 :
Comparaison des distributions en nombre des calibres des mottes delta (fissurées ou non) après labour selon la vitesse de labour sur le traitement TT2

V. CONCLUSION

Les transformations de l'état du sol au cours du labour dépendent de l'état initial et peu de la vitesse dans les conditions expérimentales explorées.

D'après l'analyse morphologique quantitative qui est en accord avec les données fournies à titre indicatif par l'analyse de la porosité au § III, les transformations de l'état du sol au cours du labour consistent en :

- **une augmentation de l'espace poral au sein de la couche labourée :**
 - * liée uniquement à l'apparition de petits vides dans les mottes gamma ou la terre fine dans NT ;
 - * liée à la création de vides de plus de 1 cm entre les mottes dans les traitements tassés, à laquelle pourrait être associée l'apparition de vides de plus faible taille comme dans NT ;
- **une réorganisation de l'arrangement entre les mottes delta avec :**
 - * peu de modification du calibre des mottes dans NT, mais une légère diminution du nombre de mottes par érosion de leur pourtour au profit de la terre fine ;
 - * une réduction importante de la taille des mottes dans les traitements tassés que l'on ne peut expliquer par une simple érosion des blocs découpés par le coutre ; une division réelle au cours du soulèvement et du basculement de la bande de terre paraît probable ; elle a pour conséquence une modification du champ des possibilités de réorganisation de la phase solide alors que dans NT le mécanisme en jeu n'entraîne qu'un déplacement des mottes les unes par rapport aux autres dans un champ de possibilités demeurant constant ;
- **une modification de l'état interne des mottes delta avec augmentation de la porosité interne des grosses mottes par fissuration lorsque la division est incomplète ;** ce phénomène n'est pas de même importance dans les deux traitements tassés qui ne diffèrent que par leur histoire entre compactage et labour ; la raison de cette rupture moins complète dans TT1 pourrait être un réarrangement de la phase solide non visible à l'oeil au cours de cette période entraînant une résistance supérieure ;
- **un compactage au niveau de la roue de raie dans les cas où l'état initial était fragmentaire.**

Cette étude montre par conséquent que le travail de fragmentation des mottes est moins important lorsque l'état est initialement plus fragmentaire. L'énergie requise pour l'effectuer doit donc être plus faible ce qui doit avoir des répercussions sur le fonctionnement de l'outil que nous devons étudier au chapitre suivant.

Mais, avant d'analyser plus à fond l'effet de l'état initial sur ce fonctionnement et les processus mécaniques pouvant expliquer les résultats obtenus, nous allons tester la généralité de l'effet déterminant de l'état initial sur l'état transformé dans des sites de texture différente de la parcelle de Grignon.

D. RESULTATS DANS D'AUTRES CONDITIONS D'HUMIDITE ET DE TEXTURE AU LABOUR

Nous avons montré au chapitre précédent dans des conditions d'humidité et de texture au labour bien déterminées :

- l'impossibilité d'annuler par une seule opération de labour une dégradation initiale du sol quelle que soit la vitesse pratiquée ;

- la présence d'une interaction entre les mécanismes de fragmentation et l'état structural initial.

Nous n'avons néanmoins pas exploré toute la gamme des conditions physiques initiales et des réglages de l'outil qu'il est possible de rencontrer au champ. Il est donc important de pouvoir analyser les résultats obtenus dans un réseau offrant une gamme plus large de conditions, afin de voir si ces résultats ne constituent pas un cas trop particulier.

Il n'était pas prévu dans le réseau choisi (12) un contrôle des conditions physiques initiales et des réglages de l'outil comme celui que nous avons réalisé à Grignon. En effet, celui-ci impliquait des précautions expérimentales très lourdes incompatibles avec les objectifs propres du réseau. Celui-ci a pour nous un statut d'enquête.

Afin de couvrir une gamme de situations suffisamment large, nous n'avons donc pas cherché à reproduire les traitements réalisés sur Grignon mais à nous placer dans les conditions d'états structuraux que l'on rencontre au champ, acceptant qu'il puisse y avoir de légères différences d'humidité entre les états initiaux les plus contrastés, mais en cherchant à nous donner le maximum de chance d'annuler l'effet de l'état structural initial sur l'état transformé.

Nous avons pour cela :

- exploré des gammes d'humidité plus faibles qu'à Grignon de manière à approcher la limite de retrait où la résistance est *a priori* plus faible ;
- ajouté, lorsque c'était possible, des rasettes aux corps de charrue afin d'augmenter le travail de fragmentation ;
- fait varier la vitesse de labour.

I. DEFORMATION DE LA RELATION ETAT INITIAL-ETAT TRANSFORME

1) Caractérisation des conditions expérimentales

Les conditions explorées devaient être relativement larges, aussi avons-nous procédé par enquêtes dans des régions françaises correspondant à des climats, des textures du sol, des modes de conduite du labour et des précédents culturels différents.

(12) Le réseau a été créé dans le cadre d'une AIP "Travail du sol" de l'INRA.

Nous avons cherché à avoir dans chaque site une différenciation importante de l'état du sol avant labour par un tassement d'une partie des parcelles labourées.

Quatre sites ont été retenus. Leurs caractéristiques figurent au tableau III.D1.

Tableau III.D1 : Caractéristiques des situations expérimentales

SITE	BAZIEGE	LA JAILLIERE	MONS	PALAISEAU
Antéprécédent Précédent	Blé Tournesol	Blé Pois	Blé Maïs	Colza Blé
Type de sol	Sol calcaire argilo- limono- sableux profond	Sol brun hydromorphe sur altérite de schiste gréseux	Limon argileux	Limon argileux
Teneur argile	34%	19%	17%	18%
Situation topograpique	Coteau légère pente	plane	plane	plane

Les conditions du labour sont les suivantes (Tab. III.D2) :

SITE	BAZIEGE		LA JAILLIERE		MONS			PALAISEAU	
TRAITEMENT	T	NT	T	NT	T1	T2	NT	T	NT
Humidité (%) au labour W	<19	<20	15.5	16.9	16	18	17	21 à 22	23 à 22
Charrue	losange 3 corps 14 pouces rasettes		4 corps 14 pouces rasettes sur NT		4 corps 16 pouces rasettes			3 corps 14 pouces rasettes	
Profondeur de labour (cm)	25	25	20	22	20 à 22	22 à 25	27	26	25.5
Vitesse de labour (km/h)	3.5	5.5	3	7	<8	<6	8	5.2 8.1	5.3 8.3

Sur le site de Mons, on distingue deux dates de tassement (T1 et T2),
T2 correspondant à des conditions plus favorables au compactage.

Tableau III.D2

D'après ce tableau, nous avons *a priori* bien réussi à élargir la gamme de résistance mécanique explorée pour un état structural donné : le rapport W%/A% (dont Guérif (1988-b) a montré la pertinence pour étudier les variations de résistance en traction) varie entre 0.6 et 1.3 sur les sites expérimentaux alors qu'à Grignon il était de 0.8.

En revanche, nous n'avons pas réussi à atteindre partout la même vitesse de labour : celle-ci demeure plus faible dans les traitements tassés en raison de difficultés de traction.

La profondeur de labour varie peu entre traitements sauf à Mons où elle est inférieure dans les traitements tassés. Dans ce dernier cas, la différence de masse de terre labourée entre traitements est plus faible.

A La Jaillière, l'emploi de la rasette n'a concerné que le traitement NT. Cela risque d'y avoir renforcé les différences entre traitements au lieu de les diminuer.

2) Résultats : variation de l'effet des traitements sur l'état final selon les conditions expérimentales

Les observations après labour n'ont pas toutes été faites immédiatement après labour. Après reprise et semis, elles se sont limitées au compartiment H5-L3, dont l'état non affecté par ces derniers travaux est jugé représentatif de l'état après labour. Dans tous les cas, nous avons appliqué la même méthode de caractérisation qu'à Grignon.

Nous avons quantifié dans le compartiment concerné, pour chaque traitement après labour :

- la teneur surfacique en mottes delta ;
- la surface occupée par les mottes delta d'un calibre donné par rapport à la surface occupée par l'ensemble des mottes delta.

Les résultats sont résumés dans le tableau III.D3 à l'aide des variables les plus pertinentes dégagées à Grignon pour opposer les traitements tassés et non tassés :

SITE	BAZIEGE		LA JAILLIERE		MONS			PALAISEAU	
TRAITEMENT	NT	T	NT	T	NT	T1	T2	NT	T
Compartiment	H5-L3		H5-L3		H5-L3			LABOUR	
Teneur en delta après labour (%)	23	52	13	44	37	39	37	31	43
Surface/ Delta (%)									
< 15 cm	100	84	100	55	92	91	61	92	76
≥ 30 cm	0	0	0	11	0	0	0	0	0

Tableau III.D3

Ce tableau montre sur tous les sites (sauf Mons) que :

- la teneur en delta est toujours plus faible dans les traitements non tassés que dans les traitements tassés ;
- la teneur surfacique des mottes de faible calibre (< 15 cm) est toujours supérieure dans les premiers.

Les écarts entre les traitements sont néanmoins variables d'un site à l'autre.

Sur le site de Mons, les états observés sont par contre peu différents hormis la présence de calibres légèrement plus importants dans T2.

Ces différences (ou absence de différences dans le cas de Mons) doivent s'interpréter en fonction de l'effet des traitements sur l'état initial, effet qui n'est pas forcément le même sur tous les sites. L'état initial a été caractérisé selon la méthode proposée par Manichon & Gautronneau (1987) et à l'aide de mesures de densité de manière à vérifier que le tassement avait bien engendré des états différenciés. Le tableau III.D4 (p. 160) résume les différences observées.

Nous constatons que le tassement a eu pour effet de modifier l'arrangement entre les mottes sur tous les sites mais n'a pas affecté l'état interne sur le site de Mons où l'on constate la plus faible différenciation entre les traitements.

Sur Mons, le deuxième tassement T2 a conduit à une réduction de l'espace poral structural plus grande que le premier tassement T1 puisque la densité apparente est la même pour une humidité supérieure. L'indice des vides structural correspondant à T1 est de 21% alors qu'il est de 16% sur T2.

La différence de calibre constatée après labour concerne donc bien les états les plus contrastés NT et T2. Sur T1 le compactage avant labour a été insuffisant pour que la différence perdure après labour.

Les écarts entre traitements des teneurs en delta et en mottes < 15 cm sont plus importants sur Baziège et La Jaillière que sur Palaiseau, où les états initiaux étaient moins différents que sur les premiers sites.

L'ensemble de ces résultats semble donc bien montrer l'interdépendance entre les états structuraux initiaux et finaux.

L'absence de différenciation entre NT et T1 sur Mons montre néanmoins dans certaines conditions d'état physique et de labour, et dans le cas d'états internes non Δ , la possibilité d'annuler par le labour des différences d'état initial portant sur l'arrangement entre les mottes.

Tableau III.D4 : Etat initial des parcelles

SITE/TRAITEMENT		ETAT INITIAL
BAZIEGE	NT	oΓ sur 80% de la surface;cΔ en L1;soit 20% de delta sur l'ensemble du profil;densité de la couche labourée:1.2 à 1.4 g/cm ³ à W=18.5 à 20%
	T	cΔ;densité:1.6 à 1.7 g/cm ³ à W=17.5 à 19.5%
LA JAILLIERE	NT	oΓ;densité:1.2 à 1.4 g/cm ³ à W=15 à 19%
	T	cΔ;densité:1.6 g/cm ³ à W=16 à 20%
MONS	NT	oΓ sous les rangs de maïs;cΔ en dehors; soit 62% de delta sur l'ensemble du profil; densité:1.2 à 1.5 sur 0-15 cm puis 1.5 g/cm ³ sur 15-27 cm à W=14%
	T1	c avec état interne mal caractérisé;densité de la couche labourée:1.5 g/cm ³ à W=9 à 14%
	T2	c avec état interne mal caractérisé:densité de la couche labourée:1.5 g/cm ³ à W=20%
PALAISEAU	NT	bΔ;densité de la couche labourée:1.3 g/cm ³ à W=29 à 23% sur 0-15 cm, 23% en-dessous
	T	cΔ;densité de la couche labourée:1.5g/cm ³ à 30 à 22% sur 0-15 cm, 22% en-dessous

Nous constatons par ailleurs dans le cas des traitements tassés correspondant à un état cΔ que la taille des mottes et la teneur en delta après labour sont plus faibles qu'à Grignon. Cet effet est vraisemblablement dû :

- à la différence de gamme d'humidité explorée : humidité plus faible à Baziège et La Jaillière qu'à Grignon ;
- à la différence de texture : teneur en argile plus faible à la Jaillière et Palaiseau qu'à Grignon.

La quantification et la comparaison de l'évolution entre sites implique néanmoins de pouvoir :

- comparer des systèmes équivalents ;
- s'assurer de l'identité entre sites ou de l'absence d'effet des autres facteurs.

Ces conditions n'étant pas correctement remplies sur un nombre de situations suffisantes pour fournir des éléments vraiment pertinents, nous nous sommes limité aux constatations précédentes.

3) Conclusion

Ces travaux d'enquêtes confirment donc le poids déterminant de l'état initial sur tous les sites dans la mesure où l'on admet qu'il n'y a pas de confusion d'effet avec la vitesse de labour. Nous n'avons en effet pas réussi dans tous les sites à nous abstraire des différences de vitesse entre traitements.

L'absence d'effet vitesse n'ayant été jusqu'à présent montré que sur le site de Grignon, il est indispensable de vérifier, dans d'autres conditions de texture et d'humidité pratiquées au labour, la validité de ce résultat.

II. VERIFICATION DE LA HIERARCHIE ETABLIE ENTRE LES FACTEURS ETAT STRUCTURAL ET VITESSE DE LABOUR DANS D'AUTRES CONDITIONS DE TEXTURE ET D'HUMIDITE

Pour vérifier la prédominance de l'effet de l'état initial sur la vitesse, nous avons choisi de nous placer dans des conditions favorisant l'extériorisation de l'effet vitesse.

Pour une même gamme d'état structural initial que celle enregistrée sur la parcelle de Grignon, l'effet de la vitesse est susceptible, de s'extérioriser plus :

- dans les cas où la résistance du sol est plus faible ; c'est-à-dire dans d'autres conditions de texture et d'humidité ;
- lorsque les vitesses sont plus importantes que celles pratiquées à Grignon ;
- lorsque des pièces complémentaires, elles-mêmes sensibles à un effet vitesse sur la fragmentation sont ajoutées au corps de charrue.

Les contrôles à réaliser pour éviter les confusions d'effets entre facteurs étant assez lourds, nous avons choisi de limiter notre étude au cas d'une texture moins argileuse, à une humidité au labour voisine de celle pratiquée à Grignon, en élargissant la gamme de vitesse et de profondeur explorée et en ajoutant des rasettes au corps de charrue.

1) Variations Introduites dans les conditions expérimentales et les méthodes de caractérisation utilisées

Nous avons choisi une parcelle sur le plateau de Palaiseau, en sol de limon ne dépassant pas 20% d'argile. Nous y avons effectué deux campagnes de labour successives : l'une au printemps (P89), l'autre au début de l'hiver suivant (H90). La teneur en argile dans les zones que nous avons observées était d'environ 16% d'argile lors de la première campagne et variait entre 15.5 et 17.5% d'argile lors de la seconde.

Dans chacun des cas nous avons compacté une partie de la parcelle espérant obtenir une variabilité importante des états structuraux avant labour.

A chaque période, le labour a eu lieu à une humidité moyenne voisine :

- 22% dans les zones tassées ;
- 23-24% dans les zones non tassées.

La charrue utilisée était la même dans les deux cas, soit une charrue tricorps 14 pouces avec des versoirs hélico-cylindriques et des rasettes sur les seconds et troisièmes corps.

Pour P89 nous avons cherché à couvrir une gamme de variation très large des vitesses de labour : 4 à 8 km/h.

Pour H90 nous avons cherché à étudier l'effet d'une variation de profondeur sur les résultats observés. Nous avons donc caractérisé l'état structural après labour dans le cas de deux profondeurs : 25 cm et 30 cm. Nous avons par contre limité les observations aux vitesses de labour susceptibles de réduire le plus l'écart entre les traitements, c'est-à-dire les plus rapides.

La méthode de caractérisation de l'état structural a été quelque peu différente de celle utilisée à Grignon.

Pour P89, nous n'avons pas utilisé la procédure photographique, mais nous avons décalqué, sur un transparent plaqué contre la face du profil, le contour des mottes pour caractériser l'état initial. Pour l'état final, nous avons reporté sur un papier gradué le contour des mottes.

Dans les deux cas, l'évaluation des surfaces a alors été faite à partir de la pesée de morceaux de papier de surfaces équivalentes aux surfaces à caractériser et de densité connue.

Pour H90, nous avons établi pour l'état initial une fiche de caractérisation voisine de celle préconisée par Manichon & Gautronneau (1987) et pour l'état après labour, nous avons utilisé la procédure photographique présentée au chapitre précédent.

Nous n'avons pas noté les différents niveaux de fissuration observés car une distinction selon ce critère ne semblait pas nécessaire.

2) Conditions d'exécution et résultats obtenus lors de la première campagne (P89)

a) Conditions

Les état initiaux créés diffèrent essentiellement par l'arrangement entre les mottes : dans la zone non tassée, l'état observé est b Δ dans l'horizon H5 (soit 65% de mottes Δ dans cet horizon) alors que dans la zone tassée l'état est c Δ (soit 100% de mottes Δ dans la couche labourée). La gamme explorée n'est donc pas la même qu'à Grignon.

Trois vitesses de labour ont été utilisées dans chaque traitement couvrant une gamme de 4 à 8 km/h.

Le labour a eu lieu à une même profondeur dans les deux traitements soit 27 cm d'après les enregistrements avec capteurs ultrasons (Cf. Chap. IV) qui sont légèrement faussés par l'état de la parcelle en surface (résidus de maïs) ; les mesures effectuées directement sur la muraille (25-26 cm) donnent des valeurs plus faibles. La masse labourée est donc supérieure dans la zone tassée.

Le tableau III.D5 fait état des conditions réalisées.

Tableau III.D5 : Conditions expérimentales du labour (Palaiseau, printemps 89)

TRAITEMENT	ETAT OBSERVE	VITESSE (km/h)	PROFONDEUR DE LABOUR (cm)	HUMIDITE 10-26 cm (%)	CODE
TASSE	c Δ	3.9	27	22.1	V2T
		5.2		22.2	V3T
		7.9		22.1	V4T
NON TASSE	B Δ	4.0	27	22.9	V2NT
		5.3		24.0	V3NT
		7.9		24.9	V4NT

Pour chaque situation nous avons caractérisé l'état après labour sur une surface équivalente à un passage de charrue.

b) Résultats

Nous avons utilisé les mêmes variables que sur les autres sites expérimentaux pour comparer les différentes situations en présence, c'est-à-dire celles dégagées par l'analyse des données de Grignon.

Le tableau III.D6 résume les résultats obtenus.

SITUATION	SURFACE MOTTES DELTA /TOTAL (%)	SURFACE MOTTES/MOTTES DELTA	
		(%) < 15 cm	(%) ≥ 30 cm
V2T	90	30	49
V3T	78	36	51
V4T	81	24	32
V2NT	60	41	0
V3NT	77	57	0
V4NT	69	55	0

Tableau III.D6

Quelle que soit la vitesse :

- la proportion de la surface en mottes delta occupée par les mottes de moins de 15 cm est inférieure dans le traitement tassé ;
- il n'y a pas de mottes de plus de 30 cm dans les traitements non tassés alors que ces mottes occupent au minimum 32% de la surface dans les traitements tassés.
- à vitesse lente (V2) et rapide (V4), la surface en mottes delta est plus importante dans le traitement tassé que dans le traitement non tassé.

Il n'a donc pas été possible d'annuler la différence d'état existant initialement alors qu'elle était plus faible qu'à Grignon.

L'effet de la vitesse semble néanmoins ne pas être négligeable.

Dans le traitement tassé, la teneur en delta diminue d'environ 10% à vitesse supérieure à 5 km/h. La surface occupée par les mottes de calibre supérieur à 30 cm diminue nettement lorsque la vitesse dépasse 7 km/h.

Dans le traitement NT, la proportion de surface occupée par les petits calibres (< 15 cm) augmente entre 4 et 5 km/h.

La teneur en delta semble, par contre, plus faible à la vitesse lente (V2NT). Ce résultat semble surprenant mais nous pouvons l'interpréter en fonction de la variabilité de l'état initial.

Pour améliorer la caractérisation de cet état, nous avons en effet réalisé, dans chaque traitement avant labour, un transect pénétrométrique en couvrant l'ensemble de la zone labourée.

L'humidité lors de ces mesures n'étant pas la même sur les deux traitements, nous nous interdisons de comparer les résistances pénétrométriques entre traitements mais nous pouvons par contre les comparer entre zones labourées aux différentes vitesses.

Nous avons réalisé cette comparaison sur la résistance moyenne à la pénétration de la couche labourée à chacun des passages.

Les résultats obtenus sont ceux du tableau III.D7.

TRAITEMENT	PRESSION ENREGISTREE PAR LE PENETROMETRE (MPa)	
V2T	1.88	($\sigma=0.89$)
V3T	1.96	($\sigma=0.79$)
V4T	2.21	($\sigma=1.08$)
V2NT	1.81(13)	($\sigma=0.76$)
V3NT	1.58	($\sigma=0.69$)
V4NT	1.44	($\sigma=0.75$)

Tableau III.D7

Dans le traitement tassé, la résistance pénétrométrique moyenne est supérieure à vitesse rapide, ce qui renforcerait l'importance de l'effet vitesse constaté.

Dans le traitement non tassé, il semble par contre que la résistance diminue de la situation labourée à vitesse lente à celle labourée à vitesse rapide. Dans ce cas, la diminution des calibres avec la vitesse s'explique, en fait, peut-être par cette diminution de résistance. Il y a probablement confusion d'effet entre l'état initial et la vitesse.

La variabilité de résistance repérée à l'intérieur des traitements est liée à l'histoire de la parcelle, en particulier aux passages des outils de récolte du maïs précédent. La confusion d'effet à laquelle nous avons abouti dans cette expérimentation nous a conduit aux choix méthodologiques faits sur le site de Grignon, qui visaient à diminuer la variabilité intratraitement : localisation des traitements en fonction d'une exploration préalable de la variabilité de l'état structural du sol et limitation de la taille de l'essai. Ce dernier choix impliquait de changer de matériel car celui utilisé sur Palaiseau ne pouvait s'adapter à des parcelles de faible taille.

(13) Cette valeur a été obtenue seulement avec les corps 1 et 3, car l'enregistrement correspondant à la zone prise par le corps 2 manque. Il faut néanmoins remarquer que le corps 1 correspond à la plus forte valeur de pression rencontrée sur le traitement, soit 2.31 MPa contre 1.94 pour la valeur la plus forte des corps correspondant aux autres situations (V3NT et V4NT).

3) Conditions d'exécution et résultats obtenus lors de la deuxième campagne (H90)

a) Conditions

L'état initial créé dans la zone tassée est c Δ avec quelques petites mottes libres en surface d'où une teneur initiale en delta de 94%.

De même qu'à la campagne précédente, l'état de la zone non tassée, hérité de l'histoire de la parcelle, est b Δ avec des cavités plus ou moins exprimées selon la position latérale sur la parcelle. La teneur en delta y est un peu plus forte qu'au printemps 89. De même que pour P89, la différence entre traitements est plus faible qu'à Grignon.

Nous avons résumé les conditions réalisées dans le tableau III.D8.

Nous avons réussi à couvrir la même gamme de vitesse entre les traitements. Par contre, nous n'avons pas pu nous affranchir d'une légère différence d'humidité entre traitements.

La profondeur de labour des situations observées varie, comme nous le cherchions, entre 25 et 31 cm.

b) Résultats

Nous avons utilisé les mêmes variables que précédemment pour caractériser les situations observées.

Les résultats sont consignés au tableau III.D9.

De même que l'année précédente, la teneur en delta est toujours plus importante dans le traitement tassé que le traitement non tassé. L'écart devient cependant pratiquement nul si le labour a lieu à vitesse rapide (V4) et à profondeur 30 cm dans le traitement tassé.

Dans le cas du labour à 25 cm, la surface occupée par les calibres de moins de 15 cm est plus forte dans le traitement non tassé mais la différence devient non significative à vitesse rapide.

Dans le cas du labour à 30 cm, il n'y a plus de différence entre les distributions des calibres des mottes.

Quel que soit le traitement, on constate par ailleurs qu'aucune motte n'a de calibre supérieur à 30 cm.

Il semblerait donc que la vitesse ait un effet non négligeable particulièrement à 30 cm. Le classement entre les traitements ne s'en trouve toutefois pas inversé.

La masse de terre labourée dans les deux traitements est différente pour une même profondeur mais voisine lorsqu'on compare le labour à 25 cm dans T et celui à 30 cm dans NT. La comparaison à même profondeur ou à même masse de terre ne change pas les conclusions car l'effet de la profondeur est faible.

Tableau III.D8 : Conditions expérimentales du labour (Palaiseau, hiver 90)

TRAITEMENT	ETAT OBSERVE	VITESSE (km/h)	PROFONDEUR DE LABOUR (cm)	HUMIDITE 10-26 cm (%)	CODE
TASSE	CΔ (94%Δ)	5.2	26	21.1	V3T25
		8.1	26	22.7	V4T25
		5.1	29	21.1	V3T30
		8.0	31	21.2	V4T30
NON TASSE	BΔ plus ou moins tassé (80%Δ)	5.3	25	23.3	V3NT25
		8.3	26	22.2	V4NT25
		5.2	30	23.7	V3NT30
		8.1	33	23.3	V4NT30

Tableau III.D9 : Surface occupée par les mottes delta (Palaiseau, 1990) - Répartition par calibre

SITUATION	SURFACE MOTTES DELTA/TOTAL (%)	SURFACE MOTTES DELTA	
		< 15cm/MOTTES DELTA (%)	≥ 30cm/MOTTES DELTA (%)
V3T25	45	70	0
V4T25	43	83	0
V3T30	51	91	0
V4T30	39	93	0
V3NT25	33	100	0
V4NT25	29	85	0
V3NT30	38	92	0
V4NT30	31	84	0

4) Discussion des résultats obtenus lors des deux campagnes

L'analyse précédente confirme la **prédominance du facteur état structural sur le facteur vitesse pour la détermination des états structuraux après labour.**

Lors des deux campagnes, il a en effet été impossible d'annuler la différence d'état structural initial, qui ne portait pourtant que sur l'arrangement entre les mottes, malgré les fortes vitesses pratiquées, l'emploi de rasettes, les variations de profondeur imposées.

L'effet de la vitesse ne semble néanmoins pas négligeable puisque la teneur en delta et les calibres diminuent avec la vitesse lors des deux campagnes. Les résultats de H90 laisseraient même supposer l'existence d'une interaction avec la profondeur puisque c'est à la profondeur 30 cm que cet effet s'extériorise le plus. Cet effet n'avait pas été constaté sur Grignon.

Trois hypothèses que nous n'avons pas testées peuvent être émises :

- la vitesse utilisée à Grignon était trop faible pour que l'effet de celle-ci s'exprime ; il faut noter qu'il avait été impossible de dépasser dans ce site la vitesse maximale utilisée compte-tenu du tracteur et de l'outil utilisés ;
- la texture moins argileuse de Palaiseau permet l'expression d'un effet vitesse sur Palaiseau qu'il aurait été impossible de percevoir à Grignon même à vitesse plus rapide ;
- le travail de la rasette a permis de diminuer les différences d'états structuraux en interaction avec la vitesse et la profondeur.

La comparaison des deux campagnes montre d'autre part pour tous les traitements une forte différence de teneur en delta entre P89 et H90 alors que l'état initial des traitements semblait comparable : la teneur en delta après labour est nettement supérieure pour P89. Les conditions du labour étant voisines, en particulier l'humidité, ce résultat est assez étonnant.

Il pourrait peut-être s'expliquer par une différence d'histoire climatique entre le tassement et le labour. Les figures III.D1 et III.D2 montrent en effet :

- un délai entre le tassement et le labour nettement plus important pour H90 que pour P89 ;
- un délai entre les observations d'état initial et le labour de 7 jours pour P89 contre 52 pour H90 ;
- une séquence de gels et pluies entre ces observations et le labour pour H90 ; il y a en particulier 30 jours de gel dont certains à -7°C lors de la campagne H90 ; un tel épisode climatique n'existe pas pour P89.

Le gel avant le labour aurait peut-être amorcé pour H90 une fissuration des blocs delta sans que nous l'ayons noté puisque nos observations d'état initial avaient eu lieu avant. Il pourrait être aussi à l'origine d'un gradient hydrique différent de celui de la première campagne pour une même humidité moyenne. Ce gradient risque d'être d'autant plus différent que le régime de précipitation n'est pas du tout le même lors des deux campagnes.

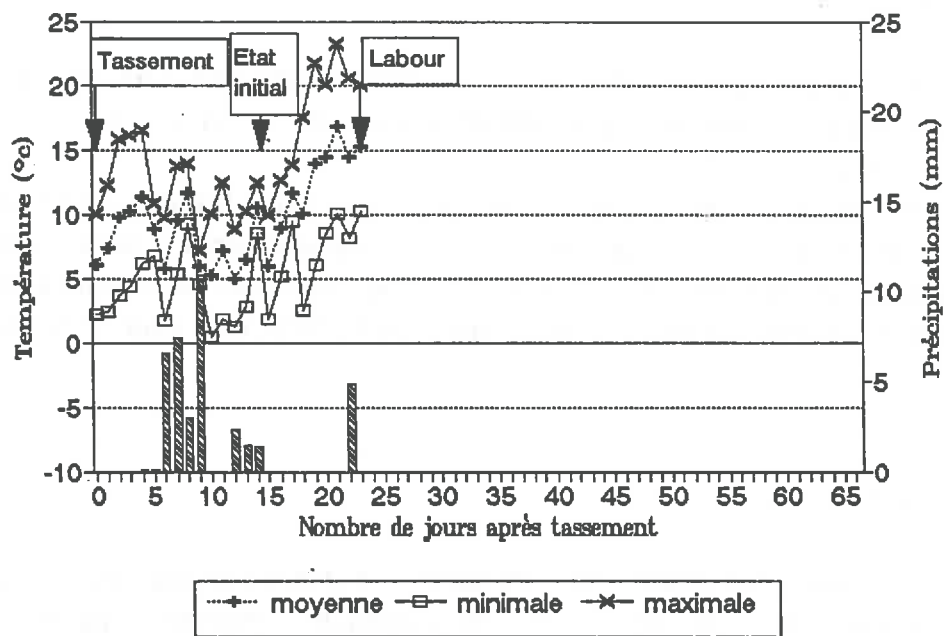


FIGURE III.D1 : Histoire climatique de la parcelle de Palaiseau entre le tassement et le labour du printemps 1989

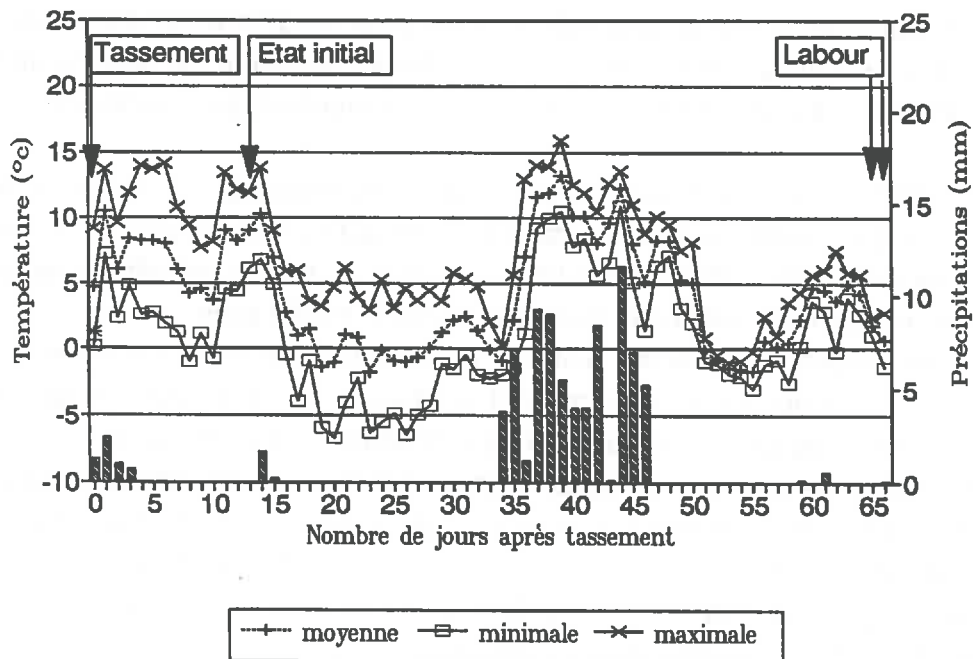


FIGURE III.D2 : Histoire climatique de la parcelle de Palaiseau entre le tassement et le labour de l'hiver 1990

5) Conclusion

Nous avons pu vérifier, dans les conditions expérimentales de Palaiseau, la validité de la hiérarchie établie sur le site de Grignon entre les facteurs état structural et vitesse de labour.

Nous avons aussi montré qu'il était possible, dans les conditions d'humidité explorées et avec l'équipement choisi, de réduire, par un labour à forte vitesse, l'écart obtenu après labour sur des parcelles à état structural initial contrasté. L'ampleur de cette réduction pourrait ne pas être indépendante de l'état hydrique de la parcelle lors du labour.

III. CONCLUSION

L'analyse que nous venons de faire dans une gamme assez large de conditions agricoles confirme, pour ces conditions, l'impossibilité d'annuler complètement l'effet d'un traitement dégradant la structure par un unique labour.

Le seul cas (Mons) où l'on a réussi à gommer une différence d'état initial correspond en effet à une faible dégradation (l'état interne des mottes demeure assez poreux) et des conditions au labour particulièrement favorables à la fragmentation d'après l'analyse bibliographique : humidité proche de la limite de retrait, texture limoneuse.

De plus, elle montre que, dans certaines conditions d'état initial, les réglages de la charrue, en particulier la vitesse, permettent de diminuer les différences d'état structural. Une identification plus exhaustive de ces conditions devrait permettre de déterminer les cas où une augmentation de la vitesse de labour dans les traitements tassés serait utile.

Cette identification nécessite des précautions méthodologiques assez contraignantes mais néanmoins nécessaires puisque, dans les sites autres que Grignon, où le contrôle des conditions expérimentales était plus difficile à réaliser, il nous a été difficile de quantifier la fragmentation réellement réalisée et comparer l'évolution entre sites.

La comparaison de systèmes avant et après labour différents pourra être assurée à l'avenir si l'on établit des modèles permettant le passage d'un système à l'autre : modèle de déport et de reprise du labour. Des travaux sont en cours dans ce domaine.

La nécessité de contrôler les facteurs pouvant modifier la fragmentation pour éviter les confusions d'effets rend néanmoins le nombre de situations observables par une même équipe relativement limité. Des choix sur les nouvelles conditions à étudier sont donc indispensables. Les résultats obtenus sur Baziège et La Jaillière militent pour une meilleure exploration des faibles humidités du domaine fragile.

L'augmentation de la vitesse dans les cas où elle pourrait être efficace, c'est-à-dire dans les traitements tassés, pose des problèmes de traction, qui conduisent souvent dans la pratique à avoir des vitesses plus faibles. Il est donc important de pouvoir relier les transformations observées aux efforts de traction qu'elles engendrent.

E. CONCLUSION

Les résultats présentés confirment, sur toute la gamme des situations offertes par les conditions expérimentales, l'effet prédominant de l'état initial sur l'état transformé.

La méthode de bilan utilisée a permis, moyennant des précautions quant au système étudié, de montrer que le labour affectait non seulement le volume global de l'horizon labouré, mais aussi le calibre et l'état de fissuration des mottes delta, dont l'importance ne varie pas globalement. Le volume global augmente positivement dans tous les traitements, particulièrement dans les traitements tassés (jusqu'à 50%).

- Dans les traitements tassés, le nombre de mottes de calibre supérieur à la largeur de prise de raie diminue alors que celui des mottes de moins de 25 cm augmente fortement, entraînant une augmentation du nombre total de mottes. Des fissures de deux niveaux et plus apparaissent sur les mottes de plus de 10 cm.

- Dans le traitement non tassé, le nombre total de mottes de plus de 2 cm a plutôt tendance à diminuer. La surface en mottes gamma et terre fine augmente conjointement. Des mottes delta apparaissent sous la roue de raie.

Grâce à la méthode utilisée, nous avons mis en évidence que les processus de transformation étaient dépendants de l'état initial du sol et peu de la vitesse. Nous avons alors émis des hypothèses sur les mécanismes en jeu : fissuration, division, érosion des mottes dans les traitements tassés, érosion et compactage dans les traitements non tassés.

Il est difficile d'annuler en une seule opération des conditions de sol dégradé mais nos résultats montrent que des possibilités d'action existent en terre limoneuse à humidité moyenne (située dans le domaine fragile).

Pour exploiter au mieux les possibilités d'action, il faudrait mieux caractériser les processus intermédiaires.

Nous avons donc cherché à étudier les variations de l'effort de traction en fonction des facteurs les plus déterminants de l'évolution, pour tester sa validité en tant qu'indicateur des mécanismes réels.

CHAPITRE IV :

**EFFET DE L'ETAT STRUCTURAL DU SOL
SUR L'EFFORT RESISTANT DE LA CHARRUE**

Nous avons montré au chapitre III que, dans les conditions d'humidité où l'on se trouvait et la gamme d'états et de réglages explorée, en particulier de vitesse utilisée, le labour n'avait pas annulé les différences d'états structuraux préexistantes, et ce, bien que sur les variables que nous avons étudiées, choisies selon des critères agronomiques, les variations d'état soient plus fortes dans les situations les plus tassées, c'est-à-dire celles où l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage est *a priori* le plus élevé : variations d'état interne des mottes (fissuration) et de calibre plus importantes dans les traitements tassés que dans les traitements non tassés. Les processus mécaniques intervenant au cours des opérations sont donc probablement différents entre traitements et cela doit avoir des répercussions sur l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage.

Pour aborder le problème mécanique qui consiste à étudier les relations entre cet effort, les conditions de sol, et les réglages de l'outil plusieurs approches sont possibles.

L'ensemble tracteur-charrue est en mouvement. Il est donc possible de relier le système des forces appliquées sur l'ensemble mécanique aux mouvements possibles de cet ensemble. Il s'agit d'une approche dynamique.

En tout point de l'espace le système de forces peut être représenté par un torseur défini par deux vecteurs : le vecteur résultant des forces appliquées, le vecteur moment du système.

Nous rappelons que le moment d'un vecteur par rapport à un point est un vecteur perpendiculaire au plan défini par le vecteur et le point et que l'intensité du moment correspond au produit de l'intensité du vecteur par la distance du point au vecteur.

Le principe fondamental de la dynamique s'exprime alors par l'égalité entre le torseur des forces extérieures au système et le torseur dynamique.

Si le système est en mouvement uniforme, le problème peut se ramener à celui d'un équilibre statique et l'on doit résoudre les équations d'équilibre du corps solide considéré : résultante des forces : nulle ; moment résultant des forces : nul en tout point.

Il faut alors pouvoir définir, sur toutes les facettes d'un volume élémentaire autour d'un point M, les composantes des contraintes exercées. Le vecteur contrainte se décompose en une contrainte normale et une contrainte tangentielle. Il existe en tout point trois plans privilégiés pour lesquels la contrainte est uniquement normale. L'état d'équilibre des contraintes dans un solide peut être variable en tout point et celles-ci sont donc des fonctions du point M considéré.

Sous l'action des forces exercées, le solide se déforme entraînant ou non une variation de volume. Cette déformation peut être représentée par une déformation angulaire et une déformation linéaire. Les lois de comportement dépendent alors du domaine de comportement considéré (Schlosser, 1983 ; Mc Kyes, 1985).

Une autre approche, utilisée en physique, consiste à étudier les transformations d'un système en relation avec sa capacité à fournir ou dissiper de l'énergie. On définit ainsi l'état d'énergie du système. La mécanique quantique nous permet de dire que cette énergie est quantifiée et que la valeur de l'énergie est une caractéristique de l'état physique dans lequel se trouve le système. Il y a conservation de l'énergie totale du système au cours d'une

transformation si l'on inclut dans le bilan d'énergie la quantité de chaleur reçue par celui-ci au cours de cette transformation. Pour passer d'un état d'énergie à un autre, il faut dépenser un certain travail. On définit alors le travail d'une force comme le produit scalaire entre les vecteurs force et déplacement.

Nous avons essayé d'aborder notre problème sous ces deux angles en cherchant :

- dans la première approche, à déterminer les lieux possibles d'action de l'état structural sur l'effort, sur la base d'un modèle très simplifié pour lequel on admet que l'ensemble des forces agissant sur un système se réduit à un seul vecteur résultant au point de contact considéré, mais pour lequel le point d'application des forces est mal défini ; notre propos n'a en effet pas pour objet de produire un modèle exhaustif, mais d'attirer l'attention des mécaniciens sur la prise en compte de l'état structural ; notre modèle s'inspire essentiellement de celui de Söhne (1956) et se limite au cas des ruptures du sol par cisaillement ; nous préciserons ultérieurement les limites de ce modèle et nous mentionnerons alors les approches postérieures pratiquées pour analyser les contraintes résultant du contact entre un volume de sol et un tel outil, en soulignant leurs limites et les raisons pour lesquelles nous ne les avons pas adoptées;

- dans la seconde approche, à identifier les postes énergétiques à prendre en compte et les facteurs susceptibles de modifier le bilan énergétique correspondant.

Nous confronterons alors cette analyse aux variations d'effort observées dans les conditions de nos expérimentations.

A. ETAT DES CONNAISSANCES ET ANALYSE DES FACTEURS MODIFIANT L'EFFORT DE TRACTION AU NIVEAU DE LA BARRE D'ATTELAGE

I. DECOMPOSITION DE L'EFFORT RESISTANT DE LA CHARRUE

Dans le cas d'un outil semi-porté, l'effort de traction développé au niveau de la barre d'attelage pour vaincre les forces résistantes de la charrue est incliné par rapport à l'horizontale. L'équilibre statique du système tracteur-outil implique l'existence d'un vecteur effort résistant de sens opposé au vecteur effort de traction et de même norme.

Celui-ci se décompose en deux vecteurs (14) : un effort vertical F_v et un effort horizontal F_h .

Le vecteur F_h s'oppose à l'avancement. Il dépend de la résistance du matériau à l'avancement et du poids de la charrue sur la roue de jauge. En effet, par report de charge le poids de la charrue est partiellement supporté par les roues arrières du tracteur. La fraction du poids de la charrue ainsi supportée est proportionnelle à la position relative du centre de gravité de la charrue par rapport à la roue de jauge et le point d'attelage. F_h est donc révélateur des interactions entre la masse de terre travaillée et la charrue, c'est pourquoi nous nous limiterons à l'étude de ce paramètre.

Le vecteur F_h , défini au niveau de la barre d'attelage, dépend :

(14) Par commodité d'écriture, nous n'utiliserons pas par la suite la notation vectorielle classique, c'est-à-dire que nous ne représenterons pas la flèche sur les vecteurs, mais nous préciserons les cas où il s'agit des vecteurs ou de leur norme.

- du vecteur effort résistant utile (15) F_x résultant des résistances au niveau des pièces travaillantes de la charrue, c'est-à-dire le coutre, le soc, le versoir et la rasette lorsqu'elle existe ; celle-ci étant un modèle réduit du corps de charrue, nous admettrons que son effort résistant se décompose de la même manière que celui du corps de charrue et nous limiterons l'étude à ce dernier ;

- du vecteur résultant des frottements sur les pièces d'appui F_p (contresep et talon) ;

- du vecteur moment résistant défini au point de contact entre le sol et la roue de jauge qui s'oppose au roulement de celle-ci R_j (16).

Le vecteur F_x résulte :

- des forces utiles résultant du découpage, du soulèvement, de l'avancement et du retournement de la bande de terre : leur résultante est F_{ch} , elle-même résultante de H , vecteur résultant des forces résistantes dans le sens d'avancement de la charrue et de S , vecteur résultant des forces résistantes latérales ;

- des forces parasites néanmoins nécessaires au fonctionnement de la charrue qui dépendent du vecteur résultant du frottement du contresep, du talon et du coutre sur la muraille, Q_f .

Pour chaque pièce d'appui, la norme du vecteur frottement est égal au produit du coefficient de frottement sol-métal μ par la norme du vecteur correspondant à la réaction du sol sur la pièce d'appui Q_i .

La norme du vecteur résistance au roulement sur la roue de jauge est égale au produit du coefficient de résistance au roulement de la roue de jauge σ par la norme du vecteur poids sur cette roue Q_w .

Nous allons analyser successivement ces composantes pour déterminer leurs facteurs de variation et les lieux où l'état structural du sol est susceptible de jouer un rôle pour une humidité donnée.

II. FROTTEMENT SUR LES PIÈCES D'APPUI - RESISTANCE AU NIVEAU DE LA ROUE DE JAUGE - FORCES PARASITES

D'après Verma (1989), les pièces d'appui de la charrue peuvent être considérées comme des oscillateurs harmoniques amortis. La modélisation des mouvements de ces pièces est assez complexe et reste en cours d'étude pour un ensemble tracteur-outil. Verma simplifie le phénomène en considérant les pièces comme des ressorts linéaires et nous nous limiterons à cette simplification.

Les normes des forces de pression Q_i et Q_w exercées sur le sol par les pièces d'appui entraînent leur enfoncement sur une profondeur z . Si l'on définit la rigidité du sol k comme le

(15) Nous appelons F_x l'effort résistant utile, car il correspond à l'effort résistant au niveau des pièces qui effectuent le travail du sol.

(16) D'après Verma, 1989.

rapport entre la pression exercée par une plaque et l'enfoncement constaté on peut déterminer Q_i ou Q_w (normes des vecteurs) :

Verma montre que :

- pour un talon ou un contresep :

* $Q_i = (k * b * z^2) / (2 \sin \alpha)$; avec b égal à la largeur de la pièce d'appui c'est-à-dire le talon ou le contresep, α égal à l'angle entre la pièce et l'horizontale ;

- pour la roue de jauge :

* $Q_w = (k * b/2) * ((z^5/D))^{1/2}$; avec b égal à la largeur de la pièce d'appui c'est-à-dire la roue, D égal à son diamètre.

D'après ces expressions, l'intensité des forces de frottement sur les pièces d'appui et du moment résistant sur la roue de jauge qui ne dépendent que de Q_i , Q_w , μ et σ ne sont donc fonction que :

- des caractéristiques de la charrue utilisée ;

- de la rigidité du sol et de l'enfoncement au niveau du fond de raie pour le talon et le contresep ; ceux-ci dépendent de l'humidité, de la texture du sol mais peuvent aussi varier quelque peu avec l'état structural dans la mesure où la profondeur de labour est inférieure au fond du labour le plus ancien et les pièces d'appui reposent sur des couches à états différents ; l'enfoncement z doit alors être supérieur lorsque l'état structural est plus fragmentaire car il est plus sensible au tassement mais la rigidité k doit être plus faible ; Q_i augmente cependant plus rapidement avec z qu'avec k , aussi Q_i et le frottement induit doivent-ils être un peu supérieurs lorsque l'état est non tassé ;

- de la rigidité du sol et de l'enfoncement de la roue de jauge sur le guérêt qui peuvent de même dépendre de l'état structural ;

- du coefficient de frottement sol-métal μ sur le fond de raie qui doit être peu différent d'un état à l'autre dans la mesure où le passage préalable du soc a lissé celui-ci ; il varie par contre avec l'humidité et la texture du sol, en particulier quand le fond de raie est sous le fond de A_p ;

- du coefficient de résistance au roulement σ qui dépend du poids sur la roue, des caractéristiques du pneumatique, et du cône index du sol (Verma, 1989 ; Hong, 1990) ; le cône index est un indice très global obtenu expérimentalement et sensé traduire les propriétés mécaniques du sol ; il correspond à la résistance moyenne du sol obtenu par l'enfoncement à vitesse constante sur une épaisseur donnée d'une pointe de cône normalisé d'angle 30° ; le coefficient σ dépend donc essentiellement de l'ensemble tracteur-outil utilisé et de l'humidité du sol mais peut augmenter avec le nombre de points de contacts entre sol et roue, donc probablement avec le tassement en surface.

Par ailleurs, dans la mesure où, quel que soit le réglage, les frottements contre la muraille concernent toute la hauteur du contresep, du talon et du coutre, Q_f (norme du vecteur) ne dépend que :

- du coefficient de frottement sol-métal μ entre le contresep ou le talon ou le coutre, et la muraille ; ce coefficient doit être un peu plus faible lorsque l'état initial est plus

fragmentaire car la découpe de la muraille est moins nette et le nombre de contacts entre le métal et la terre est plus faible ;

- de la force latérale de pression contre la muraille S.

La formule s'écrit donc :

$$Q_f = S / (\cos(\tan^{-1}(\mu))),$$

S n'est pas indépendant des réglages de la charrue comme nous le verrons au paragraphe suivant. Nous supposons néanmoins que les conséquences pour Q_f sont faibles et que cette force dépend peu des réglages. Elle diminue probablement légèrement en sol fragmentaire.

En conclusion, d'après cette analyse simplificatrice, les effets de l'état structural sur Q_i , Q_w et Q_f :

- iraient dans un état non tassé :
 - * dans le sens d'une augmentation de la résistance au niveau des appuis en raison des possibilités d'enfoncement ;
 - * dans le sens d'une diminution des frottements au niveau de la muraille ;
- seraient équivalents, quel que soit le réglage de la charrue dans la couche labourée.

Nous pouvons penser que l'effet global de l'état structural sur F_p et R_j est faible car certains des effets précédents se compensent.

Nous ferons donc l'hypothèse que, dans une texture et à une humidité donnée, les variations de la résultante de ces composantes sont faibles. Cette hypothèse n'est manifestement acceptable que si l'amplitude du dérèglement (non-respect des règles d'aplomb, talonnage et dévers) de la charrue est faible. Au-delà d'un seuil de dérèglement l'effort lié aux phénomènes de frottements doit en effet augmenter nettement.

III. RESULTANTE DANS LE PLAN HORIZONTAL DES EFFORTS REELLEMENT UTILES F_{ch}

1) Résistance au niveau du coute

La présence d'un coute diminue la résistance à la coupe pour l'ensemble soc + versoir. Elle contribue pour 28% à l'effort horizontal total dans le cas d'un coute circulaire (Girma, 1989-a), pour 10 à 15% dans le cas de coutres droits (Clyde, 1944 ; Tanner & Dean, 1963 d'après Verma, 1989 ; O'Callaghan & Mc Coy, 1965).

Les charrues que nous avons utilisées étaient équipées de coutres droits (ailerons coutres).

L'effort utile correspondant dépend de la résistance du sol à la coupe et donc de son humidité et de sa texture mais *a priori* pas des réglages de la charrue. Nous supputons par contre un effet de l'état structural car les travaux de De Leon (1991) montrent que la résistance à l'état sec des mottes delta est plus importante que celle des mottes gamma et l'on peut penser que ce classement entre les états structuraux ne s'inverse pas quand l'humidité augmente.

D'autre part, il est probable que l'arrangement entre les mottes modifie l'action du coutre. Si celui-ci ne fait que les écarter sur son passage, la résistance est différente de celle d'une coupe réelle. On ne tient pas compte de la végétation car, dans ce travail, nous avons seulement étudié des sols déchaumés avec pailles broyées.

2) Résistance au niveau du soc et du versoir

Les socs et versoirs sont les pièces qui contribuent le plus à l'effort résistant de la charrue. En effet, les travaux de Girma (1989-a et b), qui consistent à mesurer à l'aide de jauges de contraintes les efforts en différents points de la charrue, montrent en sol argileux et sableux que 63 à 72% de la somme des efforts horizontaux proviennent de la pointe du soc, 16 à 26% du versoir, alors que seulement 6 à 9% et 5 à 10% proviennent respectivement de la lame du soc et du contresep.

a) Justification et limites du modèle adopté

Pour déterminer l'effort résistant utile associé à ces pièces dans le plan horizontal, nous avons supposé le milieu homogène et isotrope en utilisant un modèle issu de la mécanique classique qui repose sur l'estimation du volume de sol perturbé mais ne se préoccupe pas des changements de volume poral qui peuvent être associés aux opérations de travail du sol. Ceux-ci sont pris en compte par la théorie du stade critique (Hettiaratchi & O'Callaghan, 1980 ; Hettiaratchi, 1988), mais les travaux dans ce domaine ne permettent pas de prédire la contrainte résultante au niveau de la charrue.

Le choix du modèle utilisé s'est fait sur la base d'une analyse bibliographique.

La charrue étant un outil asymétrique et de courbure complexe, les travaux sur la modélisation des contraintes exercées sur le sol par cet outil sont limités. O'Callaghan et Mc Coy (1965) ont cherché à tenir compte de cette forme particulière en calculant les accélérations et les forces exercées par la charrue sur le versoir. Mais le nombre de données expérimentales ayant servi à valider le modèle est très faible. On doit donc se reporter aux travaux sur dents étroites et larges (pièces symétriques).

Ceux-ci s'inspirent de la théorie du mur de soutènement utilisée en génie civil pour analyser la poussée et la butée des terres (Mc Kyes, 1985) qui prend en compte le régime des contraintes dans le volume de sol considéré et calcule les forces s'exerçant sur le mur par résolution des équations différentielles partielles de l'équilibre. Il faut distinguer deux zones dans le volume de sol perturbé : la zone passive de Rankine où les contraintes sont principalement verticales et horizontales (théorie de Rankine (1860), citée par Schlosser, 1983 ; Hettiaratchi, 1988)), et la zone adjacente au plan de l'outil qui est une zone de cisaillement complexe formée par une spirale logarithmique. Son importance dépend de l'outil. La méthode de Sokolovski (1960, citée par Schlosser, 1983 ; Mc Kyes, 1985 ; Hettiaratchi, 1988) permet de donner une solution numérique aux équations.

Des solutions plus ou moins simples sont proposées (Mc Kyes, 1985) suivant les hypothèses que l'on peut faire sur l'inclinaison, la rugosité de la surface et l'importance du poids de l'outil.

Une analyse en deux dimensions permet d'envisager le cas des outils à dents larges, c'est-à-dire pour lesquels le rapport profondeur/largeur tend vers 0. Pour les outils à dents étroites le mouvement de la terre se fait aussi sur les côtés ce qui augmente *a priori* la force de traction (Payne, 1956). Il faut alors adopter une analyse en trois dimensions.

Certains travaux (Hettiaratchi & Reece, 1967 ; Godwin & Spoor, 1977 ; Mc Kyes & Ali, 1977 ; Grisso *et al.*, 1980 cités par Mc Kyes, 1985 ; Mc Kyes & Desir, 1984) proposent d'ajouter à la force préalablement calculée la force résultant des contraintes dans ces parties adjacentes dont le calcul dépend des hypothèses que l'on fait sur ces mouvements de côté. Ces modèles s'avèrent performants pour des dents dont le rapport profondeur/largeur dépasse 1.

Le corps de charrue, assimilé à une dent de largeur et profondeur équivalentes, se trouve à la limite des domaines de validité des deux modèles en deux et trois dimensions.

Tous les modèles proposés permettent néanmoins d'écrire l'intensité de la force de traction sous la forme de l'équation universelle de la terre en mouvement proposée par Reece (1965, cité par Mc Kyes, 1985) et améliorée par Hettiaratchi (1969, 1974, cités par Mc Kyes, 1985 et Mc Kyes, 1989).

Celle-ci fait intervenir des termes sans dimensions dont la valeur dépend de la résolution des équations différentielles. Ce sont des fonctions de :

- l'angle de frottement interne du sol ;
- de l'angle d'entrure de l'outil ;
- de l'angle de frottement sol-métal ;
- du rapport profondeur/largeur dans le cas de dents étroites.

L'inconvénient de ces modèles est qu'ils ne prennent pas en compte l'effet de la vitesse d'avancement du tracteur sur l'effort de traction de la charrue montré pourtant par de nombreux auteurs (Randolph & Reed, 1938 ; Söhne, 1956).

Fielke & Riley (1991) ont appliqué cette équation au cas d'un chisel. Ils montrent que l'effort réel est sous-estimé car l'effet de la vitesse d'avancement n'est pas pris en compte. De plus, le modèle décrit bien les variations de l'effort en fonction de la largeur de prise de raie mais pas celles en fonction de l'angle d'entrure.

Mc Kyes (1985) propose d'ajouter à ces modèles un terme lié aux forces d'inertie qui est donc fonction de la vitesse.

Les modèles cités sont complexes et nous avons montré qu'il était difficile de choisir les solutions adéquates pour la charrue. Nous avons donc préféré nous inspirer des travaux simplificateurs de Söhne (1956) repris par Verma (1989) sur un soc en les adaptant au système soc + versoir. Nous considérons la bande de labour comme un solide de masse m reposant sur l'ensemble soc + versoir, système dont l'équilibre des forces peut être analysé au niveau du barycentre de la bande.

Le modèle de Söhne (1956) considère le système en deux dimensions. Il repose sur l'apparition de plans de cisaillement en avant du soc et le calcul des forces de cisaillement correspondantes selon la loi de Coulomb (1776). Il ne fait donc pas intervenir les contraintes intérieures à la bande de terre et n'est applicable que dans le cas d'une déformation par rupture selon des plans de cisaillement c'est-à-dire en domaine solide ou fragile. Il ne

convient plus dans le cas d'une déformation plastique. Les facteurs déterminant les limites de ces domaines ont été analysés au chapitre I. Ce modèle ne permet pas d'évaluer la résistance réelle à l'outil car il ne prend pas en compte les fluctuations des valeurs de cohésion alors que le sol est en réalité non homogène mais il permet d'évaluer les parts affectées aux différents facteurs extérieurs à la bande de terre. Söhne (1956) montre qu'il s'avère adapté pour décrire l'effort de traction dans le cas d'un sable à faible humidité.

Nous préciserons au cours de l'analyse du modèle les hypothèses que nous avons été amenée à faire.

Nous vérifierons par la suite si l'expression de l'effort obtenue avec notre modèle correspond à l'expression générale proposée par l'équation universelle de la terre en mouvement à laquelle on ajoute un terme d'inertie (Mc Kyes, 1985).

b) Analyse des forces au niveau du soc et du versoir

La figure IV.A1 montre les forces appliquées au soc et au versoir. Nous considérons la résultante des forces au point de contact entre la projection orthogonale du barycentre sur l'ensemble soc + versoir et celui-ci.

Nous distinguons :

- le vecteur effort de traction utile qui se décompose en :
 - * une composante horizontale H ;
 - * une composante latérale S ;
 - * une composante verticale V ;
- le vecteur réaction du sol à la surface qui se décompose en :
 - * une réaction normale à la surface au point considéré R_n ;
 - * une réaction tangentielle ou force de frottement R_t (dont l'intensité vaut $R_t = \mu \cdot R_n$) au même point, qui s'oppose à la vitesse d'avancement de la bande par rapport à l'ensemble soc+versoir ;
- le vecteur résistance pure à la coupe : R_c .

Nous nous plaçons dans un référentiel fixe (O, X, Y, Z) extérieur au système soc + versoir. Nous définissons les vecteurs vitesses suivants :

- v_e , vitesse relative de la bande de terre par rapport au système soc + versoir ;
- v_b , vitesse de la bande par rapport à notre référentiel ;
- v_t , vitesse d'entraînement du système soc + versoir qui est en fait la vitesse d'avancement de la charrue (donc du tracteur) par rapport à ce référentiel, dont la direction correspond à l'axe X .

La vitesse v_e peut s'exprimer comme la différence vectorielle entre v_b et v_t .

H et S sont les seules composantes de l'effort qui nous intéressent. Soit :

- θ : l'angle entre R_t et l'axe X ;
- ψ : l'angle entre R_t et l'axe Y ;
- ϵ : l'angle entre v_b et l'axe X ;

θ, ψ sont aussi les angles entre v_e et les axes X et Y car v_e et R_t sont des vecteurs de même direction et de signes opposés.

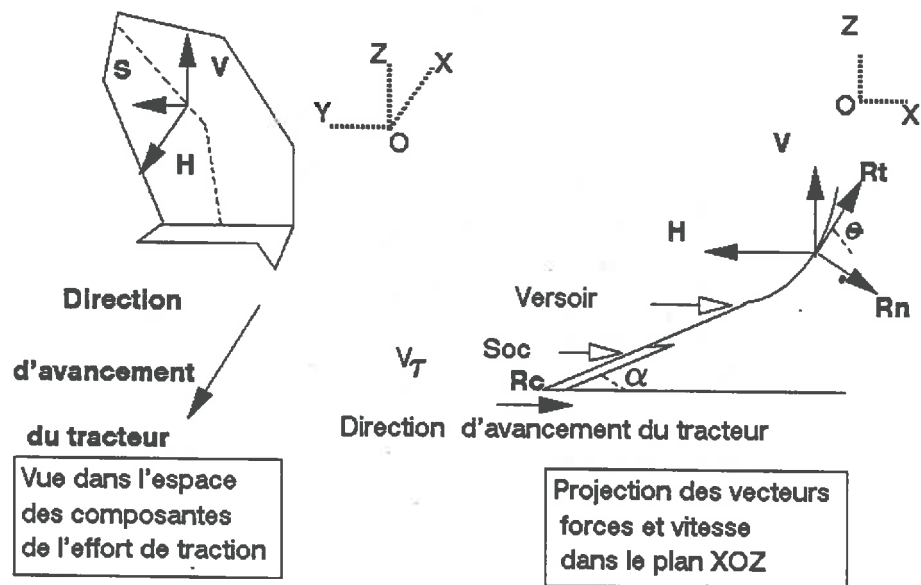


FIGURE IV.A1 : Système soc + versoir (forces appliquées et vitesse)

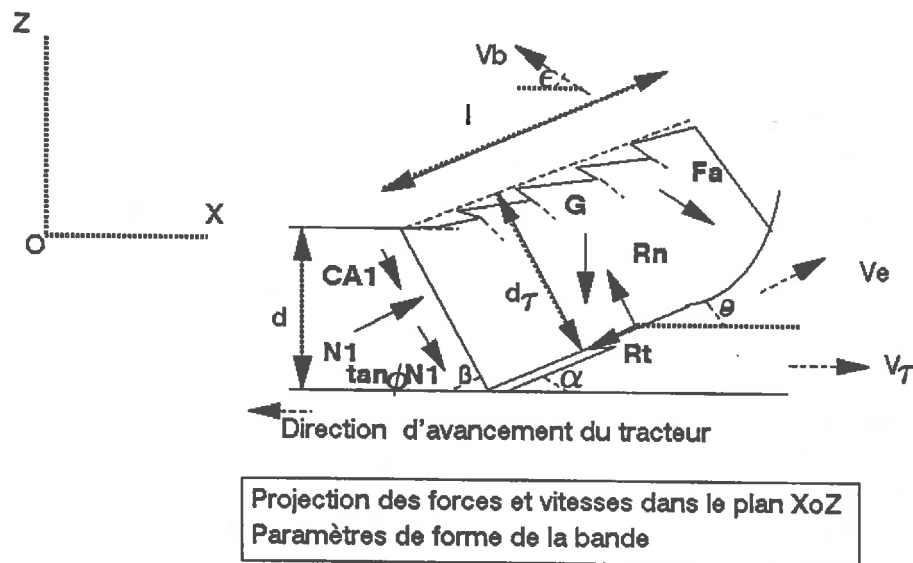


FIGURE IV.A2 : Système bande de labour (forces appliquées, vitesses et paramètres de forme)

La vitesse v_b a une direction correspondant au plan de cisaillement de la terre au point considéré. Celle-ci dépend de la direction des plans de cisaillement en avant du soc par rapport à l'horizontale (avant montée de la terre sur le système soc + versoir), de l'angle d'entrure du soc, de l'angle entre le soc et la tangente au versoir au point considéré c'est-à-dire de la forme du versoir.

Les angles ne dépendent donc que :

- des caractéristiques du soc et du versoir : angle d'entrure du soc α et forme du versoir ;
- de l'angle de cisaillement β .

D'après la représentation de Mohr utilisée en mécanique classique des matériaux, β peut s'exprimer en fonction de l'angle de frottement interne ϕ sachant que le plan de cisaillement est orienté de $\pi/2 - \phi$ par rapport à la contrainte principale : $\beta = 1/2(\pi/2 - \phi)$ (trouvé par une autre méthode par Coulomb, 1776). Cet angle est donc susceptible de varier non seulement avec la texture du sol mais aussi avec l'état structural du sol.

Comme le tracteur avance à vitesse constante, nous pouvons écrire les équations d'équilibre du système en mouvement uniforme.

Par projection sur les axes OX et OY nous obtenons les égalités suivantes :

$$H = R_n \cdot \sin(\theta) + \mu \cdot R_n \cdot \cos(\theta) + R_c ;$$

$$S = R_n \cdot \sin(\psi) + \mu \cdot R_n \cdot \cos(\psi).$$

D'après Söhne (1956), la résistance à la coupe R_c est faible par rapport aux autres forces sauf lorsque racines ou cailloux sont nombreux ce qui n'est pas le cas dans les sites où nous avons travaillé. Nous négligerons donc cette résistance et admettrons que :

$$H = R_n \cdot \sin(\theta) + \mu \cdot R_n \cdot \cos(\theta)$$

Pour un même outil, les deux composantes H et S augmentent avec R_n et μ .

Il convient donc de caractériser la norme du vecteur R_n pour étudier les déterminants de l'effort résistant.

c) Analyse des forces extérieures au niveau de la bande de terre

Si l'on considère le système bande de labour, les vecteurs résultants des forces qui lui sont appliquées sont, comme le montre la figure IV.A2 :

- le vecteur poids G de la bande ;
- le vecteur résistance normale R_n ;
- le vecteur résistance normale sur la face avant N_1 ;
- le vecteur résultant des contraintes de cisaillement que l'on peut exprimer par $C \cdot A_1$ et $\tan(\phi) \cdot N_1$ selon la loi de Coulomb (nous avons précédemment mentionné les limites de cette approche) avec :

C : cohésion du sol ;

A1 : aire de cisaillement ;

ϕ : angle de frottement interne ;

- le vecteur force d'inertie de la bande de terre F_a lié à l'accélération de la bande sur le soc et le versoir ; cette accélération a pour direction celle de la vitesse v_b ;

- la résistance tangentielle $R_t = \mu * R_n$.

Nous rappelons que nous considérons l'ensemble de la terre située sur le soc et le versoir, alors que nos prédécesseurs (Söhne 1956 ; Verma, 1989) ne considéraient que celle située sur le soc.

Par projection verticale et horizontale nous obtenons les équations d'équilibre suivantes :

(1) : Projection verticale :

$$-G + R_n \cos(\theta) - \mu R_n \sin(\theta) + N_1 \cos(\beta) - N_1 \tan(\phi) \sin(\beta) - C A_1 \sin(\beta) - F_a \sin(\epsilon) = 0$$

(2) : projection horizontale :

$$-R_n \sin(\theta) - \mu R_n \cos(\theta) + N_1 \sin(\beta) + N_1 \tan(\phi) \cos(\beta) + C A_1 \cos(\beta) + F_a \cos(\epsilon) = 0.$$

En résolvant le système précédent de deux équations à deux inconnues R_n et N_1 , nous pouvons exprimer les normes des vecteurs R_n et N_1 en fonction de celles de G , $C A_1$, F_a , et des angles θ , ϵ , et ϕ (sachant que β dépend de ϕ) et en déduire H .

$$H = (G + C A_1 (z_2 \cos(\beta) + \sin(\beta)) + F_a (z_2 \cos(\epsilon) + \sin(\epsilon))) / (z_1 + z_2);$$

$$z_1 = (\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta));$$

$$z_2 = (\cos(\beta) - \tan(\phi) \sin(\beta)) / (\sin(\beta) + \tan(\phi) \cos(\beta)).$$

Par ailleurs les normes de G et F_a peuvent s'exprimer en fonction de la masse sur le versoir m :

$$G = m * g ;$$

$$F_a = m * (dv_b/dt).$$

Nous montrons alors sous l'hypothèse d'une accélération constante (Annexe IV.A1) que :

$$F_a = (m * v_\tau * \sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon)) / t$$

Ces expressions font ressortir les paramètres dont dépend H et donc F_{ch} à savoir m , $C A_1$, v_τ , μ , θ , ϵ , et ϕ . Leur analyse va nous permettre d'émettre des hypothèses sur les

facteurs dont dépend l'effort résistant utile et en particulier sur l'effet de l'état structural du sol sur l'effort.

IV. HYPOTHESES SUR LES FACTEURS MODIFIANT L'EFFORT UTILE

1) Facteurs susceptibles de modifier l'effort utile

Nous avons montré au paragraphe précédent que la norme du vecteur F_{ch} , résultante horizontale des efforts utiles dépend pour un même outil :

- du frottement sol-métal μ ;
- de la masse de terre sur le soc et le versoir m ;
- des caractéristiques de cisaillement du sol C , A_1 et ϕ ;
- de la vitesse d'avancement du tracteur v_T .

L'état structural du sol est susceptible de modifier les trois premières catégories de paramètres.

Le second paramètre n'est affecté que dans la mesure où :

- pour une même trajectoire du barycentre de la bande de terre, il y a des pertes de matière au cours du trajet sur le versoir et celles-ci ne sont pas les mêmes suivant l'état structural ; ce phénomène de perte doit dépendre de la forme du versoir en interaction avec l'état structural ; en effet, dans les cas où la largeur du versoir est, en un point de la trajectoire de la bande, inférieure à la largeur de la bande, certaines particules libres risquent de choir en dehors du versoir lorsque l'état est fragmentaire ; en état continu, la liaison entre les particules est par contre plus forte et il n'y a pas de perte de matière mais modification de la trajectoire finale car l'équilibre des forces n'est plus le même : pour une même masse de terre, le frottement est réduit car la surface de contact entre le versoir et la bande est plus faible ; le phénomène doit être plus important pour les versoirs hélicoïdaux que pour les versoirs universels et cylindriques en raison des angles de courbure des premiers mais nous supposons qu'il est de toute façon assez faible ; nous le négligerons d'autant plus que nous n'avons pas travaillé avec des versoirs hélicoïdaux ;

- la trajectoire du barycentre en absence de perte de matière est modifiée par l'état structural ; la plus grande masse de terre que peut supporter le système soc + versoir est en effet fonction de la surface du système balayée par la bande ; Richey *et al.* (1989) ont développé un modèle mathématique en trois dimensions pour décrire la surface de l'ensemble soc+charrue et cherché à prédire l'effort de traction sur la base de la trajectoire qui en résulte ; leur modèle est un bon prédicteur de l'effort total mais il ne permet pas de prédire correctement la part de l'effort vertical et celle de l'effort horizontal, aussi adopterons-nous une démarche plus simple.

Cette masse de terre est maximale pour une section travaillée donnée lorsque celle-ci parcourt l'ensemble du versoir. Nous pouvons alors admettre que la longueur de la bande sur le système soc + versoir est à peu près égale à la plus grande abscisse curviligne (L_1)

entre, le milieu de la largeur de la section travaillée sur le tranchant du soc, et l'extrémité du versoir.

Elle peut être plus courte suivant les forces extérieures appliquées à la bande. Il convient donc de déterminer les facteurs pouvant la réduire.

2) Facteurs susceptibles de modifier la trajectoire de la bande de terre sur le versoir

Sur la base d'une description géométrique de la tranche de sol (Fig.IV.A2), nous pouvons évaluer la masse de sol à :

$$m = \gamma * b * d_{\tau} * l ;$$

avec :

γ = masse volumique du sol humide (il faut en effet comptabiliser non seulement la masse de terre sèche mais aussi la masse d'eau) ;

b = largeur de la section travaillée ;

d_{τ} = hauteur de la bande de terre = $d * \sin(\alpha + \beta) / \sin(\beta)$ avec :

. d = profondeur de labour ;

. l = longueur de la bande de terre.

Nous montrons par ailleurs (Annexe IV.A1) que :

$$F_a = \gamma * b * d_{\tau} * v_{\tau}^2 \sin(\theta) / \sin(\theta + \epsilon)$$

En combinant les équations (1) et (2) nous exprimons alors G et donc la longueur l en fonction de N_1 , C , v_{τ} , γ , b , d et de trois fonctions H_i des paramètres θ , ϵ , ϕ , μ :

$$l = N_1 * H_1(\theta, \mu, \phi) / (\gamma * b * d_{\tau}) + C * H_2(\theta, \mu, \phi) / (\gamma * \sin(\beta)) + v_{\tau}^2 * H_3(\theta, \mu, \epsilon)$$

Les fonctions H_i sont des fonctions décroissantes de μ si les angles θ , ϵ , et β appartiennent à l'intervalle $[0, \pi/2]$ ce qui est plausible.

Elles sont toutes positives dans tous les cas si :

$$(\cos(\theta) - \mu * \sin(\theta)) / (\sin(\theta) + \mu * \cos(\theta)) \geq \tan(\beta).$$

Pour que H_1 soit positive, il suffit que θ appartienne à l'intervalle $[0, \pi/4]$.

Pour une même valeur de N_1 , (effort sur la face avant de la bande de terre) nous constatons que :

- la longueur l :

* augmente quand :

. le carré de la vitesse v_{τ} augmente ;

. le rapport C/γ augmente ;

* diminue quand :

. la masse volumique γ augmente ;

. le produit $b * d_{\tau}$ qui dépend lui-même de la section travaillée $b * d$ augmente.

- il existe une valeur minimale de l pour un outil, une vitesse et un état donné du sol, qui correspond à :

$$l_0 = C * H_2(\theta, \mu, \phi) / (\gamma * \sin(\beta)) + v_{\tau}^2 * H_3(\theta, \mu, \epsilon)$$

- il existe une vitesse minimale pour laquelle l atteint la valeur L_1 correspondant à la trajectoire maximale ;

- cette vitesse minimale est plus faible pour un outil donné lorsque le frottement sol-métal diminue et lorsque la cohésion augmente pour une même densité du sol et une même section travaillée.

Il apparaît donc en conclusion :

- l'existence, pour un état donné du sol, d'une vitesse minimale pour atteindre L_1 ; ceci est en accord avec les travaux de Mesri (1982) selon lesquels la montée de la terre sur le versoir est supérieure lorsque la vitesse augmente ; cette vitesse minimale est fonction du frottement sol-métal et de la cohésion du sol pour une même densité du sol et une même section travaillée ;

- une diminution de la longueur l vers une valeur asymptotique l_0 lorsque la profondeur de labour augmente pour une largeur travaillée donnée ;

- une dépendance de cette valeur l_0 vis-à-vis des caractéristiques de cisaillement et du frottement sol-métal donc probablement de la texture et de l'état structural du sol.

Si l'on suppose que le frottement sol-métal varie peu en fonction de l'état structural, lorsque la vitesse est faible, la trajectoire de la bande de terre risque d'être plus courte lorsque, pour une même densité, le sol correspond à un état plus fragmentaire.

3) Conséquences pour l'analyse de l'effort

L'analyse précédente nous permet de réexprimer la composante sur OX de l'effort résistant utile H fonction de la profondeur et de la vitesse pour une charrue donnée.

Si nous faisons l'hypothèse que la vitesse du tracteur est suffisante pour que l soit égal à L_1 à la profondeur considérée, le modèle utilisé nous donne pour norme du vecteur H sachant que $A_1 = b * d / \sin(\beta)$:

$$H=[(\gamma \cdot b \cdot d \cdot L_1 \cdot \sin(\alpha+\beta)/\sin(\beta))+(C \cdot b \cdot d \cdot (z_2 \cdot \cos(\beta)+\sin(\beta))/\sin(\beta))+(\gamma \cdot b \cdot d \cdot v_t^2 \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha+\beta) \cdot (z_2 \cdot \cos(\epsilon)+\sin(\epsilon))/(\sin(\alpha) \cdot \sin(\theta+\epsilon)))]/(z_1+z_2)$$

z_1 et z_2 étant les paramètres décrits au § III.

Or, L_1 est une fonction de d , la profondeur de labour. En effet, Söhne (1956) a modélisé la longueur de la bande dans le cas d'un soc par une fonction linéaire de la profondeur :

$$l_1 = l_s + d \cdot (\cos(\alpha+\beta) + \sin(\alpha+\beta) \cdot \tan(\alpha)) / (2 \cdot \sin(\beta))$$

avec l_s égal à la longueur transversale du soc.

Nous pouvons décomposer L_1 en cette longueur sur le soc l_1 et une longueur l_2 sur le versoir, aussi nous pouvons penser que L_1 est une fonction linéaire de d .

Sous ces hypothèses l'effort H est une fonction polynôme du second degré de la profondeur et de la vitesse.

Il est alors probable qu'il en est de même pour l'effort résistant horizontal F_h au niveau de la barre d'attelage dans la mesure où la principale contribution à l'effort provient de F_{ch} .

Une évaluation de F_{ch} à l'aide du modèle précédent en faisant l'hypothèse que $\theta \approx \alpha$ et $\epsilon \approx \beta$ et la comparaison avec l'effort enregistré dans les situations où nous avons travaillé, nous confirme que cette dernière hypothèse n'est pas abusive car nous obtenons une contribution de F_{ch} à l'effort réel de 77% à 2.29 m/s et 69% à 0.52 m/s dans le cas d'un labour à 25 cm en sol tassé.

Certains auteurs expriment l'effort comme une fonction linéaire de la profondeur (Binesse, 1970 ; Oskoui *et al.*, 1982 ; Qiong *et al.*, 1986) mais la validité de leurs modèles est fortement dépendante de la gamme de profondeur explorée.

L'augmentation de l'effort avec le carré de la vitesse semble en accord avec les modèles issus d'une analyse dimensionnelle qui existent dans la bibliographie (Gee-Clough *et al.*, 1978 ; Oskoui *et al.*, 1982 ; Qiong *et al.*, 1986) et les analyses effectuées au champ (Randolph & Reed, 1938 en sol sableux et limoneux à faible humidité ; Söhne, 1959 et 1960 en limon, limon sableux et limon argileux à humidité moyenne ou faible (< 20%), voire Thaer, 1962 dans le cas d'une charrue butteuse, en sol limono-sableux à humidité inférieure à 20%) ou en bac à terre (Reaves & Schafer, 1974 sauf en sol très argileux (59,7%)).

Ces modèles ont principalement été établis dans des conditions de comportement non plastique. Les travaux de Reaves & Schafer sembleraient montrer que l'évolution en fonction de la vitesse n'est pas la même en sol très argileux où le comportement est probablement plastique et notre modèle non valable.

Il convient alors de comparer l'allure de notre modèle à l'équation universelle du mouvement adaptée par Mc Kyes (1985).

Celle-ci s'écrit :

$$H = (\gamma \cdot d^2 \cdot N_\gamma + C \cdot d \cdot N_c + C_a \cdot d \cdot N_{ca} + q \cdot d \cdot N_q + \gamma \cdot v_\tau^2 \cdot d \cdot N_a) \cdot b$$

N_γ , N_c , N_{ca} , N_q et N_a sont des facteurs sans dimensions qui pour des dents larges sont fonction de α , β , δ donc μ , ϕ ;

C_a correspond à l'adhésion du sol ; q à la pression verticale liée à une surcharge en surface

Dans notre cas $q = 0$ et nous avons considéré $C_a = 0$.

Nous retrouvons que H est une fonction du carré de la vitesse et de la profondeur. Nous constatons par ailleurs que notre expression correspond à la forme proposée par Mc Kyes avec des nombres sans dimensions dépendant des mêmes paramètres.

Notre modèle simplificateur nous semble donc apte à décrire, dans le domaine de validité que nous avons exploré, l'allure des variations de l'effort.

Néanmoins, le modèle de Mc Kyes est lui-même très simplifié par rapport aux problèmes posés par un outil complexe comme la charrue. Nous émettrons donc quelques réserves sur le fait que la fonction puissance de la profondeur et de la vitesse dont dépend H est toujours réellement une fonction du second degré. Dans le cas d'un comportement plastique les relations doivent par ailleurs être modifiées.

V. CONCLUSION : Hypothèses sur la contribution de l'état structural à l'effort de traction horizontal de la charrue

Les éléments théoriques précédents montrent que l'état structural du sol peut modifier l'effort de traction en modifiant :

- la cohésion du sol et l'angle de frottement interne ;
- le frottement sol-métal ;
- la masse de terre sur l'ensemble soc+versoïr dans certaines conditions de vitesse et de profondeur.

Pour un même produit $\gamma \cdot b \cdot d$ = Masse volumique * section travaillée, nous pouvons donc faire l'hypothèse :

- qu'il existe une différence d'effort entre états structuraux ;
- que, si les deux premières catégories de variables ont une contribution négligeable à la différence observée, cette différence diminue lorsque :

* la vitesse minimale est atteinte ; celle-ci est la vitesse minimale pour laquelle la bande de terre parcourt l'ensemble du versoïr ;

* le produit $\gamma * b * d$ est suffisamment important pour que l'on ait atteint la longueur minimale ; celle-ci correspond à la valeur asymptotique de la longueur de la bande de terre lorsqu'on augmente la profondeur de labour pour une largeur travaillée donnée ;

- que, si la contribution des variables cohésion, angle de frottement interne du sol et frottement sol-métal à la différence observée n'est pas négligeable, les variations de cette différence avec profondeur et vitesse ne seront pas indépendantes de ces variables, donc en particulier de la texture et de l'humidité du sol.

Avant de tester les hypothèses émises sur les répercussions de l'état structural sur l'effort, nous allons aborder le problème mécanique sous le second angle annoncé, c'est-à-dire sous un angle énergétique. Nous allons chercher à établir les liaisons pouvant théoriquement exister entre l'effort et le travail effectué au niveau de la bande de labour.

B. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES RELATIONS ENTRE L'EFFORT DE TRACTION AU NIVEAU DE LA BARRE D'ATTELAGE ET LE TRAVAIL EFFECTUE

Nous venons de montrer comment l'effort de traction horizontal au niveau de la barre d'attelage dépend des forces exercées par la charrue sur la bande de labour. Mais, nous devons nous interroger sur le caractère indicateur de ce paramètre sur le travail de fragmentation effectué au niveau de la bande.

I. BESOINS EN ENERGIE AUPRES DU SYSTEME TRACTEUR-OUTIL ET TRAVAIL EFFECTUE AU NIVEAU DE LA BANDE DE LABOUR

1) Besoins en énergie

Les besoins en énergie se décomposent en deux catégories de postes :

- des travaux ayant pour résultat une modification de l'organisation structurale du sol qui peut n'être qu'un réarrangement entre particules ou bien une réelle division de celles-ci d'après le chapitre III (forces de compression, traction, cisaillement, frottement), suivant le rapport entre la résistance apparente et la résistance de mottes ; d'après Fountaine *et al.* (1956), la première est inférieure ou égale à la seconde ;

- des travaux correspondant au déplacement de la bande de terre : soulèvement, accélération (forces d'inertie, poids, frottement sol-métal et adhésion).

Certains auteurs ont cherché à quantifier l'énergie nécessaire au premier poste en utilisant la technique du "*drop shatter*" (Gill & Mc Creery, 1960 ; Hadas & Wolf, 1983). Celle-ci consiste à laisser tomber d'une hauteur donnée un certain nombre de fois des blocs de sol, ce qui permet de calculer, de manière simplificatrice comme nous allons le montrer, l'apport d'énergie (à partir de la masse de l'échantillon, l'accélération de la pesanteur, la hauteur de chute et le nombre de chutes), et de comparer celui-ci au degré de pulvérisation obtenu. Celui-ci est caractérisé par la distribution des calibres de mottes après tamisage

qu'ils décrivent par le diamètre pondéré moyen défini par Van Bavel (1949) ou Gardner (1956).

La technique est appliquée à des blocs prélevés avant passage de l'outil dans la parcelle autant de fois qu'il est nécessaire pour atteindre le même diamètre pondéré moyen que celui obtenu sur des échantillons prélevés après passage de l'outil, ce qui pose un sérieux problème d'échantillonnage. L'énergie d'impact correspondante est alors comparée à l'énergie fournie par l'outil.

En conditions sèches Wolf & Hadas (1987) ont cherché sans succès à relier ce paramètre aux caractéristiques et réglages de la charrue. Ils attribuent cet échec au fait que les processus de fragmentation sont différents. Selon eux, il faut dissocier dans le labour l'énergie pour casser, de l'énergie de frottement, de transfert et de réorientation des mottes en conditions sèches. La technique du "*drop shatter*" ne simule que le premier processus. D'autre part nous ne pouvons exclure qu'elle introduit un biais. En effet les auteurs font l'hypothèse que toutes les fractions ont des mottes de densités égales, ce qui paraît discutable car les mottes les plus denses sont aussi les plus résistantes à l'état sec (De Leon, 1991). Il n'est donc pas impossible que les fractions les plus fines correspondent à des mottes de densité plus faible.

Leur étude témoigne néanmoins d'un souci de relier l'énergie fournie par l'outil à l'énergie nécessaire pour casser les éléments structuraux.

Nous adopterons une démarche plus analytique.

L'énergie du système bande a un instant donné est la somme de :

- son énergie potentielle ;
- son énergie cinétique ;
- son énergie de liaison entre particules.

Avant labour les deux premières énergies sont nulles car la bande est au repos, la troisième dépend du degré de liaison entre particules et donc doit différer selon l'état structural du sol.

Au cours du labour ces énergies varient car :

- la bande est soulevée d'une altitude 0 à une altitude h définie par son parcours sur le versoir : elle acquiert donc une énergie potentielle ;
- la bande passe d'une vitesse nulle à une vitesse v_b en sortie de versoir : elle acquiert donc une énergie cinétique ;
- la liaison entre les particules de terre varie à une humidité donnée, essentiellement dans le cas d'un état structural tassé comme nous l'avons montré au chapitre III.

Le travail effectué correspond à la somme des variations de ces trois énergies.

Gupta & Pandya (1967) définissent ainsi les besoins en énergie d'une bande de labour comme la somme d'une énergie :

- 1 - de compression du sol en avant de la charrue ;
- 2 - de coupe de la tranche de sol par le soc et le bord frontal du versoir ;
- 3 - pour vaincre les forces de frottement et d'adhésion à la surface du soc ;
- 4 - pour vaincre les forces de frottement et d'adhésion à la surface du versoir ;
- 5 - potentielle de soulèvement de la bande de terre ;

- 6 – cinétique correspondant à sa vitesse en sortie de versoir ;
- 7 – pour courber la tranche de sol ;
- 8 – pour tordre la tranche de sol.

Ils ne considèrent pas l'énergie liée aux frottements des blocs les uns par rapport aux autres car ils se situent en conditions plastiques et supposent donc qu'il n'y pas de formation de plans de cisaillement. Nous nous sommes par contre placée dans des conditions où il faut la considérer.

2) Facteurs susceptibles de modifier le bilan énergétique : effet de la vitesse

Lorsque l'état structural est fragmentaire (toutes autres conditions étant égales par ailleurs) :

- la liaison entre les particules est faible et nous pouvons supposer que les énergies 7 et 8 sont plus faibles que lorsque l'état est continu ;
- la résistance en compression, et en traction à l'état sec est plus faible (De Leon, 1991) aussi les énergies 1 et 2 sont probablement plus faibles qu'en état continu ;
- le nombre de points de contacts entre sol et métal est plus faible, donc probablement les énergies 3 et 4.

L'énergie 5 est la même, quel que soit l'état structural dès que l'on a atteint les conditions d'une trajectoire maximale. Dans le cas contraire, l'analyse du § A, nous suggère que 5 est plus faible lorsque l'état est fragmentaire.

L'énergie 6 est la résultante de la vitesse acquise par la bande de terre au cours de sa montée sur l'ensemble soc + versoir, vitesse qui conditionne son déplacement hors du versoir. Elle dépend donc du système de forces extérieures analysé précédemment.

Lorsque la trajectoire moyenne de la bande de terre sur le versoir est la même (définie par celle de son barycentre), nous pouvons faire l'hypothèse que la vitesse moyenne de la bande est à peu près la même quel que soit l'état structural (nous faisons l'hypothèse d'absence de pertes sur le versoir). La bande quittant le versoir a alors un déplacement moyen (défini par la position de son barycentre) qui est le même, quel que soit l'état.

L'énergie cinétique globalement requise est alors la même et l'effort de traction n'est pas un indicateur du déplacement moyen. Ce dernier va dépendre essentiellement de la vitesse d'avancement du tracteur.

Les besoins en énergie sont donc *a priori* plus importants lorsque l'état initial correspond à un état continu et compacté (c delta).

Mais, l'énergie requise auprès de la charrue est la somme entre les besoins en énergie définis précédemment et l'énergie absorbée par le travail des forces intérieures au système. Nous supposons que les pertes d'énergie sous forme de chaleur sont négligeables.

Or, le nombre de points de contacts entre particules étant supérieur lorsque l'état est tassé, nous pouvons penser que les forces de frottement sol-sol et les contraintes internes de courbure et torsion sont supérieures dans cet état, exigeant une énergie plus importante que dans un état non tassé.

Si le travail des forces intérieures au système est faible, notre hypothèse selon laquelle le déplacement hors du versoir dépend peu de cette énergie fournie demeure valable.

Par contre, nous pouvons penser que le déplacement individuel des particules n'est pas indépendant de l'état structural du sol.

Dans un état fragmentaire la vitesse de chaque particule individualisée ne va pas être la même en sortie de versoir si l'on suppose que toutes les particules reçoivent la même énergie. Pour une même énergie reçue, les particules les plus lourdes auront une vitesse plus faible. Le gradient de vitesse intrabande est donc supérieur à celui que l'on trouve dans un état initialement continu où la bande se comporte plus comme un seul bloc de vitesse égale à la vitesse moyenne de la bande en sortie de versoir.

Les écarts de déplacements entre particules d'une même bande sont donc probablement supérieurs lorsque l'état est plus fragmentaire, ce qui se traduit, pour un même déplacement moyen, par une élongation supérieure et en particulier un point de jetée maximale plus grand. Les particules grosses et denses sont les moins déplaçables comme le constatent Kouwenhoven & Terpestra (1979) dans le cas de reprises de labour.

Cet écart va augmenter avec la vitesse moyenne de la bande, donc avec la vitesse d'avancement du tracteur.

En effet, soit une bande de vitesse moyenne v , de masse m et composée de deux particules de masse m_1 et m_2 avec $m = m_1 + m_2$ ayant chacune pour vitesse v_1 et v_2 , si chaque particule reçoit la moitié de l'énergie cinétique totale de la bande $1/2 * m * v^2$, on a :

$$\begin{aligned} - 1/2 * m_1 * v_1^2 &= 1/2 * m_2 * v_2^2, \\ \text{soit } v_1^2 &= m_2 * v_2^2 / m_1 \\ - 2 * 1/2 * m_2 * v_2^2 &= 1/2 * m * v^2 = 1/2 * (m_1 + m_2) * v^2, \\ \text{soit } v_2^2 &= 1/2 * (m_1 + m_2) * v^2 / m_2 \end{aligned}$$

Donc :

$$(v_1 - v_2) = v_2 * (\sqrt{(m_2/m_1)} - 1) = v * (\sqrt{(1/2 * (m_1 + m_2)/m_2)} * (\sqrt{(m_2/m_1)} - 1))$$

Cette hypothèse est en accord avec les travaux de Kuipers *et al.* (1966) qui montrent que la distance entre particules du sol vers l'avant et sur le côté est plus grande après labour lorsque la vitesse augmente.

Sur le versoir la trajectoire tend, par contre, à être la même; ce qui peut expliquer qu'à forte vitesse d'avancement du tracteur le tri entre particules diminue (Söhne, 1960).

II. CONCLUSION

Nous pouvons émettre les hypothèses suivantes :

- **l'effort de traction varie selon l'état structural du sol**, ce qui inciterait à l'utiliser comme indicateur d'hétérogénéité du sol en s'inspirant des travaux de Keen & Haines (1925) qui ont cherché à établir des cartes d'isotraction et à les relier à la texture du sol en particulier la teneur en argile, et de ceux de Cordier *et al.* (1979) mentionnés en introduction ;

- **si le travail effectué par les forces intérieures au système n'est pas négligeable, l'effort n'est pas indicateur de tous les processus mécaniques agissant au cours du labour** et n'est donc pas révélateur des variations d'état structural qui s'ensuivent : un même effort résistant peut correspondre à des fragmentations différentes ;

- **si le travail des forces intérieures est faible, le déplacement moyen varie peu entre états structuraux mais l'élongation des bandes est supérieure lorsque l'état initial est fragmentaire ; cet écart d'élongation, dont le point de jetée maximale est un indicateur, augmente avec la vitesse.**

L'analyse théorique que nous venons de faire nous a permis de façonner un certain nombre d'hypothèses quant à la contribution de l'état structural à l'effort de traction horizontal et l'allure de ses variations en fonction de la profondeur et de la vitesse ainsi qu'à ses conséquences sur le déplacement des masses de terre travaillées. Il nous faut maintenant les tester grâce aux résultats expérimentaux obtenus.

C. PROTOCOLE DE CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT DE L'OUTIL

I. CAHIER DES CHARGES

La vérification des hypothèses émises implique, pour l'ensemble tracteur-outil utilisé, de pouvoir caractériser voire contrôler sur une enrayure :

- la profondeur de labour ;
- la vitesse d'avancement du tracteur ;
- la somme des efforts horizontaux au niveau de la barre d'attelage.

Il est important de caractériser leurs variations au cours d'une même enrayure avec un pas de mesure supérieur ou égal :

- aux variations d'état du sol que nous caractérisons ;
- aux possibilités de réactions de l'ensemble tracteur-outil ; en raison de l'inertie de la charrue, on enregistre en effet à un instant donné, dans le cas d'une charrue tricarps tirée par un tracteur de puissance comprise entre 55 à 70 ch, une certaine différence entre la profondeur du corps arrière et celle du corps avant, différence qui augmente avec la vitesse (Cowell & Len, 1967).

La profondeur est la variable la plus difficile à contrôler d'autant plus que ses fluctuations ne sont pas indépendantes des deux autres variables comme le montre Cowell & Len :

- l'écart-type de la profondeur augmente avec la vitesse d'avancement du tracteur, car celle-ci conditionne la vitesse verticale de l'outil ; il s'agit d'un système vibratoire complexe ;
- le contrôle d'effort entraîne de considérables fluctuations de profondeur ; celles-ci peuvent atteindre jusqu'à 10 cm.

Pour limiter la dépendance entre profondeur et effort nous avons choisi de fonctionner en contrôle de position avec un troisième point flottant, si bien que la charrue repose uniquement sur la roue de jauge et les deux bras du système d'attelage.

Ces caractéristiques de fonctionnement étant adoptées, il faut enregistrer les trois variables. Pour être sûr de disposer de mesures établies avec un pas de distance suffisant, nous avons utilisé des systèmes d'enregistrement nous fournissant, quelle que soit la vitesse, des mesures avec un pas de temps inférieur à celui nécessaire pour atteindre le pas de distance souhaité.

Lorsque les variations sont faibles, nous avons alors caractérisé chaque enrayure par la moyenne et l'écart-type des mesures obtenues.

II. APPAREILS DE MESURES

Les systèmes d'appareillage utilisés sont composés (Verma, 1989 ; Hong, 1990) :

- de capteurs ;
- d'un système de saisie et d'enregistrement des données.

Nous faisons figurer en annexe IV.D1 des photos des systèmes utilisés.

1) Les capteurs

a) Mesure de l'effort de traction horizontal

La mesure s'effectue à l'aide de capteurs dynamométriques au niveau de la barre fixée aux deux rotules d'attelage des bras inférieurs.

L'effort est relevé au moyen de capteurs à jauges de contrainte dont le principe est le suivant : ces jauges sont collées sur la partie déformable de la barre (corps en acier) suivant les directions principales de déformation et câblées en pont de Wheatstone ; leur résistance électrique varie avec leur déformation (allongement) ; le signal électrique émis est alors proportionnel à la force appliquée sur le capteur.

Les capteurs ont été préalablement étalonnés à l'aide d'un dynamomètre de référence après vérification de la position des jauges de contrainte, en particulier de la correspondance entre les plans des capteurs situés de part et d'autre de l'attelage, de leur horizontalité, et après affectation d'un degré d'amplification au signal.

b) Mesure de la vitesse d'avancement

D'un essai à l'autre plusieurs méthodes ont été testées. Nous avons commencé par faire :

- des mesures avec un capteur d'impulsions monté sur une roue spéciale à l'arrière de la charrue associé à un "Top" manoeuvré par une personne située dans la cabine du tracteur en début et en fin de la base de distance connue ; le "Top" permet une évaluation de la vitesse d'avancement moyenne du tracteur ;

- des mesures avec émission d'un faisceau à partir d'une cellule photo-électrique et réflexion au niveau de barrières fixées sur le terrain et composées d'intervalles pleins et vides de 5 cm de largeur.

Mais, ces deux premières méthodes se sont avérées peu commodées (barrières), pas assez précises (Top) ou pas assez fiables (impulsions), aussi nous avons préféré les deux méthodes suivantes :

- mesures avec une dynamo entraînée par un tambour monté sur le tracteur qui se déroule au cours de l'avancement de celui-ci à partir d'un piquet planté sur la parcelle en début de base ; la dynamo engendre une tension électrique proportionnelle à la vitesse d'avancement ;

- mesures à l'aide d'un radar à effet Doppler fixé sur le tracteur avec un angle défini par rapport au sol ; le radar émet un faisceau de micro-ondes qui se réfléchissent à la surface du sol ; la différence entre la fréquence du signal émis et celle du signal réfléchi est proportionnelle à la vitesse de déplacement du détecteur par rapport au sol ; l'étalonnage du radar se fait par chronométrage sur des bases de 50 m.

c) Mesure de la profondeur de labour

Nous avons combiné une mesure manuelle à l'aide d'une règle graduée au niveau de la muraille de chaque passage avec une mesure à l'aide de capteurs ultrasons à l'avant et l'arrière de la charrue. Le temps d'émission-réception dépend de la distance entre les capteurs et la surface, c'est-à-dire de la profondeur d'enfoncement de la charrue puisqu'ils sont fixés dessus.

Cette technique a été utilisée dans les cas où nous voulions étudier plus particulièrement l'influence de la profondeur sur l'effort.

Elle exige un état de surface le plus plan possible car toutes les irrégularités de surface (liées aux matières organiques, à la rugosité de la surface) entraînent une variation de la mesure sans qu'il y ait réellement modification de la profondeur de travail.

2) Système de saisie et d'enregistrement des données

Nous avons utilisé des systèmes différents sur les sites de Grignon et Palaiseau.

A Grignon, nous avons utilisé un système embarqué (CIRAD/CEEMAT) au niveau du tracteur composé d'une centrale d'acquisition reliée directement au capteur. La centrale disposant d'une mémoire limitée, il est nécessaire de transférer l'information sur un microordinateur dès que cette mémoire est pleine. Cette information est directement récupérable sur tableur d'où une grande souplesse d'emploi.

La fréquence limite est de 100 mesures par seconde.

Dans cette expérimentation notre objectif était de caractériser l'effort et la vitesse d'avancement du tracteur et non de faire une étude détaillée de leurs variations, aussi avons-nous limité la zone d'enregistrement à la zone d'observation des profils après labour. Nous avons utilisé une fréquence plus faible que la fréquence maximale, soit 8 mesures par seconde car toute information supplémentaire nous paraissait superflue par rapport à nos possibilités de caractérisation du sol et les réactions de la charrue.

A Palaiseau, où les enrayures étaient plus longues, nous avons utilisé une chaîne de télémessure (CEMAGREF) qui a l'avantage de permettre le stockage d'un plus grand nombre d'informations.

La chaîne, dont le schéma de câblage utilisé dans nos essais figure en annexe IV.D1, est composée :

- d'un dispositif, embarqué sur le tracteur, de captage des signaux provenant des capteurs et de leur émission en direction du dispositif de réception-enregistrement. Le signal est transmis par ondes hertziennes ;

- d'un dispositif, situé dans un véhicule à proximité de la parcelle d'essai, de réception-enregistrement du signal.

Les données arrivant sous forme analogique ou numérique sont enregistrées sous forme de grandeurs magnétiques sur des bandes. L'enregistreur magnétique permet aussi ultérieurement de transformer les champs magnétiques en tensions électriques.

Pour contrôler la validité des signaux en cours d'essai, on utilise des enregistreurs photographiques à rayons ultra-violet pour les signaux analogiques et un oscilloscope branché sur la base temps et sur l'une des voies numériques pour suivre la synchronisation de la voie numérique avec toutes les autres voies de la télémessure.

Un microordinateur portable peut être branché directement à la sortie de l'enregistreur magnétique, ce qui permet de traiter les données dès la première séquence d'enregistrement. Au cours d'une de nos campagnes nous avons utilisé un tel branchement.

Dans les autres, l'absence d'ordinateur portable nous a contraint à différer tout le traitement au laboratoire.

Celui-ci se fait grâce au logiciel "n'SOFT" qui permet le transfert sur microordinateur de données stockées sur bandes magnétiques. On commence par établir un fichier de

calibration contenant les données d'étalonnage, et les unités. Le transfert se fait alors sous forme multiplexée, c'est-à-dire toutes voies ensemble.

Après transfert, un module permet de démultiplexer les différentes voies en créant un fichier par voie, présentant les données sous forme graphique avec calcul des valeurs minimales, maximales, moyennes, écart-type et un fichier présentant sous forme de tableau ces valeurs obtenues pour toutes les voies.

Le logiciel offre par ailleurs une série de modules permettant des traitements du signal, des analyses statistiques et fréquentielles.

La fréquence de la télémessure est plus faible que celle des capteurs utilisés sauf pour les capteurs de profondeur. Elle est donc limitante et fournit 434 données par seconde. Les capteurs de profondeur ne fournissant que 25 mesures par seconde, une même mesure est répétée plusieurs fois tant que la suivante n'est pas acquise.

Lorsque la vitesse augmente, le nombre de valeurs obtenues par mètre diminue, aussi avons-nous adapté la longueur des traitements à la vitesse utilisée de manière à avoir le même nombre de mesures par situation.

La fréquence très élevée de mesures entraîne une surabondance d'informations dont la signification par rapport aux variations d'états du sol paraît discutable. Ceci n'est pas un inconvénient dans la mesure où nous n'avons pas cherché à interpréter de microvariations. L'analyse qui suit ne repose en effet que sur les moyennes et écarts-types obtenus pour chaque variable sur la base considérée.

III. CONCLUSION

Les systèmes de mesures utilisés ont l'avantage de mesurer en continu la vitesse d'avancement du tracteur, la profondeur de labour et l'effort de traction avec un pas de mesure supérieur aux variations d'état du sol que nous caractérisons. Ils permettent donc de déterminer les gammes sur lesquelles nous avons fait varier les réglages et de déceler les cas où nous n'avons pas réussi à les contrôler. Il est alors possible d'analyser les variations de l'effort de traction en fonction de l'état initial du sol.

D. RESULTATS CONCERNANT L'EFFET DE L'ETAT STRUCTURAL DU SOL SUR L'EFFORT DE TRACTION AU NIVEAU DE LA BARRE D'ATTELAGE

I. ANALYSE DES VARIATIONS DE L'EFFORT DE TRACTION EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ET DE LA VITESSE : EFFET DE L'ETAT STRUCTURAL

Le site retenu pour cette analyse est une parcelle située sur le plateau de Palaiseau en limon argileux. La teneur en argile y est de 18% en moyenne avec des extrêmes localisés à 15.5 et 20.9% d'argile. Elle est donc moins forte que sur le site de Grignon.

1) Principe des traitements

Notre objectif est d'analyser les relations entre état initial, profondeur de labour et vitesse d'avancement du tracteur. Nous avons donc cherché :

- à créer une gamme de variations de l'état initial en tassant en conditions humides une zone de manière intense perpendiculairement au sens du travail ; nous espérons créer un état c Δ (Traitement noté T) à opposer aux états hérités de l'histoire de la parcelle avant notre intervention (Traitement noté NT), présents dans la zone sans tassement ;

- à contrôler la profondeur sur une même enrayure et à couvrir une gamme allant de 15 à 30 cm (profondeur maximale de labour dans la parcelle) d'une enrayure à l'autre ; nous avons pour objectif quatre profondeurs : 15, 20, 25 et 30 cm ; à chaque changement de profondeur le passage mitoyen au cours duquel la charrue est déstabilisée (roue dans une raie de profondeur différente de la profondeur de labour) n'a pas été pris en compte ; pour assurer un contrôle satisfaisant de la profondeur nous avons nivelé la parcelle par un passage de herse rotative+rouleau packer ;

- à faire varier la vitesse d'avancement du tracteur ; la gamme de variation doit être compatible avec les vitesses de labour communément pratiquées mais suffisamment large pour que l'on puisse percevoir les effets de la vitesse soit 2 à 8 km/h ; nous avons donc défini trois objectifs de vitesse : 8, 5 et 2 km/h.

Pour chaque situation nous avons défini deux bases d'enregistrement. Un léger gradient d'argile distingue les deux zones correspondantes.

2) Conditions de réalisation des traitements

a) Etat physique

α) Etat structural

Dans la zone non tassée, nous avons créé un horizon de reprise H1 de 3 à 5 cm. L'horizon H5 a une épaisseur de 22 à 25 cm. Son état est de type b Δ avec des cavités plus ou moins exprimées selon que l'on est en position L3 ou L2 du précédent cultural : en L3 les mottes ont des tailles allant de 7-8 cm à 20 cm, les plus petites étant situées dans

l'interbande et à l'emplacement de la rasette ; en L2, l'état est b Δ tassé avec présence ou pas de gley selon la teneur en argile de la zone, et des calibres d'environ 20 cm.

Une distinction entre les zones affectées par les roues internes et celles affectées par les roues jumelées du tracteur tirant la herse rotative a été notée. Dans le premier cas, certaines cavités demeurent sur le fond du labour.

L'horizon H6 sous-jacent a une épaisseur de 8 à 10 cm et son état est c Δ avec présence ou non de gley oxydé.

Dans la zone tassée, l'horizon de reprise H1 n'existe que sous forme de mottes libres en surface. A partir de celui-ci se développe un horizon H5 homogène de 21-22 cm d'état c Δ avec peu de différenciation L2-L3. Il surplombe un horizon H6 de même état que celui caractérisé dans la zone non tassée, c'est-à-dire c Δ .

β) Densité

Des mesures de densité avant labour stratifiées selon la variabilité des états morphologiques et réalisées avec la sonde gamma montrent que nous avons créé des états de densités différentes (Cf. Fig. IV.D.1).

Dans l'analyse ultérieure nous utiliserons pour caractériser chacun des traitements la masse volumique sèche moyenne (servant à calculer la densité humide) sur 0-25 cm :

- 1.5 g/cm³ pour T ;
- 1.3 g/cm³ pour NT.

Pour NT cette valeur a été calculée en tenant compte de la fréquence sur la parcelle des positions L3, L2 sous roues internes, L2 sous roues jumelées.

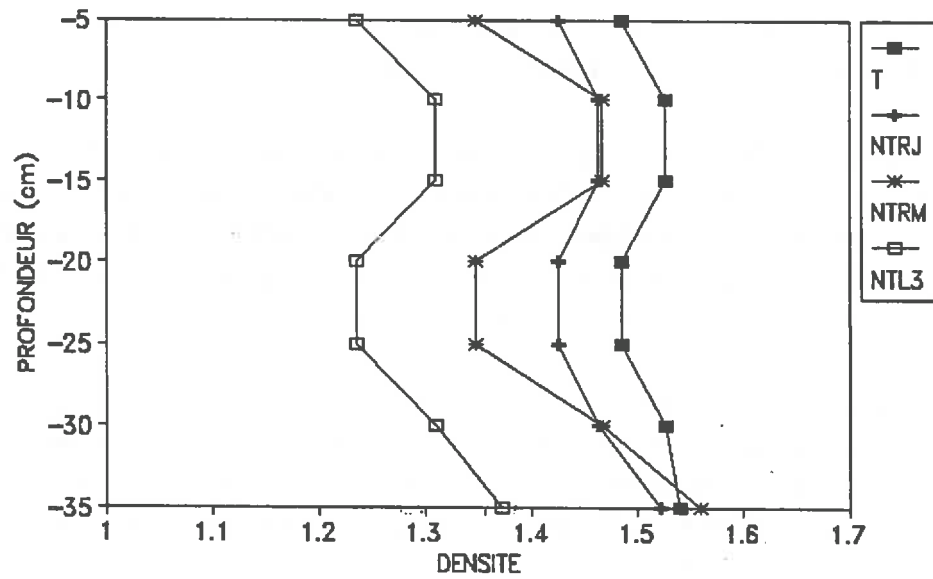
La prise en compte de la densité associée à chaque passage de charrue compte-tenu de la profondeur de labour et de la position par rapport aux zones L2 et L3 ne modifiait en effet guère les relations obtenues.

γ) Humidité au labour

L'humidité au labour a été mesurée tous les 10 m à chaque passage de charrue au niveau de la muraille. Chaque passage de charrue étant divisé en deux bases de 50 m, nous avons donc réalisé huit prélèvements par passage.

Une légère différence d'humidité significative au niveau 5% a été détectée entre les deux traitements : 22.1% dans T ($\sigma = 0.61$ (17) ; n = 56) ; 23.3% dans NT ($\sigma = 0.77$; n = 64).

(17) Rappel : nous notons par commodité σ l'estimateur non biaisé σ .



T: Traitement tassé
 NTRJ: Traitement non tassé sous roues jumelées du passage de herse rotative de nivellement
 NTRM: Traitement non tassé sous roues internes du passage de herse de rotative de nivellement
 NTL3: Traitement non tassé hors les roues précédentes

FIGURE IV.D1 : Profils de densité du sol avant labour sur les traitements de la parcelle de Palaiseau en hiver 1990

b) Réglages

a) Profondeur

Les profondeurs explorées varient de :

- 15.2 cm à 31.3 cm dans le traitement tassé ;
- 15.4 cm à 33.2 cm dans le traitement non tassé.

Pour chaque enrayure et pour chaque base, nous avons réussi à contrôler correctement la profondeur. L'écart-type des valeurs est inférieur à 3.5 cm, les plus forts écarts-types correspondant au labour à 30 cm environ. Etant donné le grand nombre de valeurs enregistrées, l'intervalle de confiance de chaque moyenne correspondant à un risque de première espèce de 5% est d'étendue inférieure à 0.2 cm.

Quelle que soit la profondeur, nous avons donc labouré une couche d'état c Δ (dont une partie est plus âgée (H6) pour les labours à 25 et 30 cm) dans le traitement tassé.

Dans le traitement non tassé, les labours à moins de 30 cm ont été effectués dans une zone d'état b Δ , ceux de plus de 30 cm ont affecté en supplément une couche c Δ sur une épaisseur variant de 0 à 5 cm.

β) Vitesse

Les trois gammes de vitesse choisies ont été effectivement explorées.

Les moyennes **(18)** correspondantes sont :

- vitesse lente : 1.9 km/h ($\sigma = 0.03$; $n = 16$) avec dans T ($\sigma = 0.03$; $n = 7$) et NT ($\sigma = 0.02$; $n = 9$) et une valeur de 3.9 km/h obtenue dans un passage à 30 cm dans T ;
- vitesse moyenne : 5.2 km/h ($\sigma = 0.10$; $n = 17$) soit 5.2 km/h ($\sigma = 0.10$; $n = 8$) dans T et 5.3 km/h ($\sigma = 0.07$; $n = 9$) dans NT ;
- vitesse rapide : 8.2 km/h ($\sigma = 0.18$; $n = 17$) soit 8.2 km/h ($\sigma = 0.15$; $n = 8$) dans T et 8.3 km/h ($\sigma = 0.17$; $n = 9$) dans NT.

La première base correspond au parcours de 14 m, 24 m et 6 m à vitesse moyenne, rapide et lente alors que la seconde base correspond au parcours de 16 m, 27 m et 7 m aux trois mêmes vitesses.

(18) Chaque moyenne a été calculée à partir des différentes valeurs obtenues sur les bases d'enregistrement. Chaque valeur est elle-même le résultat d'un nombre élevé de mesures soit plus de 3000. L'écart-type des valeurs est inférieur à 0.4 km/h pour les vitesses lentes et moyennes, à 1.4 km/h pour les vitesses rapides.

γ) Largeur

Nous n'avons pas cherché à faire varier ce paramètre mais nous l'avons mesuré à chaque bout de la parcelle sur deux transects perpendiculaires à l'avancement du tracteur à l'aide du repérage des positions des murailles à chaque passage.

La largeur moyenne obtenue est 1.14 m ($\sigma = 0.045$; $n = 17$) soit un peu plus que la largeur théorique de 1.05 m pour une charrue tricrops 14 pouces. Aucune différence significative entre traitements n'est visible.

Elle serait par contre un peu plus élevée pour les passages réalisés à faible profondeur soit 1.17 m (0.032 ; $n = 8$) à 15 et 20 cm contre 1.10 m ($\sigma = 0.024$; $n = 9$) à 25 et 30 cm. Un écart moyen de moins de 5 cm existe aussi entre les deux extrémités de la parcelle.

3) Evolution de l'effort de traction en fonction de la profondeur

Nous avons représenté figure IV.D2 (p. 206) l'évolution de l'effort de traction mesuré au niveau de la barre d'attelage en fonction de la profondeur, toutes les vitesses étant confondues. L'écart-type associé à chaque valeur ne dépasse pas 150 daN ce qui, étant donné le nombre élevé de valeurs soit environ 4000 données, donne un intervalle de confiance très étroit pour un risque de première espèce de 5% : l'intervalle de confiance maximum est ± 5 daN.

Nous constatons que l'effort de traction est supérieur dans le traitement tassé. Il augmente avec le carré de la profondeur. Pour chacun des traitements l'ajustement à un polynôme du second degré est assez bon car le R^2 est supérieur à 0.7 (0.73 dans T ; 0.81 dans NT). Néanmoins les résidus ne sont pas répartis de manière aléatoire en fonction de la vitesse : dans les deux traitements, le modèle sous-estime les valeurs obtenues à vitesse rapide et surestime les valeurs obtenues à vitesse lente.

La figure IV.D3 (p. 206) montre en effet que l'effort augmente avec le carré de la vitesse.

Pour une même vitesse, l'effort est en moyenne supérieur dans la zone tassée mais en augmentant la profondeur de labour dans le traitement non tassé, on peut dépasser les valeurs d'effort obtenues à profondeur plus faible dans le traitement tassé.

La figure IV.D2 montre que ce n'est pas le cas lorsqu'on fait varier la vitesse car il y a au mieux égalité d'effort entre les traitements pour une même profondeur.

Le facteur profondeur semble donc avoir un effet plus important sur le résultat observé que le facteur vitesse sur les deux gammes de variation de la profondeur et de la vitesse explorées.

L'introduction de ce dernier dans le modèle améliore néanmoins significativement le modèle avec un R^2 de 0.91 pour T et de 0.95 pour NT.

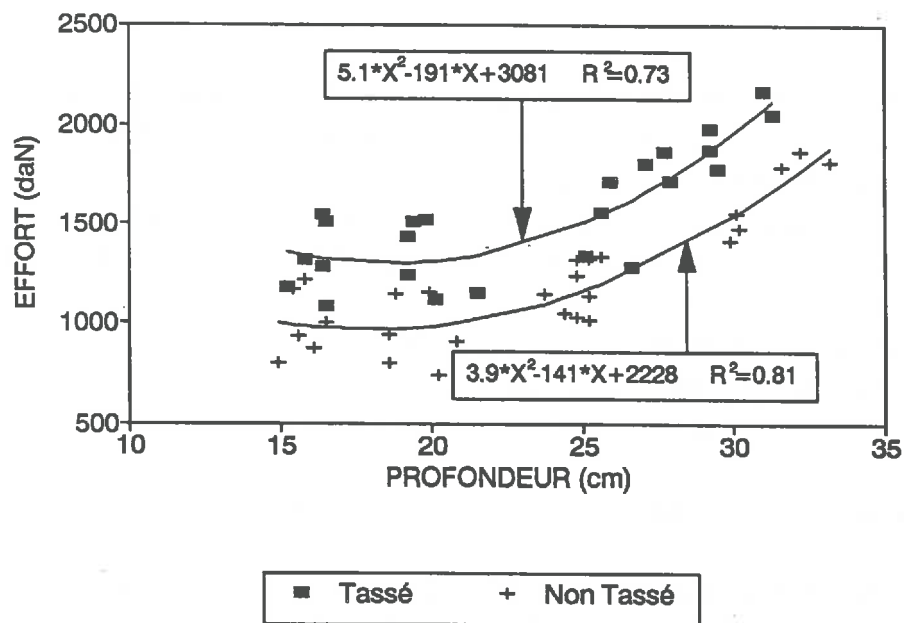


FIGURE IV.D2 : Relation entre l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage et la profondeur de labour sur les traitements de la parcelle de Palaiseau en hiver 1990

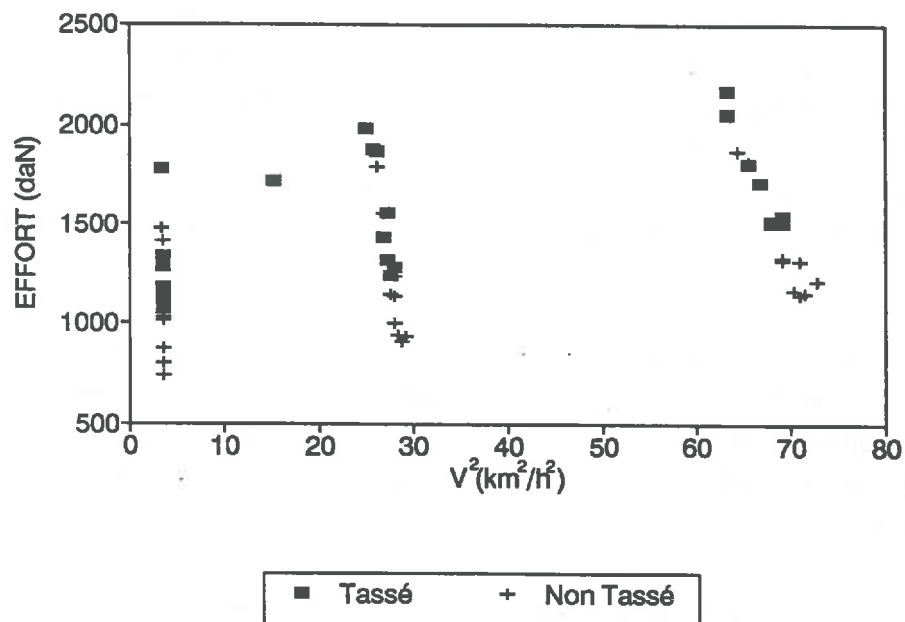


FIGURE IV.D3 : Relation entre l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage et la vitesse d'avancement du tracteur sur les traitements de la parcelle de Palaiseau en hiver 1990

La différence d'effort observée entre états à une même profondeur peut être due à la densité, qui pour un même volume travaillé augmente la masse de terre labourée, car cette densité n'est pas la même dans les deux états structuraux.

Or, nous avons montré au § A que le produit $\gamma * b * d$ (masse volumique * section travaillée) permettait de prendre en compte la différence de densité et d'émettre des hypothèses sur l'effet de l'état structural. Nous devons donc étudier l'évolution de l'effort en fonction de ce produit, d'autant plus que les variations d'effort en fonction de la profondeur et de la vitesse sont en accord avec le modèle présenté.

4) Evolution de l'effort en fonction du produit masse volumique * section travaillée

La figure IV.D4 (p. 208) montre que la différence de masse volumique humide explique une part de l'écart d'effort observé entre les deux traitements, mais qu'un écart important demeure pour les faibles produits masse volumique * section travaillée.

Pour une même masse de terre travaillée M ($M = \text{Masse volumique} * \text{section travaillée}$) sur la parcelle, l'effort diffère selon l'état structural mais l'écart se réduit lorsque cette masse augmente.

Le tableau IV.D1 présente les résultats que l'on obtient lorsqu'on introduit la vitesse dans la régression.

Traitement NT :			R ² total : 0.9549	
			Constante : 1841.2417	
VARIABLE	COEFFICIENT	ECART-TYPE	F(1.23)	R ² partiel
M	63.4149	11.8917	28.438	0.5529
M ²	0.9874	0.1342	54.097	0.7017
V ²	55.2009	6.4267	73.776	0.7623
Traitement T :			R ² total : 0.9149	
			Constante : 2411.9736	
VARIABLE	COEFFICIENT	ECART-TYPE	F(1.23)	R ² partiel
M	- 69.0815	22.2923	9.603	0.3244
M ²	0.9369	0.2309	16.464	0.4515
V ²	67.0569	10.2187	43.062	0.6829

Tableau IV.D1

La distinction entre les vitesses V améliore nettement le modèle utilisé particulièrement dans le traitement T.

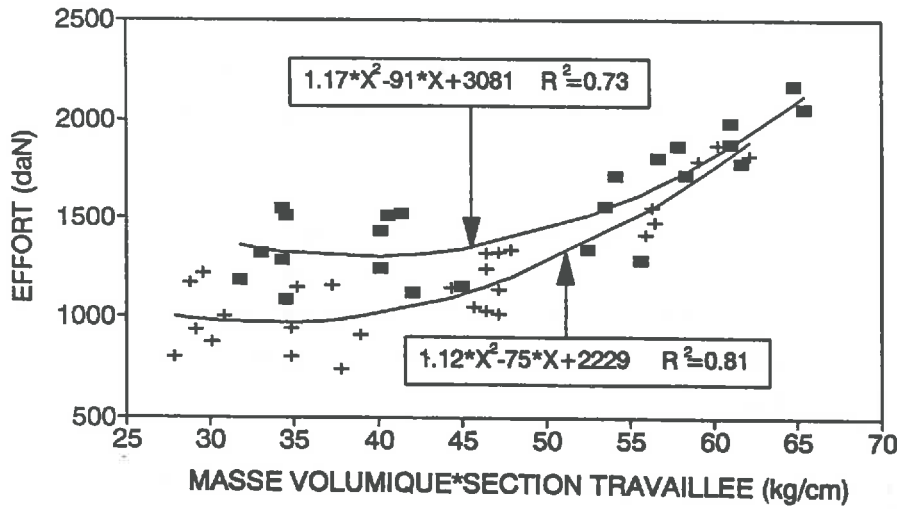


FIGURE IV.D4 : Relation entre l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage et la masse de terre humide sur les traitements de la parcelle de Palaiseau (hiver 1990)

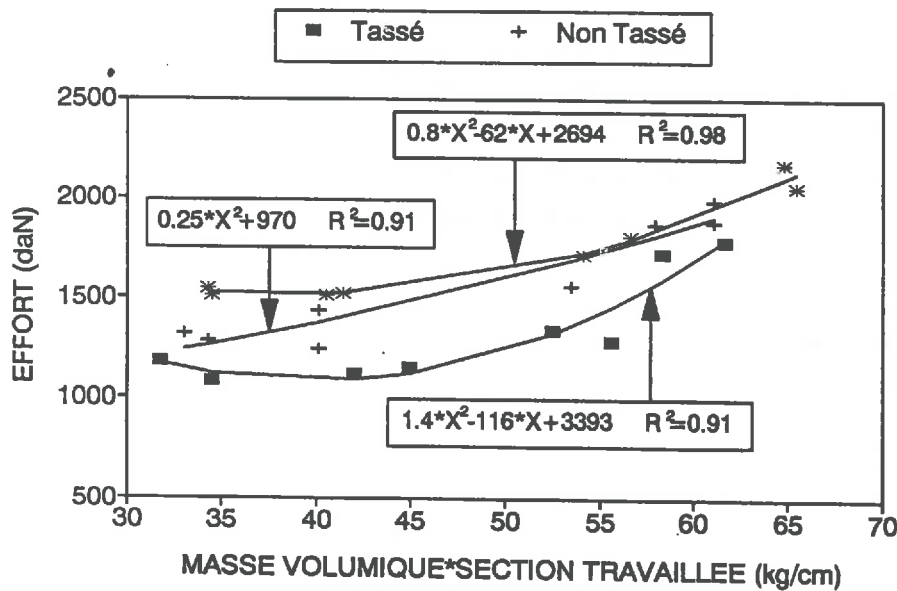


FIGURE IV.D5 : Relation entre l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage et la masse de terre humide selon la vitesse d'avancement du tracteur sur le traitement tassé de la parcelle de Palaiseau (hiver 1990)

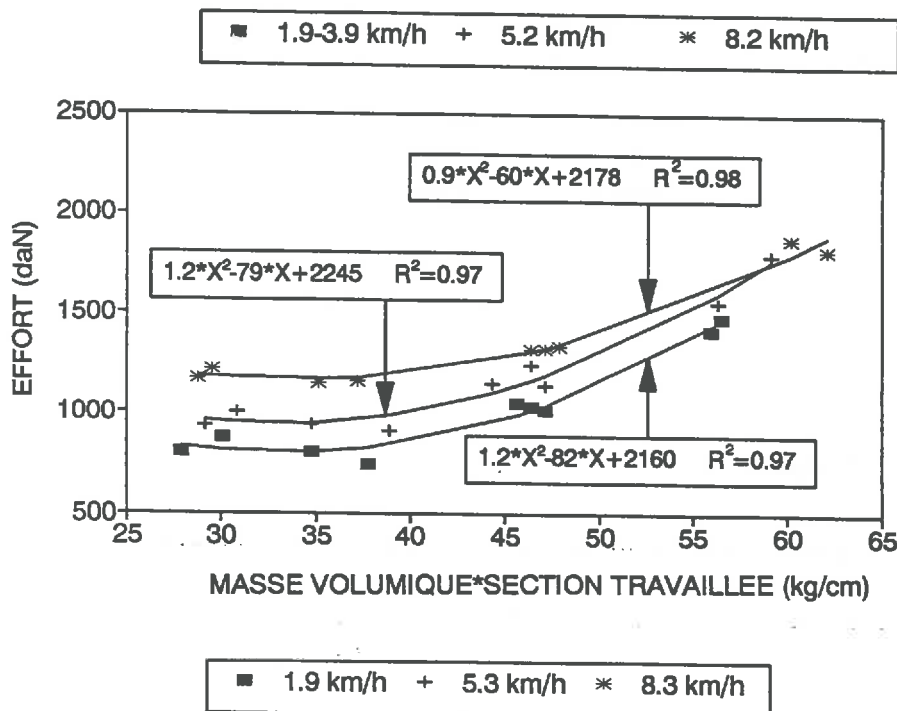


FIGURE IV.D6 : Relation entre l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage et la masse de terre humide selon la vitesse d'avancement du tracteur sur le traitement non tassé de la parcelle de Palaiseau (hiver 1990)

Dans chaque traitement le R^2 obtenu avec la régression multiple faisant intervenir le facteur vitesse V^2 en plus de M et M^2 est plus fort que celui obtenu avec la régression multiple se limitant aux facteurs M et M^2 . Dans le traitement tassé, il est de 0.91 dans le premier cas contre 0.73 dans le second ; dans le traitement non tassé, il est de 0.95 dans le premier cas contre 0.81 dans le second.

D'après les figures IV.D5 et IV.D6, nous constatons alors :

- que l'effort dans NT à vitesse rapide est aussi important que dans T à vitesse lente pour les faibles masses de terre, mais que cet effet devrait être beaucoup plus net quand la masse augmente, ce qui n'apparaît pas de façon évidente ; l'inertie est plus forte dans NT à vitesse rapide que dans T à vitesse lente, et l'écart d'inertie augmente avec $\gamma * b * d$; à partir d'une certaine valeur de ce produit, l'effort dans NT à vitesse rapide devrait donc devenir plus important que dans T à vitesse lente, ceci d'autant plus que nous avons fait l'hypothèse au § A que l'écart de masse sur le versoir (*a priori* plus faible dans NT que dans T) diminuait avec la profondeur ou la vitesse ; ce n'est pas le cas, alors même que l'on a plutôt sous-estimé la densité, donc la masse de terre labourée, dans NT aux fortes profondeurs puisque nous avons utilisé la densité moyenne sur 0-25 cm et qu'une couche $c\Delta$ sous-jacente se trouve dans ce traitement ; nous pouvons donc penser que la contribution à l'effort du terme d'inertie est en fait moins importante que d'autres composantes de cet effort, du moins lorsque $\gamma * b * d$ augmente ;

- que, dans chaque traitement, l'écart d'effort entre vitesses diminue lorsque la masse de terre travaillée augmente ; la diminution relative, évoquée ci-dessus, de la contribution de l'inertie à l'effort total lorsque $\gamma * b * d$ augmente, pourrait expliquer que l'écart d'effort entre vitesses n'augmente pas de manière visible ; elle ne peut, par contre, expliquer sa diminution ; celle-ci pourrait peut-être cependant s'expliquer, pour les produits $\gamma * b * d$ les plus élevés, par le fait que la longueur de la bande de terre est alors minimale ; cette longueur définie au § IV.A est, bien sûr, plus importante à vitesse rapide qu'à vitesse lente mais l'écart de longueur entre les deux vitesses pourrait être moindre à forte qu'à faible masse de terre. Néanmoins, les considérations résultant de la formule donnant I , qui font intervenir les fonctions H_i , décroissantes avec μ , paraissent peu compatibles avec cette hypothèse, si l'on en croit Stafford et Tanner (1983) qui indiquent une augmentation de l'angle de frottement sol-métal, donc de μ , avec la vitesse pour les vitesses de moins de 2 m/s.

Les hypothèses présentées au § A. doivent avoir pour conséquence la diminution de l'écart des masses de terre sur l'ensemble soc + versoir entre états structuraux à partir d'une certaine masse travaillée et d'une certaine vitesse. A partir des régressions réalisées pour chaque état structural et chaque vitesse, nous avons cherché à évaluer les conséquences sur l'effort total en calculant l'écart d'effort entre les traitements en fonction de la masse travaillée.

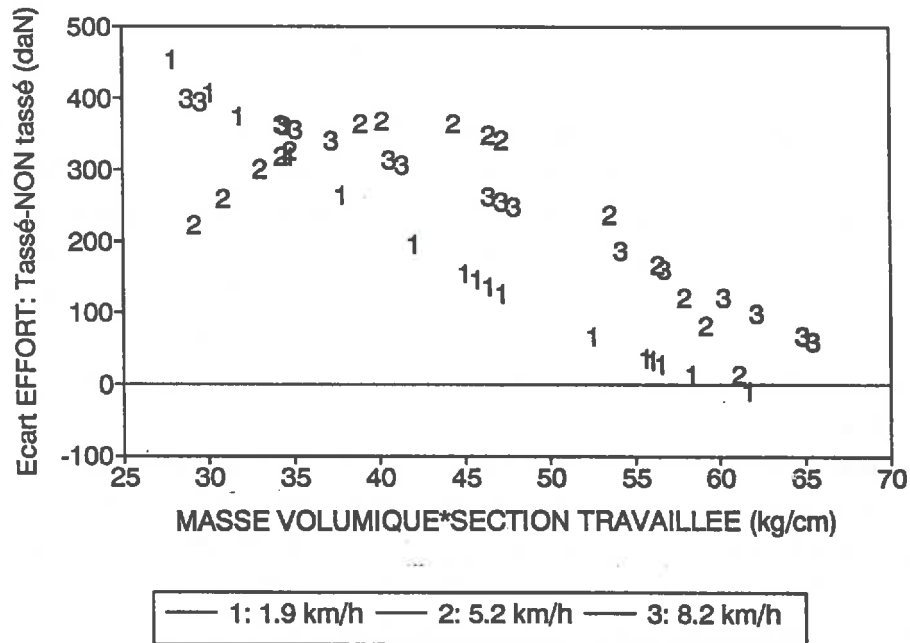


FIGURE IV.D7 : Relation entre l'écart des régressions obtenues sur les traitements (tassé et non tassé) et la vitesse d'avancement du tracteur (il s'agit des régressions de l'effort de traction au niveau de la barre d'attelage en fonction de la masse de terre humide sur les traitements de la parcelle de Palaiseau en hiver 1990)

La figure IV.D7 montre que :

- l'écart d'effort entre traitements diminue avec la masse à partir de 40 kg/cm quelle que soit la vitesse ;
- par contre, la diminution de l'écart d'effort avec la vitesse pour une même masse travaillée ne se confirme pas.

L'expression de l'effort H au § IV.A nous permet alors de formuler les conditions suivantes :

- si, pour un même outil, la différence d'effort entre états structuraux augmente avec la vitesse, alors que d'après le modèle utilisé, celle-ci doit diminuer la différence liée à la masse de terre, ce ne peut être dû qu'aux termes z_1 ou z_2 , c'est-à-dire au frottement sol-métal ou à l'angle de frottement interne ; la différence entre les deux traitements ne peut donc pas être liée uniquement à une différence de masse sur l'ensemble soc+versoir donc de trajectoire de la bande de terre ; les caractéristiques de cisaillement et de frottement de celle-ci doivent être prises en compte ;

- si, pour une même vitesse et un même produit $\gamma * b * d$, nous constatons que la différence entre états structuraux diminue avec ce produit, deux raisons peuvent être invoquées :

* la diminution de la différence de masse de terre sur l'ensemble soc + versoir avec la profondeur ;

* la diminution de la différence du terme $C * b * d$ si la contribution de la cohésion n'est pas négligeable ; en effet, pour un même produit $\gamma * b * d$, le produit $b * d$ est supérieur lorsque la masse volumique est plus faible c'est-à-dire dans notre traitement NT.

Pour trancher entre ces deux dernières hypothèses, il faudrait pouvoir comparer des traitements ayant une même densité humide, c'est-à-dire pour lesquels il y aurait à la fois égalité entre la section et la masse travaillée. Ceci est très difficile à réaliser au champ car les procédures pour modifier radicalement l'état structural entraînent aussi bien souvent une modification de la densité apparente. Nous n'avons donc pu réaliser cette comparaison.

5) Extrapolation des résultats à d'autres conditions de texture et d'humidité

Nous avons cherché à comparer les résultats précédents avec ceux obtenus sur le site de Grignon dans la parcelle et dans les conditions présentées aux Chap. II et III. ($A = 25.5\%$; $W = 20-21\%$ au labour), c'est-à-dire en conditions légèrement plus sèches et plus argileuses qu'à Palaiseau.

Le labour ayant été fait à même masse de terre travaillée ($\gamma * b * d$) nous ne pouvons comparer l'évolution de l'effort en fonction de cette variable. Nous pouvons, par contre, tester comme prévu la pérennité des différences entre états structuraux à masses de terre identiques.

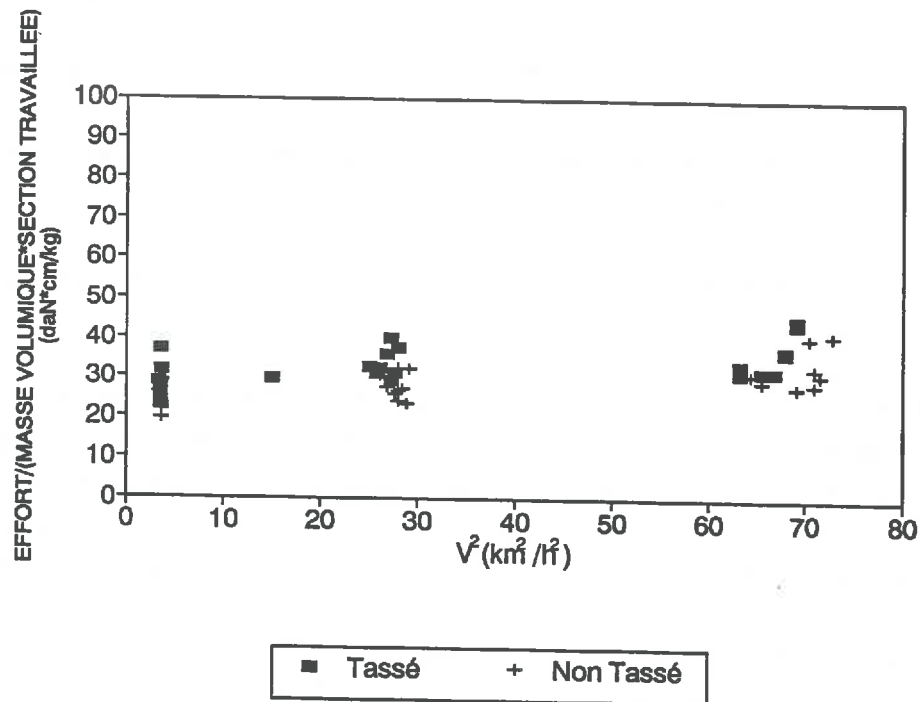


FIGURE IV.D8 : Relation entre l'effort de traction rapporté à la masse de terre humide travaillée et le carré de la vitesse d'avancement du tracteur sur les traitements de la parcelle de Palaiseau en hiver 1990

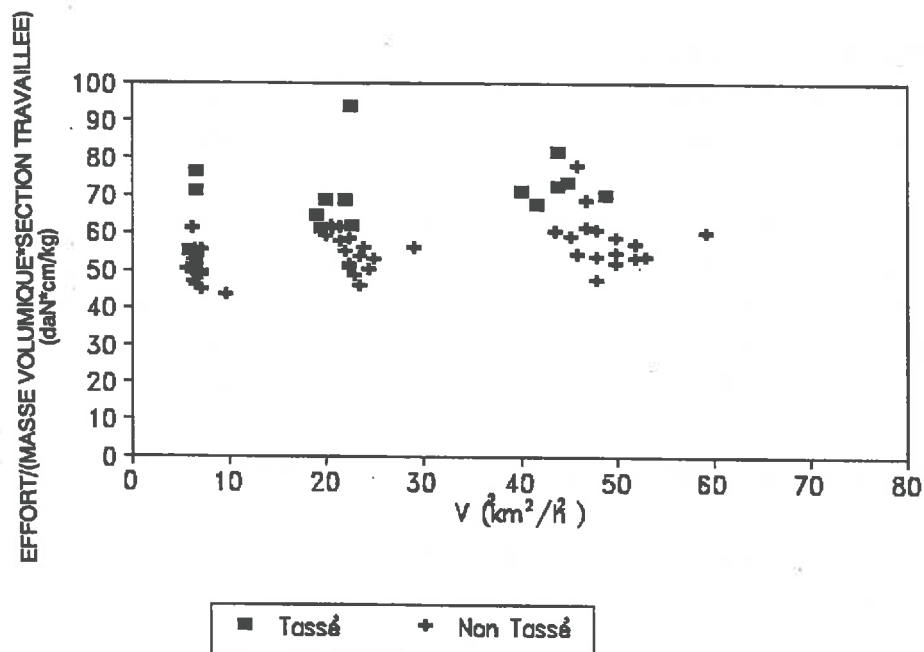


FIGURE IV.D9 : Relation entre l'effort de traction rapporté à la masse de terre humide travaillée et le carré de la vitesse d'avancement du tracteur sur les traitements de la parcelle de Grignon

La charrue utilisée étant une charrue 2 corps 14 pouces, soit un corps de moins qu'à Palaiseau, nous avons comparé les efforts rapportés à la masse de terre travaillée obtenus dans les deux sites.

Les figures IV.D8 et IV.D9 montrent que dans les deux sites un écart subsiste en moyenne entre les deux états structuraux et que cet écart est plus important à Grignon qu'à Palaiseau.

Ceci n'est pas étonnant car l'état correspondant au traitement non tassé était plus fragmentaire à Grignon qu'à Palaiseau.

Par contre, la gamme d'effort/masse de terre travaillée explorée n'est pas du tout la même entre les deux sites et est plus forte à Grignon, quel que soit l'état structural.

La charrue utilisée n'étant pas la même nous ne pouvons déterminer si cette différence de gamme entre sites est liée à :

- l'outil ;
- la texture et l'humidité du sol.

6) Conclusion

Même si cette analyse ne permet pas de conclure quant aux hypothèses émises au § IV.A, elle ne les remet pas en question et fait apparaître :

- l'insuffisance de modèles n'utilisant comme caractéristique du sol que sa densité ;
- la nécessité d'une caractérisation des propriétés mécaniques des sols en liaison avec leur état structural ;
- les lieux à prospecter pour affiner l'analyse de l'effet de l'état structural sur l'effort : une différence de trajectoire de la bande de terre ne peut expliquer à elle seule la différence d'efforts observée pour un même produit masse volumique * section travaillée ; le frottement sol-métal mais aussi les caractéristiques de cisaillement doivent être pris en compte ;
- la persistance d'un effet de l'état structural sur l'effort dans différentes conditions de terrains et d'outils avec néanmoins prédominance d'autres facteurs physiques ou facteurs liés à l'outil.

II. RELATION ENTRE TRAVAIL EFFECTUE ET BESOINS EN ENERGIE : EFFET DE L'ETAT STRUCTURAL SUR LE DEPLACEMENT DE LA BANDE DE LABOUR

1) Liaison entre effort et travail effectué

Nous avons montré sur le site de Grignon que l'évolution de l'état structural, que nous considérons comme indicatrice du travail effectué au cours du labour, était nettement moins importante dans le traitement NT que dans les traitements TT2 et TT1.

Pour tester notre hypothèse émise au § IV.B, selon laquelle l'effort n'est pas forcément révélateur des transformations d'état structural, nous devons donc comparer les efforts obtenus dans les deux groupes de parcelles.

La figure IV.D9 présentée précédemment montre que certains passages réalisés à vitesse rapide dans NT correspondent à des efforts supérieurs ou égaux à certains passages enregistrés dans les traitements tassés TT2 et TT1.

Notre hypothèse semble donc valable.

Mais nous avons quantifié l'évolution de l'état structural à l'échelle de quatre passages de charrues. Nous devons donc évaluer les efforts à la même échelle, c'est-à-dire comparer les moyennes des efforts obtenus sur T et NT sur quatre passages de charrue.

Le tableau IV.D2 montre que dans ce cas les valeurs obtenues restent distinctes entre les traitements et inférieures dans NT. Nous ne pouvons donc conclure.

Tableau IV.D.2 : Efforts de traction enregistrés dans les traitements à Grignon pour différentes vitesses d'avancement du tracteur

TRAITEMENT	NT EFFORT (daN)		TT2 EFFORT (daN)		TT1 EFFORT (daN)	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
lente 1	1366	64			1480	-
moyenne 2	1447	75			2176	-
rapide 1	1566	179			2092	-
rapide 2	1504	45	2015	218	2039	-
moyenne 2	1490	130	1840	163	1593	-
lente 2	1334	102	1800	135	1829	-

2) Déplacement des bandes de labour

a) Mode d'évaluation du déplacement

Pour tester les hypothèses émises en § IV.B, nous avons choisi de prendre le déplacement latéral comme un indicateur.

Dans la mesure où la position d'un point de la bande après labour n'est pas indépendante de la section travaillée nous avons comparé sa position à la position théoriquement prédite par un modèle de déport inspiré de Hénin *et al.* (1969) qui ne prend en compte que cette section.

Nous définissons ainsi (Fig. IV.D10, p. 216) :

- la position du point de jetée maximale B par rapport au point A (position où se situait B avant basculement) situé au niveau de la muraille ;
- la position du barycentre de la bande C par rapport à ce même point fixe ;
- les positions B' et C' prédites par le modèle simple de retournement, basé sur un double pivotement :

* pivotement au niveau du bord du soc quand le sillon est inférieur ou égal à la largeur de prise de raie, ou bien au bord du sillon si celui-ci est supérieur ;

* pivotement autour d'un second point distant du premier de la largeur du sillon basculé, c'est-à-dire de la profondeur de labour.

Après ce basculement, la bande fait un angle α avec l'horizontale tel que :

$\cos \alpha = \sqrt{1 - p^2/l^2}$, avec p et l égaux respectivement à la profondeur et la largeur de labour.

Dans chaque traitement, comme les charrues utilisées étaient des charrues 14 pouces, pour une bande de largeur l' et profondeur p', nous avons :

$B' - A = 35 + p' + l' \cos \alpha$, quand $l \leq 35$;

$B' - A = l' + p' + l' \cos \alpha$, quand $l > 35$;

avec $\sin \alpha = p/35$ où p est égal à la profondeur moyenne au niveau du profil effectué pour observer chaque situation ; nous pouvons faire cette hypothèse dans la mesure où les différences de profondeur entre sillons d'un même traitement sont faibles.

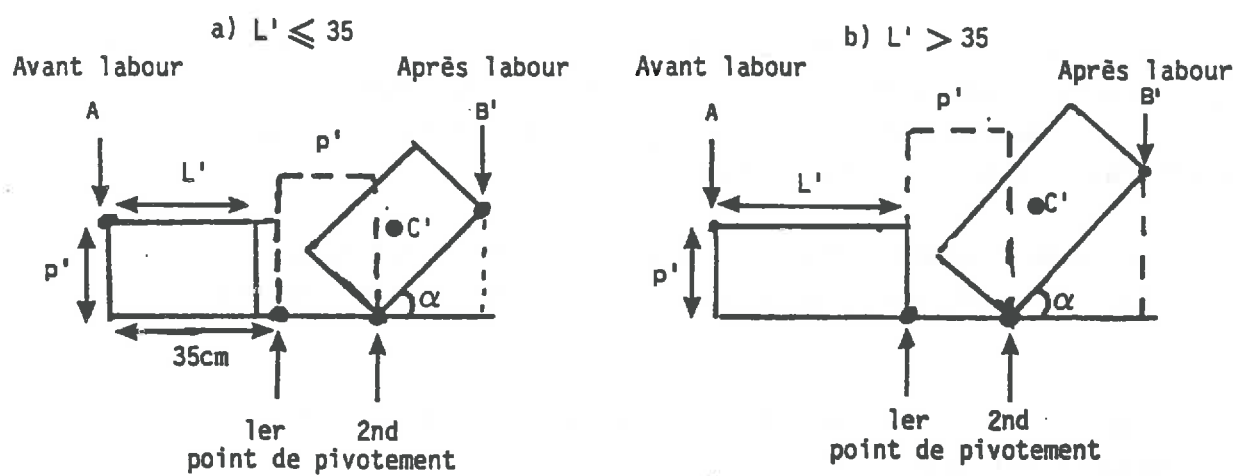
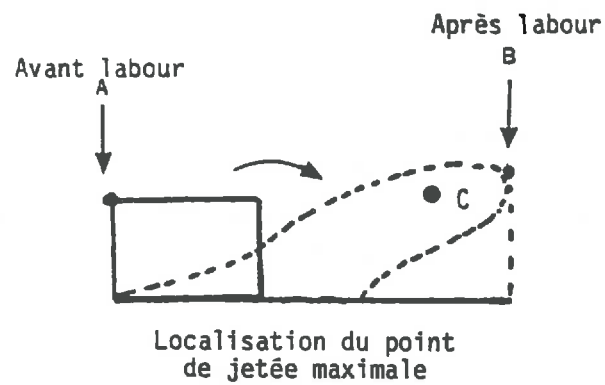
Nous pouvons alors calculer l'écart entre la position prédite et la position réelle observée :

$$PJ = B - B' = (B - A) - (B' - A).$$

Nous avons de même :

$$C - C' = (C - B) + (B - B') + (B' - C') = -H + PJ + l'/2 * \cos \alpha + p'^2/70, \text{ avec } H = B - C.$$

Nous avons alors étudié la répartition des valeurs d'écarts obtenues sur le site de Grignon pour les états structuraux et les vitesses explorés.



Modèle de pivotement

FIGURE IV.D10 : Modèle simplifié de versement de la bande de labour

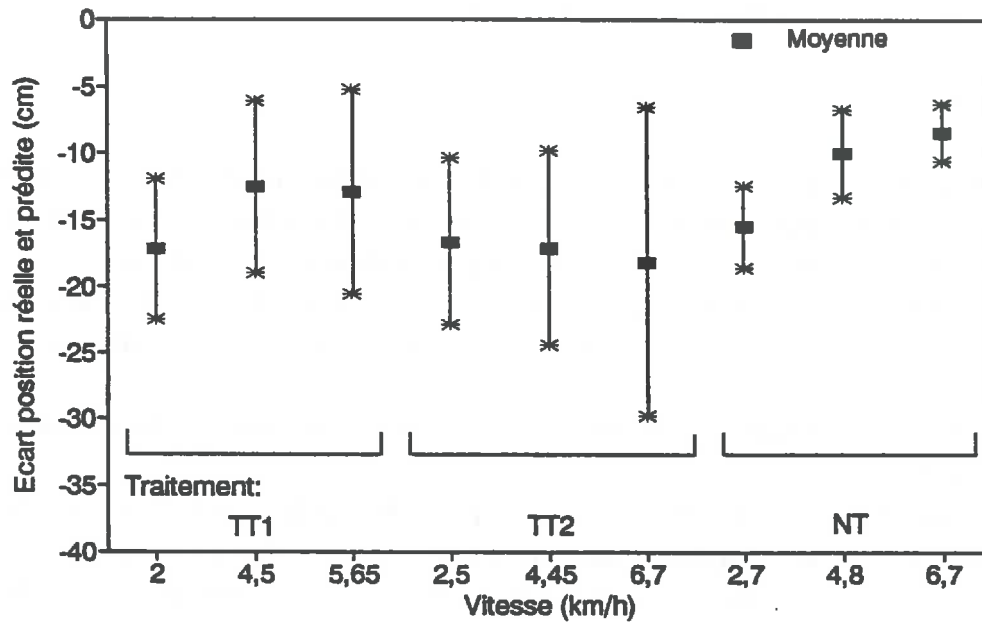


FIGURE IV.D11 : Déplacement du barycentre de la bande de labour : Ecart entre la position réelle et la position prédite par le modèle simplifié en fonction de la vitesse d'avancement du tracteur

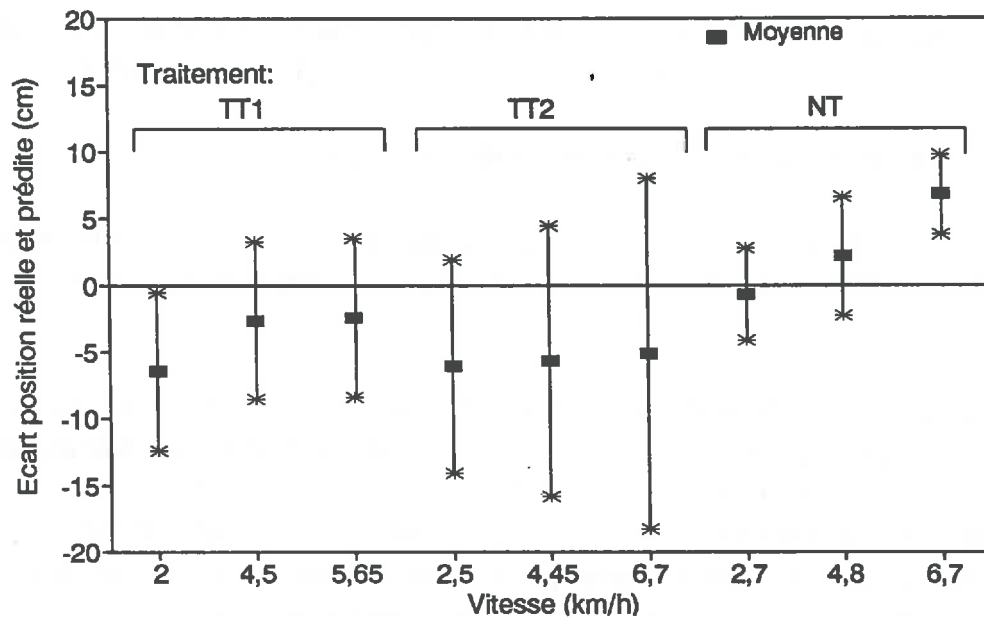


FIGURE IV.D12 : Position du point de jetée maximale de la bande de labour : Ecart entre la position réelle et la position prédite par le modèle simplifié en fonction de la vitesse d'avancement du tracteur

b) Ecart au modèle pour le barycentre

La figure IV.D11 (p. 217) montre que :

- le modèle surestime le déplacement ce qui n'est pas étonnant car le barycentre de la bande observée après labour est en fait, compte tenu de retombées de mottes de terre dans le sillon, décalé vers la muraille ; il n'y a donc pas correspondance stricte entre C et C' avec le modèle utilisé alors que la correspondance entre B et B' est forcément meilleure ; pour améliorer la correspondance il faudrait avoir un marqueur du barycentre initial et suivre son devenir ;
- les écarts aux modèles sont peu différents entre traitements mais légèrement plus importants dans NT ;
- la vitesse semble avoir peu d'effet dans les traitements tassés mais dans NT l'écart se réduit lorsque la vitesse augmente, donc le déplacement doit être plus important.

Le déplacement moyen varie donc très légèrement et semble dépendre d'une interaction traitement-vitesse.

Ce résultat pourrait s'expliquer par :

- un travail plus faible des forces intérieures au système dans NT ;
- des pertes plus importantes à vitesse lente dans NT (particules de bordure ne parcourant pas toute la trajectoire et retombant presque immédiatement) entraînant une délocalisation du barycentre vers la muraille.

L'inadéquation du modèle utilisé, demeure néanmoins fort gênante. Des travaux pour élaborer un modèle plus performant sont en cours (Roger-Estrade, com. pers.).

c) Ecart au modèle pour le point de jetée maximale.

D'après la figure IV.D12 (p. 217), le modèle semble beaucoup mieux adapté à l'évaluation du point de jetée maximale puisque l'erreur maximale est de ± 10 cm suivant les traitements.

La différence entre ceux-ci paraît beaucoup plus nette que dans le cas du barycentre. Le déplacement est plus important que prévu dans NT et moins important que prévu dans T. Il augmente avec la vitesse d'avancement du tracteur en particulier dans TT1 et NT.

Cet effet de l'état structural est d'autant plus notable que, pour une même masse de terre travaillée, la section travaillée dans les traitements tassés est plus faible que dans NT. Dans l'hypothèse d'une simple dépendance du déplacement par rapport à la masse de terre, le modèle utilisé sous-estime donc déjà le déplacement dans T et le surestime dans NT.

L'écart entre les états structuraux tassés et non tassés semble aussi augmenter avec la vitesse surtout au dessus de 5 km/h. La variabilité est néanmoins très forte dans TT2 et elle augmente avec la vitesse.

3) Conclusion

Les résultats obtenus sur Grignon semblent confirmer les hypothèses selon lesquelles :

- le déplacement des particules de terre au cours du labour n'est pas indépendant de l'état structural du sol puisqu'il est plus important dans NT que dans T pour une même masse de terre travaillée ;

- la différence de déplacements entre états structuraux se traduit plus par une élongation de la bande qu'une différence de déplacement moyen ;

- une interaction entre vitesse et état structural existe pour le déplacement.

Le déplacement moyen n'est pas totalement indépendant de l'état structural. Le travail des forces intérieures au système n'est donc probablement pas négligeable à moins que des pertes de terre ou des variations de vitesse sur le versoir ne puissent expliquer les différences observées. La vitesse moyenne en sortie de versoir doit être un peu plus faible lorsque la bande correspond à un état tassé en raison de l'augmentation des frottements sur la trajectoire.

L'analyse énergétique théorique proposée au § B ne peut donc être considérée comme valable tant que des travaux plus précis sur le déplacement n'ont pas été menés. La quantification des "pertes" lors du parcours sur le versoir paraît en particulier nécessaire pour réinterpréter les résultats.

Il apparaît d'autre part que l'effort de traction peut être un bon indicateur de l'état initial du sol pour un outil donné dans la mesure où la gamme de vitesse n'est pas trop différente entre états, mais qu'il est moins bon révélateur des transformations d'état structural et du déplacement résultant.

E. CONCLUSION

L'analyse bibliographique nous a permis d'émettre des hypothèses sur l'origine des modifications de l'effort de traction liées à l'état structural du sol. L'effort de traction ne serait pas un indicateur de tous les processus mécaniques intervenant au cours du labour si le travail des forces intérieures au système est non négligeable. Sous cette condition, il peut, en effet, y avoir une modification concomitante du déplacement de la bande de terre et de l'état de liaison entre les particules de terre, pour une même demande énergétique globale, donc sans que l'effort varie.

L'état structural pourrait modifier les processus mécaniques dont l'effort est révélateur, en modifiant la trajectoire de la bande de terre sur le versoir, le frottement sol-métal, et les caractéristiques de cisaillement.

Nous avons montré expérimentalement que les hypothèses émises sont cohérentes avec les variations d'effort observées et qu'une caractérisation du sol par sa seule densité est insuffisante. Dans deux conditions de texture et d'humidité, il a été possible de relier l'effort de traction et l'état structural. Une caractérisation des propriétés mécaniques des sols en liaison avec leur état structural apparaît indispensable.

Nos résultats montrent aussi que le déplacement de la terre dépend de l'état structural. Celui-ci modifie en particulier l'élongation de la bande de terre en interaction avec la vitesse d'avancement du tracteur sans que l'effort de traction soit révélateur de ce processus.

Nous n'avons pu confirmer l'importance du travail des forces intérieures au système, en raison de la difficulté de faire coïncider les systèmes étudiés.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail est de fournir des éléments permettant de prédire l'évolution de l'état structural de la couche labourée sous l'action d'une charrue. Il s'agit donc de déterminer les principaux facteurs conditionnant l'évolution de la structure du sol au cours du labour, facteurs liés au sol mais aussi aux caractéristiques de l'outil utilisé et au mode de conduite et de réglage de l'ensemble tracteur-charrue.

Pour cela nous avons entrepris de :

- dégager les principaux critères de la structure affectés par le labour ;
- proposer et tester une méthode de quantification de l'évolution observée.

Comme il est impossible d'effectuer une observation en continu des transformations sous l'action de l'outil, nous avons enregistré en continu l'effort de traction pour avoir un indicateur des interactions entre le sol et la machine. Nous avons cherché à discuter de la pertinence de cette variable en analysant les relations entre l'effort et les facteurs les plus déterminants de l'évolution.

*** Nous avons donc au chapitre I :**

- fait le choix de caractériser l'état structural du sol sur la base d'une analyse morphologique de l'état du sol couplée à une analyse de la porosité pour pouvoir relier les variations d'état que l'on observe à l'opération labour que l'on étudie ;

- émis des hypothèses sur les facteurs pouvant modifier l'état structural du sol après passage de la charrue et sur leur hiérarchie ; il était apparu, d'après des diagnostics au champ, que l'état structural était un facteur important dont l'effet n'était pourtant ni démontré ni quantifié ;

- choisi par conséquent d'étudier l'effet de l'état structural initial du sol sur l'état transformé tout en faisant varier les réglages de l'outil qui offraient *a priori* une marge de manoeuvre pour l'agriculteur, en particulier la vitesse d'avancement du tracteur ;

- choisi de maintenir constante entre traitements la masse de terre labourée, pour l'analyse de la relation état initial-état transformé, pour que les variations introduites dans les relations contraintes-déformation ne soient pas liées à la masse de terre mais à l'état hydrique et structural du sol et à l'outil utilisé ; nous avons pris les moyens nécessaires pour dissocier ces facteurs dans l'analyse des variations de l'effort de traction en fonction des facteurs d'évolution déterminés.

*** Au chapitre II, nous avons défini notre protocole pour l'étude de la relation état Initial-état transformé en :**

- déterminant la position des traitements en fonction de l'état préexistant sur la parcelle de manière à créer des états structuraux initiaux contrastés ; nous nous sommes prémunie contre la variabilité d'état initial perpendiculaire au sens habituel du travail car elle est la plus forte ; il a été impossible d'en faire autant pour la variabilité d'état existant dans la direction de travail des outils, variabilité qui est liée à l'irrégularité de leur travail ; nous n'avons donc

pas pu nous affranchir de certaines confusions d'effets liées à cette variabilité, mais nous avons pu grâce à nos contrôles détecter les situations où la confusion est probable ;

- adoptant un plan de sondage qui permet de décrire les états avant et après labour à une même échelle, de s'assurer que les systèmes sont comparables et donc de relier la gamme de variation des états initiaux à la gamme de variations des états finaux ;

- adoptant une caractérisation morphologique sur profil permettant de disposer de variables quantifiables représentatives de l'importance volumique et numérique des éléments structuraux étudiés et de leur assemblage ; nous avons établi une procédure qui consiste à identifier les mottes de plus de 2 cm selon leur état interne et les vides de plus de 1 cm et à évaluer la surface, la plus grande longueur et la position dans le profil des objets ainsi définis ;

- nous prémunissant du mieux possible contre les risques de confusion entre l'effet propre du labour et l'évolution ultérieure sous l'action du climat ; nous avons adopté une stratégie d'observation qui privilégie la comparaison entre les parcelles à états structuraux différenciés et qui permet une analyse préalable de l'évolution des variables au cours de la période d'observation ; nous avons dégagé les variables les plus sensibles à l'effet du climat après labour et limité notre étude aux variables les plus indépendantes de cette évolution ; cela nous a conduit à la combinaison de certaines variables pour lesquelles il devient alors impossible de dissocier l'effet du labour ; c'est ainsi qu'il nous est impossible de détecter une évolution sous l'effet du labour des mottes gamma qui soit indépendante d'une évolution de la terre fine et qu'il nous est impossible d'émettre des hypothèses différentes sur le comportement mécanique des deux catégories morphologiques ; nous apportons par contre dans les conditions expérimentales explorées une information sur l'évolution de l'état du sol sous l'action du climat (plus particulièrement sur la transformation de terre fine en mottes gamma sous l'action du climat) dont il faudrait tester à l'avenir la validité dans d'autres conditions.

*** Au chapitre III, nous avons analysé la relation entre l'état initial et l'état transformé dans une parcelle limono-argileuse très bien caractérisée, puis dans une gamme plus large de conditions physiques initiales et de modes de conduite. Nous avons globalement exploré des parcelles à textures limono-argileuses, limoneuses et argilo-limono-sableuse, à une humidité correspondant à un comportement fragile, labourées à des vitesses variant entre 2 et 8 km/h. Après avoir analysé la variabilité des états observés avant et après labour, nous avons comparé les états avant et après labour en effectuant des bilans de volumes occupés par les différents éléments structuraux caractérisés. Nous avons alors analysé les hypothèses que l'on pouvait émettre sur les processus de transformation.**

*** Au chapitre IV, nous avons cherché à établir la relation entre l'effort de traction et les facteurs déterminant l'évolution de l'état du sol, pour déterminer si l'effort serait un bon indicateur des mécanismes intermédiaires.**

Sur la base d'une analyse bibliographique nous avons émis des hypothèses sur l'origine des variations de l'effort de traction liées à l'état structural puis nous avons montré

expérimentalement que les hypothèses émises étaient cohérentes avec les variations d'effort observées

RESULTATS

Le résultat majeur qui ressort de notre analyse est la vérification expérimentale de l'effet prédominant de l'état structural initial sur l'état transformé.

Dans aucune des situations étudiées, il n'a été possible de gommer l'effet d'un tassement antérieur au labour sur la structure du sol alors que les mesures effectuées sur l'outil (vitesse de labour, profondeur de labour, effort de traction) permettaient d'affirmer que nous avons fait varier le mode conduite de l'outil dans une gamme correspondant à son emploi au champ.

Nous avons donc confirmé dans le cas du labour, les dires de Manichon & Sebillotte (1975) s'appuyant sur des diagnostics au champ, selon lesquels la confection du profil est bien dépendante de l'état antérieur, cet état étant le résultat de l'ensemble du passé cultural.

Dans certaines conditions, l'existence d'une marge d'action sur l'état final a tout de même été notée.

Nous avons en effet montré dans des conditions d'humidité moyenne (23%) et de texture limoneuse la possibilité de réduire l'écart entre les états structuraux finaux résultant d'états initiaux très contrastés en modifiant l'équipement et le mode de conduite de l'outil : augmentation de la vitesse de labour, ajout de rasettes.

Nos résultats montrent que le labour se traduit non seulement par une augmentation de volume mais aussi par une modification de l'organisation spatiale des phases solides et porales.

Les critères d'évolution retenus sont :

- l'état interne des mottes ;
- les espaces poraux ;
- le calibre des mottes.

La méthode utilisée, fondée sur des bilans de volumes et d'effectifs de certains types d'éléments structuraux, a permis :

- de hiérarchiser les facteurs conditionnant les processus de transformation au cours du labour et montrer qu'ils sont très dépendants de l'état structural du sol et moins de la vitesse ;
- de fournir des éléments de modélisation de l'évolution des critères précédents.

Il y a :

- augmentation de l'espace poral infracentimétrique lorsque l'état initial est fragmentaire, ou une augmentation de l'espace poral supracentimétrique lorsque l'état est plus continu ;
- absence de variation du volume occupé par les mottes delta fissurées et non fissurées ;
- réduction du calibre des mottes de plus de 1 cm qui semble plus importante dans le cas d'un état tassé que dans celui d'un état non tassé ; dans les traitements tassés le nombre des mottes entre 10 et 25 cm augmente alors que celui des mottes de calibre supérieur à 25 cm diminue ; dans les traitements non tassés, le nombre des mottes varie peu voire diminue au profit de la terre fine et des mottes gamma, quelques mottes de calibre supérieur à 20 cm apparaissent sous la roue de raie ;
- modification de l'état de fissuration de certaines mottes ; c'est-à-dire une augmentation de la fissuration sur les mottes de fort calibre lorsque l'état est initialement tassé.

Nous avons alors émis des hypothèses, plausibles au vu des résultats, sur les processus de transformation. Les principaux processus seraient une érosion des mottes dans les parcelles non tassées, une division des mottes avec fissuration dans les parcelles tassées. Il y aurait par ailleurs dans les parcelles non tassées un compactage de la terre fine et des mottes retombées dans la raie.

Nous n'avons pas été jusqu'à l'analyse de la distribution spatiale au sein du profil des éléments structuraux affectés, mais la méthode de caractérisation morphologique utilisée rend celle-ci possible à l'avenir. Elle pourrait être utile pour analyser le comportement mécanique de la couche labourée.

D'autre part, la variabilité de la masse de terre travaillée par un passage de charrue, qui existe malgré les précautions prises, implique d'effectuer les bilans sur une largeur pour laquelle on est sûr qu'il y a correspondance entre les systèmes observés avant et après labour. Nous n'avons pas traité ce problème d'échantillonnage en tant que tel mais une largeur de quatre passages de charrue s'est avérée satisfaisante dans notre cas.

Nous avons ensuite montré dans deux conditions de texture et d'humidité qu'il était possible de relier effort de traction et état structural initial.

L'effort est plus important lorsque l'état est initialement tassé. L'écart entre traitements diminue lorsque la masse de terre augmente par augmentation de la profondeur de labour.

Il est apparu que la dépendance entre les deux variables effort et masse de terre était fonction des conditions de réglages de l'outil (vitesse et profondeur de travail). Mais, la masse de terre labourée ne suffit pas à expliquer les différences d'effort constatées entre les états structuraux. Dans les études de mécanique du sol la variable densité du sol est souvent utilisée pour prendre en compte des différences de masses de terre travaillées qui

jouent sur l'effort de traction. Notre analyse montre que cette variable ne suffit pas pour l'interprétation des relations précédentes.

Les variations de l'effort en fonction de l'état structural pourraient être liées à des modifications des caractéristiques de cisaillement de la bande de terre, du frottement sol-métal ou de la trajectoire sur le versoir.

Notre analyse semblerait néanmoins indiquer que l'effort de traction ne fournit pas des indications sur l'ensemble des processus mécaniques en raison du travail des forces intérieures au système bande de labour qui n'est probablement pas négligeable.

Le déplacement des bandes labourées est en effet révélateur d'élongation différentes des bandes selon l'état structural donc de contraintes mécaniques intrabandes différentes.

L'état de liaison des particules et le déplacement de la bande peuvent varier de manière concomitante sans que le bilan énergétique global ne soit modifié.

Il nous a pourtant été impossible de démontrer expérimentalement qu'il pouvait y avoir indépendance entre la variation d'état structural observée sous l'effet du labour et l'effort de traction car les échelles auxquelles nous avons quantifié les variations d'état et le fonctionnement de l'outil sont différentes.

L'analyse de l'effort de traction semble montrer que celui-ci est indicateur de l'état structural initial. L'effort ne permet par contre pas de dissocier le déplacement de la bande de terre des transformations d'état structural qu'elle subit. Il n'est donc pas un bon indicateur des transformations d'état si le travail des forces intérieures à la bande est important. Une étude cinématique, pour des états structuraux contrastés, de la formation des plans de cisaillement en avant du soc, conduisant à la définition de la bande de terre montant sur le versoir, et de la trajectoire de cette bande de terre sur l'ensemble soc+versoir devrait permettre, accompagnée de mesures de frottements et d'effort, de :

- tester les hypothèses sur les lieux où l'état structural modifie les processus mécaniques dont l'effort est révélateur ;
- déterminer les importances respectives des paramètres dégagés par l'analyse théorique quant aux variations d'interactions sol-outil observées.

Le couplage de cette étude avec une caractérisation de l'état structural obtenu permettrait alors de dégager les processus mécaniques dont l'effort n'est pas révélateur.

APPORTS ET PERSPECTIVES

Nos travaux contribuent à :

- la modélisation de l'évolution des états structuraux au champ ;
- la détermination des possibilités de contrôle des états structuraux ;
- la caractérisation de l'état structural de la couche labourée.

Ils ouvrent des perspectives dans le domaine de l'étude des systèmes de culture et la caractérisation des états pour l'étude d'une meilleure maîtrise des pollutions et du fonctionnement du peuplement végétal.

1) Modélisation de l'évolution des états structuraux au champ

Nos travaux qui devraient contribuer à l'aide à la décision en matière de labour soulignent l'importance de l'état structural initial, donc renforcent la nécessité :

- de s'intéresser aux effets cumulatifs des systèmes de cultures sur l'état du sol ;
- de ne juger, prévoir, décider à l'échelle de l'itinéraire technique, comparer des techniques de travail du sol qu'en référence à l'état dû au précédent cultural.

L'aide à la décision pour une opération de travail du sol sera d'autant plus pertinente que les connaissances sur l'évolution des états à l'échelle non plus de l'opération culturale mais du système de culture ou de l'itinéraire technique seront développées. Des travaux relatifs à cette dernière échelle sont actuellement en cours à la Chaire d'Agronomie de l'INA-PG.

Pour un système de culture donné nous montrons qu'une marge de manoeuvre existe pour l'agriculteur, s'il joue sur les réglages de son outil. Un effet de la vitesse de labour et des rasettes a pu être détecté sur certains sites prospectés lorsqu'on maintient la profondeur de labour. Mais la profondeur de labour diminue le plus souvent lorsque la vitesse augmente et le contrôle des réglages est difficile à assurer. L'agriculteur travaille généralement en contrôle d'effort ce qui entraîne une diminution de la profondeur de travail dans les parcelles tassées, où la masse de terre théoriquement labourée est supérieure à celle d'une parcelle non tassée pour un réglage de profondeur donné. Cette diminution de profondeur n'est pas proportionnelle à la masse de terre puisque nous avons montré que cette variable ne suffisait pas à expliquer les variations d'effort liées au sol. Le contrôle des réglages par l'effort est difficilement exploitable actuellement.

Pour exploiter au mieux cette marge de manoeuvre, il faudrait disposer de résultats plus précis dans d'autres gammes d'humidité et de texture. L'analyse d'un réseau offrant une gamme large de conditions agricoles a montré qu'il est difficile de réaliser ce travail si l'on

n'assure pas un contrôle aussi fin que dans l'expérimentation qui nous a servi à établir la relation "état initial-état transformé". Il apparaît désormais préférable d'analyser quelques situations bien contrôlées et contrastées.

Ceci implique, comme nous l'avons montré, des précautions telles qu'il était impossible de réaliser un tel objectif dans le cadre de nos travaux pour des raisons pratiques. Les résultats auxquels ces derniers ont conduit justifient néanmoins l'application de la méthode à des situations sèches (humidité proche de la limite de retrait) et argileuses.

On pourrait alors fournir à l'agriculteur des procédures d'intervention en fonction de l'état physique du sol et de l'équipement disponible pour le démarrage des travaux, le choix des parcelles et le mode de conduite du labour qui intègrent l'effet des systèmes de culture.

Les procédures ne seront alors transformées en modèles d'action par l'agriculteur que si elles sont compatibles avec l'ensemble des contraintes qui pèsent sur ses décisions (Papy *et al.*, 1991). Ces contraintes ne s'évaluent plus à l'échelle de la parcelle mais de l'exploitation (Papy *et al.*, 1990).

2) Contrôle des états

Le contrôle des états sera d'autant mieux assuré que les procédures d'intervention seront simples et automatisées. Pour définir les modalités d'action, il faut tout d'abord identifier les limites de pilotage du labour.

Ce pilotage pourrait se traduire par :

- des choix stratégiques en matière d'équipement : choix des ensembles tracteurs-charrue ; nous n'avons pas étudié cet aspect ;
- des règles de réglage de la charrue (vitesse, profondeur) ;
- à terme, un réglage automatique en temps réel de la charrue sur la base de mesures d'indicateurs fiables et simples comme l'effort de traction ; cet automatisme présenterait l'intérêt de simplifier les procédures de l'agriculteur et d'alléger ainsi ses tâches (progrès ergonomique).

Nous avons montré que l'automatisation des réglages ne saurait être efficace tant que des connaissances sur les processus mécaniques à un pas de temps inférieur à celui analysé, et une décomposition par les mécaniciens des effets de l'état structural au cours du parcours de la bande de terre sur l'ensemble soc+ versoir, ne sont pas acquises.

3) Caractérisation des états structuraux

Nos résultats donnent des éléments de modélisation de l'évolution au cours du labour de variables caractéristiques des milieux hétérogènes tels que les calibres des éléments structuraux et des "vides". Ils démontrent la possibilité de les localiser et de quantifier le volume qu'ils occupent.

Cet apport de nos travaux quant à la caractérisation des états structuraux doit servir pour l'étude des transferts de matières polluantes et l'étude du fonctionnement du peuplement végétal.

Actuellement, les travaux au champ sur les transferts hydriques en phase liquide ou gazeuse concernent essentiellement des systèmes en non travail du sol (Guérif, 1991), dont l'état morphologique correspond peu aux états après labour car les facteurs de structuration sont différents : l'évolution de l'état du sol en absence de travail du sol se fait en effet principalement sous l'action du climat, conduisant à un état de pseudo-équilibre qui dépend de l'interaction entre la nature du matériau, le climat, et les pratiques de l'agriculteur ; l'état tend vers un état continu et isotrope par diminution de la porosité totale de la couche préalablement travaillée.

Les variables de caractérisation de l'état structural du sol utilisées jusqu'à présent pour l'étude de la conductivité hydraulique et de la diffusion des nitrates risquent devenir inopérantes en système avec labour car les surfaces de contact sont modifiées par la taille et l'organisation spatiale des éléments structuraux qui sont variables dans ces systèmes.

La caractérisation que nous avons adoptée offre, par contre, le possibilité d'étudier l'effet de l'hétérogénéité de la structure des sols sur les propriétés de transfert. Elle fournit aussi des critères de description pour l'étude de l'effet de la taille et de la disposition spatiale des éléments structuraux sur l'hétérogénéité spatiale du système racinaire et des prélèvement par la plante qui dépendent bien entendu de celle-ci (Tardieu, 1987 ; Masse *et al.*, 1988 ; Caneill & Bodet, 1991).

Les variables dont nous avons cherché à modéliser l'évolution pourraient servir à la conception de modèles de transferts gazeux et liquides et de fonctionnement du système racinaire prenant en compte l'hétérogénéité de la couche labourée.

On pourrait alors déterminer les limites des modèles tels que celui proposé par Porter & Mc Mahon (1990), qui simule les propriétés physiques des sols (en particulier la conductivité hydraulique) indépendamment de leur structure.

Des perspectives de mise en relation entre les travaux sur le contrôle des états structuraux et ceux sur l'effet des états structuraux sur le fonctionnement des plantes s'ouvrent alors : la définition qui serait établie des caractéristiques du sol souhaitables pour un fonctionnement des plantes pourrait être confrontée aux possibilités de l'agriculteur de réaliser ces états. On pourrait alors identifier la conduite à proposer à l'agriculteur pour contrôler au mieux les états du sol en vue d'un meilleur fonctionnement de la plante.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Andersson S., Håkansson I., 1963. Markfysikaliska undersökningar på odlad jord, XIV, Om ett par nya metoder att bestämma markens mikrotopografi, dess höjdförändringar och markens porositet. Grundförbättring, 16, n°1.

Aubry C., Capdeville J., 1985. Consommation de fuel domestique par les engins agricoles : Influence du facteur "sol" et du mode de conduite du matériel. Bull. tech. Inf., 396, 3-26.

Barthélémy P., Boissongontier D., 1990. Point technico-économique sur le travail superficiel. Perspect. agric., 147, 79-84.

Baumer K., 1976. Direct-drilling of cereals. In "Semaines d'études sur la céréaliculture, cereals crops", 6-10/09/1976. C.R. de séances, Fac. Sci. agron. Gembloux, Ed. Martens P. Presses Agron. Gembloux, 191-203.

Baver L.D., Gardner W.H., Gardner W.R., 1972. Soils Physics. Chap. 3. John Wiley and Sons, Inc, 74-129.

Bertuzzi P., Bruckler L., Gabilly Y., Gaudu J.C., 1987. Calibration, field testing and error analysis of a gamma ray probe for *in situ* measurement of dry bulk density. Soil Sci., 144(6), 425-436.

Besançon E., 1988. Vision par ordinateur en deux et trois dimensions. Ed. Eyrolles, Paris, 411 p.

Billot J.F., 1974. Quelques mesures effectuées sur les outils de travail du sol, essai de mise en évidence de l'action des outils sur le sol. Ingénieurs de l'automobile, 5, 304-307.

Billot J.F., 1977. Labour et évolution des charrues. Fermes mod., n° hors série : Le travail du sol, 41-46.

Billot J.F., 1982. Les applications agronomiques de la pénétrométrie à l'étude de la structure des sols travaillés. Sci. Sol, 3, 187-202.

Billot J.F., 1989. Pénétrométrie, choix des outils et dates de travail du sol. In "Land and Water use", Eds. Dodd et Grace, Balkema, Rotterdam, 1729-1736.

Billot J.F., Palomo J., Marionneau A., 1977. Utilisation d'un pénétromètre enregistreur de précision pour l'étude du tassement du sol par les roues des engins agricoles. CNEEMA, BI, n°237.

Binesse M., 1970. Cisaillement et résistance spécifique du sol lors du labour classique. Etudes du CNEMAA, n°341-342.

Boiffin J., Guérif J., Stengel P., 1990. Processus d'évolution de l'état structural du sol : quelques exemples d'études expérimentales récentes. In Actes du colloque "La structure des sols et son évolution". Eds. Boiffin J. et Marin-Laflèche A., INRA Laon, 37-69.

Boiffin J., Picard D., 1989. Analyse et diagnostic de la fertilité. Nouveaux éléments. In "Fertilité et systèmes de production", sous la direction de M. Sebillotte, Chap. 3, 133-207.

Boiffin J., Sebillotte M., Couvreur F., 1976. Incidence de la simplification du travail du sol sur l'élaboration des rendements du blé et du maïs. In "Simplification du travail du sol en production céréalière". Colloque ITCF, 239-280.

Boissongontier D., Barthélémy P., 1989. Travail du sol : comment réduire les coûts de mécanisation. Perspect. agric., 139, 15-26.

Boissongontier D., Poret S., Truong H.H., 1988. Techniques de travail du sol : La recherche de l'économie. Perspect. agric., 129, 34-38.

Bouillot R., 1987. Cours de photographie, technique et pratique en 25 leçons. 4ème éd, publications Paul Montel, Editions Radio, Paris, 199 p.

Boulaine J., 1990. Deux siècles de fertilisation minérale. In "Deux siècles de progrès pour l'agriculture et l'alimentation 1789-1989". Acad. agric. Fr., Tec. et Doc. Lavoisier, 131-146.

Bradford J.M., Culley J.L.B., Larson W.E., 1989. Advances in soil mechanics and related processes in agricultural soils. the North american perspective. In "Mechanics and related processes in agricultural soils", Ed. W.E. Larson et al., NATO ASI Series. Ser. E : Applied Sciences. Kluwer Academic pub., Vol. 172, 1-8..

Brereton J.C., Mc Gowan M., Dawkins T.C.K., 1986. The relative sensitivity of spring barley, spring field beans and sugar beet crops to soil compaction. *Field Crop Res.*, 13, 223-232.

Bruckler L., 1983. Rôle des propriétés physiques du lit de semence sur l'imbibition et la germination. II - Contrôle expérimental d'un modèle d'imbibition des semences et possibilités d'application. *Agronomie*, 3(3), 223-232.

Callot G., Chamayou H., Maertens C., Salsac L., 1982. Les interactions sol-racine, incidence sur la nutrition minérale. INRA, 325 p.

Canarache A., 1965. Les facteurs de la résistance mécanique des sols et les méthodes utilisées pour les étudier. *Sci. Sol*, 2, 89-107.

Caneill J., Bodet J.M., 1991. Simplification du travail du sol et rendement des cultures, conséquences sur les systèmes de culture. In Actes du colloque "*Simplification du travail du sol*", ITCF, à paraître.

Cassel D.K., 1982. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. In "*Predicting tillage effects on soil physical properties and processes*". ASA.SSA. USA, chap. 4, 45-67.

Cassel D.K., Nelson L.A., 1985. Spatial and temporal variability of soil physical properties of Norfolk loamy sand as affected by tillage. *Soil Tillage Res.*, 5, 5-17.

Cauderon A., 1990. Espèces, variétés et semences dans l'évolution de la production végétale en France (1789-1989). In "*Deux siècles de progrès pour l'agriculture et l'alimentation 1789-1989*". Acad. Agric. Fr., Tec. et Doc. Lavoisier, 147-168.

CEMAGREF, 1981. Les matériels de labour et de préparation du sol. Livre du maître (tome II). Principales machines agricoles de culture et de récolte. 2ème partie, 4ème leçon, 101-129.

Cerf M., Sebillotte M., 1988. Le concept de modèle général et l'analyse de la prise de décision technique. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74(4), 71-80.

Chopart J.L., Nicou R., 1976. Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. *Agron. trop.*, 31, 7-28.

Chrétien J., 1982. L'espace poral du sol, ses composantes, exemple d'une méthode d'étude. In "*Séminaire du Département de Science du Sol*", INRA, Pech-Rouge, 10-24.

Christian D.G., Miller D.P., 1986. Straw incorporation by different tillage systems and the effect on growth and yield of winter oats. *Soil Tillage Res.*, 8, 239-252.

Clyde A.W., 1944. Technical features of tillage tools. *Pa. Agril. Expt. Sta. Bull.*, USA, 465.

CNEEMA, 1964. Recherche de l'efficacité optimum des tracteurs agricoles. Etudes du CNEEMA, n°123.

Conclusions du NATO Advanced Research Workshop, 1989. Mechanics and related processes in structured agricultural soils. In "*Mechanics and related processes in agricultural soils*", Ed. W.E. Larson *et al.*, NATO ASI Series. Ser. E : Applied Sciences. Kluwer Academic pub., vol.172.

Cordier Y., Vitlox O., Frankinet M., 1979. Labour, demi-labour ou semis direct en continu : Conséquences géotechniques. *Bull. Rech. agron. Gembloux*, 14(2), 121-142.

Coster M., Chermant J., 1989. Précis d'analyse d'images. CNRS plus, Ed. CNRS, 545 p.

Coulomb C.A., 1776, cité par Mc Kyes (1985). Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Acad. royale des Sciences : Mémoires de Mathématique et de Physique, présentés à l'Académie royale des Sciences, par divers savants et lus dans les Assemblées, Paris. Vol. 7, 343-382 + 2 plates.

Coulomb I., Manichon H., Roger-Estrade J., 1990. Evolution de l'état structural sous l'action des systèmes de culture. In Actes du colloque "*La structure des sols et son évolution*". Eds. Boiffin J. et Marin-Laflèche A., INRA Laon, 137-155.

Cowell P.A., Len S.C., 1967. Field performance of tractor draught control systems. *J. agric. Eng. Res.*, 12(3), 205-221.

Curmi P., 1987(a). Comportement physique intrinsèque de mottes à macroporosités différentes. In *"Soil compaction and Regeneration"*, Ed. G. Monnier et M.J. Gosse, Balkema, Rotterdam, Boston, 53-58.

Curmi P., 1987(b). Relation entre l'espace poral du sol et son fonctionnement hydrique. Conférence invitée au XXIème congrès brésilien de Science du sol. Campinas.

Dagnelie P., 1975. Théories et méthodes statistiques. Les Presses Agronomiques de Gembloux, 2ème éd., Gembloux, Vol. 2(23), 390-392.

Dalleine E., 1978. Les façons en travail du sol. Tome II. Etudes du CNEEMA, n°438.

Dalleine E., Billot J.F., 1975. Evolution des matériels de travail du sol. Bull. tech. Inf., n°302-303.

Dantu P., 1957. Contribution à l'étude mécanique et géométrique des milieux pulvérulents. Proc. of the 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 1, Butterworth, 144-148.

Daudin J., 1983. Logiciel AVARE.

De Leon F., 1991. Morphologie - Propriétés physiques et conditions de formation des éléments structuraux de la couche labourée. Contribution à l'interprétation du profil cultural. Thèse INA-PG, 133 p. + annexes.

Debaecke P., 1987. Effet des systèmes de culture sur la flore adventice dicotylédone annuelle. Thèse Docteur Ingénieur INA-PG, 342 p. + annexes.

Decocq G., Riga A., 1976. Pratiques culturales et développement racinaire de l'avoine, du froment d'hiver et de l'orge de printemps. In *"Semaines d'études sur la céréaliculture, cereals crops"*, 6-10/09/1976. C.R. de séances. Fac. Sci. agron. Gembloux, Ed. Martens P., Presses Agron. Gembloux, 227-239.

Dexter A.R., 1976. Internal structure of tilled soils. J. Soil Sci., 27, 267-278.

Dexter A.R., 1977. A statistical measure of the structure of tilled soils. J. agric. Eng. Res., 22, 101-104.

Dexter A.R., 1988-a. Strength of soil aggregates and of aggregate beds. In *"Impact of water and external forces on soil structure"*, Eds. Drescher, Horn et De Boodt, Catena sup. 11. Catena Verlag D. 3302 Cremlingen Dested, W.Germany, 35-52.

Dexter A.R., 1988-b. Advances in characterization of soil structure. Soil Tillage Res., 11, 199-238.

Douglas J.T., Goss M.J., 1982. Stability and organic matter content of surface soil aggregates under different method of cultivation and in grassland. Soil Tillage Res., 2, 155-175.

Dürr C., Boiffin J., Coulomb I., Maillet I., 1990. Influence of emergence delay and seedbed conditions on sugar beet seedling vigor. 1st Congress of the E.S.A., Paris, 5-7/12/1990, Proc., Session 3, 10. Poster.

Dürr C., Manichon H., Sebillotte M., Aubineau M., 1979. Travail du sol. In *"Pratique du conseil en Agronomie"*, APCA, Paris.

Ellis B., Barnes B.T., 1973. Estimation of the distribution of living roots of plant under field conditions. Plant Soil, 81-91.

Encyclopédie Agricole Pratique, 1984. La charrue à socs. Huard-Agri Nathan, Ed. de la nouvelle librairie. Département Agri Nathan International, 96 p..

Faure A., 1969. Contribution à l'action d'un versoir sur le sol. I - Etude de la géométrie des versoirs, classification. Ann. agron., 20(6), 565-595.

Faure A., 1970. Contribution à l'étude de l'action d'un versoir sur le sol travaillé par un versoir de charrue. Ann. agron., 21(2), 159-195.

Faure A., 1971. Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. Ann. agron., 22, 487-520.

Faure A., 1980. A new conception of the plastic and liquid limits of clay. Soil Tillage Res., 1, 97-105.

- Faure A., Fiès J.C., 1972. Etude expérimentale de la sensibilité au compactage des matériaux meubles, fonction de leur composition granulométrique. *Ann. agron.*, 23(3), 317-331.
- Feuerlein W., 1960. Die Pflugarbeit und ihre Beurteilung. *Grundlag. der Lantech.*, 12, 44-50.
- Feuerlein W., 1966-a. Characterization of good ploughing. How the ploughing is judged at the world ploughing contest. *Grundförbattring*, 19, 241-250.
- Feuerlein W., 1966-b. Die Beurteilung des Pflügens. *Landbauforschung Völkenrode*, 1, 31-36.
- Fielke J.M., Riley T.W., 1991. The universal earthmoving equation applied to chisel plough wings. *J. Terramechanics*, 28(1), 11-19.
- Fiès J.C., 1982. Constitution physique du sol. *Encyclopédie Tech. agric.*, Ed. Techniques, Paris, 1130.
- Fiès J.C., 1984. Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelette : Comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie à mercure. *Agronomie*, 4(9), 891-899.
- Fleury A., 1982. Les problèmes techniques du semis. *Sci. Sol*, 3, 173-185.
- Fountaine E.R., Brown N.J., Payne J.C.J., 1956. The measurement of soil workability. 6ème Congrès de la Science du sol, VI(3), 495-504.
- Fourbet J.F., 1975. Effets à long terme des techniques simplifiées. In *"La simplification des techniques de travail du sol"*. S.E.I. INRA. Etude n°59, 145-204.
- Frankinet M., Ben Harrath A., 1976. Influence des techniques de travail du sol sur l'humidité du sol. In *"Semaines d'études sur la céréaliculture, cereals crops"*, 6-10/09/1976. C.R. de séances. Fac. Sci. agron. Gembloux, Ed. Martens P. Presses Agron. Gembloux., 205-213.
- Frede H.G., 1987. The importance of pore volume and pore geometry to soil aeration. In *"Soil compaction and Regeneration"*, Ed. G. Monnier et M.J. Gosse, Balkema, Rotterdam, Boston, 25-29.
- Gardner W.R., 1956. Representation of Soil Aggregate-size Distribution by a Logarithmic-Normal Distribution. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 151-153.
- Gee-Clough D., Mc Allister M., Pearson G., Evernden D.W., 1978. The empirical prediction of tractor implement field performance. *J. Terramechanics*, 15, 81-94.
- Gill W.R., Mc Creery W.F., 1960. Relation of size of cut to tillage tool efficiency. *Agric. Eng.*, 41, 372-374 et 381.
- Gill W.R., Vandenberg G.E., 1967. Soil dynamics in tillage and traction. *Agricultural Handbook*, n°316. Agricultural Research Service. US department of agriculture.
- Girma G., 1989-a. Measurement and prediction of forces on plough bodies. 1. Measurement of forces and soil dynamic parameters. In *"Land and Water use"*, Eds. Dodd et Grace, Balkema, Rotterdam, 1539-1545.
- Girma G., 1989-b. Multicomponent dynamometer for measurement of forces on plough bodies. *J. agric. Eng. Res.*, 42, 85-96.
- Godwin R., Spoor G., 1977. Soils factors influencing work day. *The Agricultural Engineer*, 87-90.
- Goss M.J., Howse K.R., Harris W., 1978. Effects of cultivation on soil water retention and water use by cereals in clay soils. *J. Soil Sci.*, 29, 475-488.
- Granger P.M., 1986. ISURO. L'optique dans l'audiovisuel, cinéma, photo, vidéo. 2ème éd., Ed. V.M., Paris, 217 p.
- Guérif J., 1982-a. La matière organique du sol et son évolution. *Bull. tech. Inf.*, 370/372, 443-450.
- Guérif J., 1982-b. Compactage d'un massif d'agréats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 2(3), 287-294.
- Guérif J., 1984. The influence of water content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. *J. agric. Eng. Res.*, 29, 367-374.
- Guérif J., 1988-a. Mécanismes du compactage. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74(1), 9-28.

Guérif J., 1988-b. 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.

Guérif J., 1990. Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. In *Actes du colloque "La structure des sols et son évolution"*, Eds. Boiffin J. et Marin-Laflèche A., INRA Laon, 71-90.

Guérif J., 1991. Evolution du milieu physique et chimique. In *Actes du colloque "Simplification du travail du sol"*, ITCF, à paraître.

Gupta C.P., Pandya A.C., 1967. Behaviour of soil under dynamic loading : Its application to tillage implements. *Transaction of the A.S.A.E.*, n°10, 352-358, 363.

Gupta C.P., Surendranath T., 1989. Stress field in soil sowing to tillage tool interaction. *Soil Tillage Res.*, 13, 123-149.

Guyon E., Roux S., 1987. Les matériaux hétérogènes. *La Recherche*, n°191, Vol. 18, 1050-1058.

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., 1983. Energy efficiency in tilling dry clod-forming soils. *Soil Tillage Res.*, 3, 47-59.

Hadas A., Wolf D., Meirson I., 1978. Tillage implements - Soil structure relationships and their effects on crop stands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, 632-637.

Håkansson I., 1988. A method for characterizing the state of compactness of an arable soil. In *"Impact of water and external forces on soil structure"*, Catena sup. 11., Drescher, Horn et de Boodt Eds, 101-105.

Hallaire V., 1987. Méthode de mesure du retrait vertical d'un sol argileux. In *"Soil compaction and Regeneration"*, Ed. G. Monnier et M.J. Gosse, Balkema, Rotterdam, Boston, 85-94.

Hamblin A.P., Tennant D., 1979. Interactions between soil type and tillage level in a dryland situation. *Aust. J. Soil. Res.*, 17, 177-189.

Hébert J., 1969. La fumure azotée du blé d'hiver. *Bull. tech. Inf.*, 244, 755-766.

Hénin S., 1977. Chap.II : Propriétés mécaniques des sols. In *"Cours de physique du sol II"*, ORSTOM editest., 167-199.

Hénin S., 1978. Les flux des polluants entre l'exploitation agricole et son environnement. In *"Exigences nouvelles pour l'agriculture : Les systèmes de culture pourront-ils s'adapter ?"*, ADEPRINA, Cycle supérieur d'Agronomie organisé par Boiffin J., Huet Ph., Sebillotte M.

Hénin S., Feodoroff A., Gras R., Monnier G., 1960. Le profil cultural. 1ère éd., Masson, Paris, 320 p.

Hénin S., Feodoroff A., Gras R., Monnier G., 1969. Chap. IV : Amélioration du profil cultural. II - Le travail du sol. In *"Le profil cultural"*, 2ème éd., Masson, Paris, 173-198.

Hettiaratchi D.R.P., 1988. Theoretical soil mechanics and implement design. *Soil Tillage Res.*, 11, 325-347.

Hettiaratchi D.R.P., O'Callaghan J.R., 1980. Mechanical behaviour of agricultural soils. *J. agric. Eng. Res.*, 25, 239-259.

Hillel D., 1980. Tillage and soil structure management. In *"Applications of soil physics"*, Chap. 9, 234-244.

Hodgson J.M., 1976. Soil Survey Field Handbook. Tech. Monogr. n°5, Soil Survey G.B.

Holmes J.C., 1976. Effects of tillage direct-drilling and nitrogen in a long term barley monoculture system. In *"Semaines d'études sur la céréaliculture, cereals crops"*, 6-10/09/1976. C.R. de séances. Fac. Sci. agron. Gembloux, Ed. Martens P. Presses Agron. Gembloux, 177-183.

Hong T., 1990. Contribution à la modélisation des performances de traction d'un tracteur agricole au labour. Thèse Docteur Ingénieur ENSA de Montpellier, 209 p.

I2S, 1990. Support de cours vision 2D. Bordeaux.

- INRA-AVIGNON, Science du Sol, 1984. Double sonde gammamétrie. Doc. mult, Monfavet.
- Keen B.A., Haines W.B., 1925. Studies of soil cultivation. J. agric. Sci., XV, 375-406.
- Koolen A.J., 1978. The influence of soil compaction process on subsequent soil tillage processes. A new research method. Neth. J. agric. Sci., 26, 191-199.
- Koolen A.J., Kuipers H., 1983. Plows bodies. In "Agricultural soil mechanics", Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 196-219.
- Kouwenhoven J.K., Terpestra R., 1972. Characterization of soil handling with mouldboard ploughs. Neth. J. agric. Sci., 180-192.
- Kouwenhoven J.K., Terpestra R., 1979. Sorting action of tines and time-like tools in the field. J. agric. Eng. Res., 24, 95-113.
- Kuipers H., Van Ouwerkerk C., Poesse G.J., 1966. The characterization of soil structure changes produced by tillage operations. Grundförbatring, 19, 59-75.
- Kuipers H., Koolen A.J., 1989. Interface between implements, tillage, and soil structure. In "Mechanics and related processes in agricultural soils", Ed. W.E. Larson et al., NATO ASI Series. Ser. E : Applied Sciences. Kluwer Academic pub., Vol. 172.
- Lemmet S., 1985. Double sonde gammamétrie LPC-INRA. Validation expérimentale du fonctionnement de la sonde. Mémoire 2ème année, ENITH Angers, 42 p. + annexes.
- Low A.J., 1972. The effect of cultivation on the structure and other physical characteristics of grassland and arable soils (1945-1970). J. Soil Sci., 23(4), 363-379.
- Lyles L., Woodruff N.P., 1961. Surface of soil cloddiness in relation to soil density at time of tillage. Soil Sci., 178-182.
- Maertens C., 1964. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. Sci. Sol, 2, 31-41.
- Maertens C., Masse J., Picard D., Tardieu F., 1987. Mise en place et fonctionnement du système racinaire des principales espèces cultivées : recherches en cours à l'INRA et l'ITCF. Perspect. agric., 119, 6-12.
- Manichon H., 1982-a. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Docteur ingénieur INA-PG, Paris, 214 p. + annexes.
- Manichon H., 1982-b. L'action des outils sur le sol : Appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. Sci. Sol, Bull. AFES n°3.
- Manichon H., 1982-c. Comportement physique et mécanique des sols, le point de vue de l'agronome. In "Séminaire du département de Science du sol" INRA, Pech-Rouge, 75-79.
- Manichon H., 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. In "Soil compaction and Regeneration", Ed. G. Monnier et M.J. Gosse, Balkema, Rotterdam, Boston, 39-52.
- Manichon H., 1988. Compactage, décompactage du sol et systèmes de culture. C.R. Acad. Agric. Fr., 74(1), 43-54.
- Manichon H., Bodet J.M., 1976. Incidence de la simplification du travail du sol sur l'évolution des profils culturaux. In "Simplification du travail du sol en production céréalière". Colloque ITCF, 109-131.
- Manichon H., Gautronneau Y., 1987. Guide méthodique du profil cultural. CEREF/GEARA, Lyon, 71 p.
- Manichon H., Roger-Estrade J., 1989. Diagnostic sur l'état du profil cultural et le nivellement de la surface du sol en maraîchage sous abri. Doc. mult. Chaire d'Agronomie INA-PG/INRA-SAD Alénia et CA des Pyrénées Orientales, 27 p.
- Manichon H., Roger-Estrade J., 1990. Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. In "Les systèmes de culture", Eds. Combes et Picard, INRA, 27-55.

Manichon H., Roger-Estrade J., Leterme Ph., 1988. Analyse des profils culturaux et des itinéraires techniques. Conséquences pour le blé. Doc. Mult. INA-PG, Chaire d'Agronomie. Convention INRA/ONIC, volet 2, RCI.

Manichon H., Sebillotte M., 1973. Etude de la monoculture du maïs. Résultats d'enquêtes agronomiques en Béarn. Doc. mult. Chaire d'Agronomie, INA-PG.

Manichon H., Sebillotte M., 1975. Analyse et prévision des conséquences des passages successifs d'outils sur le profil cultural. Bull. tech. Inf., 302/303, 569-577.

Masle J., Passioura J., 1987. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. Aust. J. Plant. Physiol., 643-656.

Masse J., Rémy J.C., Mary B., Crosson P., 1988. Fonctionnement racinaire : utilisation du marquage isotopique des nitrates. Perspect. agric., 122, 29-33.

Mayauskas I.S., 1958. Translation by E. Harris, Investigation of the pressure distribution on the surface of a plough share in work. Traktori i selkhozmarshing, 11(23), 186-190.

Mérieux S., Bournas L., Guérin A., 1990. L'académie d'agriculture et l'évolution des moyens de production. In "Deux siècles de progrès pour l'agriculture et l'alimentation 1789-1989". Acad. Agric. Fr., Tec. et Doc. Lavoisier, 117-120.

Mesri D., 1982. Etude des corps de charrue pour labours rapides et quelques conséquences pour l'accroissement de la vitesse de travail. Thèse Docteur Ingénieur INA-PG, Paris, 144 p.

Mettauer H., Hinsinger P., 1989. De l'application de la perméabilité à l'air du sol en agronomie. II - 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., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse, Paris.

Monnier G., Guérif J., 1988. Conséquences physiques et agronomiques du tassement des sols. C.R. Acad. Agric. Fr., 74(1), 29-42.

Monnier G., Stengel P., 1982. Structure et état physique du sol. Encyclopédie Techn. agric., Ed. Techniques, Paris, 1140-1141.

Mc Kyes E., 1985. Soil cutting and tillage. Developments in Agricultural Engineering, Vol. 7. Elsevier, New York, 217 p.

Mc Kyes E., 1989. Agricultural Engineering Soil Mechanics. Elsevier, Amsterdam, 292 p.

Mc Kyes E., Desir F.L., 1984. Prediction and field measurements of tillage tool draft forces and efficiency in cohesive soils. Soil Tillage Res., 4, 459-470.

Nichols M.L., Baver L.D., 1930. An interpretation of the physical properties of soil affecting tillage and implements design by means of the Atterberg consistency constants. Trans. 2nd Int. Cong. Soil. Sci., 6, 175-188.

Nichols M.L., Reed I.F., 1934. Soil Dynamics : VI. Physical reactions of soils to moldboard surfaces. Agric. Eng., 15(6), 187-190.

Nichols M.L., Reed I.F., Reaves C.A., 1958. Soil reaction to plow share design. Agric. Eng., 336-339.

Nikiforoff C.C., 1941. Morphological classification of soil structure. Soil Sci., 52, 193-211.

O'Callaghan J.R., Mc Coy J.G., 1965. The handling of soil by mouldboard ploughs. J. agric. Eng. Res., 10, 23-35.

Ojeniyi S.O., Dexter A.R., 1979. Soil structural changes during Multiple Pass Tillage. Transaction of the A.S.A.E., 22(5), 1068-1072.

Oskoui K.E., Rackham D.H., Witney B.D., 1982. The determination of plough draught. Part II. The measurement and prediction of plough draught for two mouldboard shapes in three soil series. J. Terramechanics, 19, 153-164.

Papy F., 1984. Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps. Effet des conditions climatiques et de l'état structural. Thèse Docteur Ingénieur INA-PG, 232 p. + annexes.

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., 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 Actes du colloque "*La structure des sols et son évolution*". Eds. Boiffin J. et Marin-Laflèche A., INRA Laon, 157-186.

Papy F., Cerf M., Coulomb I., 1991. La physique du sol vue par les agronomes. Jubilé de S. Hénin, à paraître.

Parmentier G., 1976. Modalités phytotechniques et maladies des céréales. In "*Semaines d'études sur la céréaliculture, cereals crops*", 6-10/09/1976. C.R. de séances. Fac. Sci. agron. Gembloux, Ed. Martens P. Presses Agron. Gembloux, 169-176.

Payne P.C.J., 1956. The relation between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *J. agric. Eng. Res.*, T. 1, 23-49.

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.

Perumpral J.V., Desai C.S., 1979. A generalized model for a soil tillage tool interaction. ASAE paper, 79-1646. St Joseph (Michigan) USA.

Pesson P., 1990. Protection des cultures de la révolution à nos jours : de l'empirisme à l'organisation de la lutte intégrée. In "*Deux siècles de progrès pour l'agriculture et l'alimentation 1789-1989*". Acad. Agric. Fr., Tec. et Doc. Lavoisier, 169-190.

Philippeau G., 1973. Théorie des plans d'expérience. Application à l'agronomie. Bureau d'étude statistique de l'ITCF, ITCF, Paris, 102-104.

Picard D., Jordan M.O., Trendel R., 1985. Rythme d'apparition des racines primaires du maïs (*Zea Mays* L.). 1) Etude détaillée pour une variété en un lieu donné. *Agronomie*, 5(8), 667-676.

Porter M.A., Mc Mahon T.A., 1990. Mutils-The Melbourne University Tilled Soil Model. *Transactions of the ASAE*, 33, 419-431.

Qiong G., Pitt R.E., Ruina A., 1986. A model to predict soil forces on the plough mouldboard. *J. agric. Eng. Res.*, 35, 141-155.

Randolph J.W., Reed I.F., 1938. Test of tillage tools. II - Effects of several factors on the reactions of fourteen-inch moldboard plows. *Agric. Eng.*, 19, 29-33.

Reaves C.A., Schafer R.L., 1974. Forces versus width of cut for moldboard bottoms. ASAE paper, 74-1588.

Rémy J.C., 1971. Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique ; signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol. *Ann. agron.*, 22(3), 267-290.

Rémy J.C., Hébert J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 63, 700-710.

Richard G., 1988. La germination des semences de betterave sucrière (*Beta Vulgaris* L.) en conditions d'hypoxie : modélisation, contribution au diagnostic au champ. Thèse Docteur Ingénieur INA-PG, 92 p.

Richey S.B., Srivastana A.R., Segerlind L.J., 1989. The use of the three dimension computer graphics to design mouldboard plough surfaces. *J. agric. Eng. Res.*, 43, 245-258.

Roger-Estrade J., 1991. Effet du travail du sol sur la localisation et l'accessibilité des éléments minéraux. Conséquences sur l'élaboration du rendement du maïs (*Zea Mays* L.). *Sci. Sol*, 29(2), 159-173.

Rogowski A.S., Kirkham D., 1976. Strength of soil aggregates : influence of size, density and clay and organic matter content. Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent., 41(1), 85-100.

Roux M., 1985. Algorithme de classification. Ed. Masson, Paris, 151 p.

Russel E.W., 1971. Soil structure : its maintenance and improvement. J. Soil Sci., 22, 137-157.

Russel E.W., 1988. Soil structure, tilth and mechanical behaviour. In "*Russel's soil conditions and plant growth*". 11th Edition Ed. Alan Wild. Longman Scientific and Technical, England, Chap. 12, 379-411.

Schafer R.L., Johnson C.E., 1982. Changing soil condition-The soil dynamics of tillage. In "*Predicting tillage effects on soil physical properties and processes*". ASA, USA, Chap. 2, 13-28.

Schlosser F., 1983. Eléments de mécanique des sols. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 151p.

Sebillotte M., 1975. Comment aborder et suivre l'introduction dans un système de culture de nouveaux procédés de travail du sol ? Bull. tech. Inf., 302/303, 555-567.

Sebillotte M., 1978-a. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. C.R. Acad. Agric. Fr., 11, 906-1013.

Sebillotte M., 1978-b. La collecte des références et les progrès de la connaissance agronomique. In "*Exigences nouvelles pour l'agriculture : Les systèmes de culture pourront-ils s'adapter ?*", ADEPRINA, Cycle supérieur d'Agronomie organisé par Boiffin J., Huet Ph., Sebillotte M.

Sebillotte M., 1982. Pratiques des agriculteurs et évolution de la fertilité du milieu. Eléments pour un jugement des systèmes de culture. Bull. tech. Inf., Numéro Spécial, Ed. Sebillotte M., Paris, 370/372, 425-436.

Sebillotte M., 1987. Du champ cultivé aux pratiques des agriculteurs. Réflexions sur l'agronomie actuelle. C.R. Acad. Agric. Fr., 73(8), 69-81.

Sebillotte M., 1990-a. Améliorer la gestion de la fertilité physique par l'agriculteur : Réflexions pour une politique régionale. In Actes du colloque "*La structure des sols et son évolution*". Eds. Boiffin J. et Marin-Laflèche A., INRA Laon, 187-216.

Sebillotte M., 1990-b. Les processus de décision des agriculteurs. II - Conséquences pour les démarches d'aide à la décision. In "*Modélisation systémique et système agraire, décision et organisation*", Actes du Séminaire du Département INRA-SAD, St Maximin, 2-3/03/1989, Eds. Brossier J., Vissac B., Le Moigne J.L., INRA, 103-117.

Sebillotte M., 1990-c. Système de culture : un concept opératoire pour les agronomes. In "*Les systèmes de culture*", Eds. Combes et Picard. INRA, 165-196.

Sebillotte M., 1990-d. Some concept for analyzing farming and cropping systems and for understanding their different effects. 1st Congress of the E.S.A., Paris, 5-7/12/1990, Proc., Session 5 o, p. 1-16.

Sebillotte M., Meynard J.M., 1990. Système de culture, système d'élevage et pollutions azotées. Colloque "*Nitrate, Agriculture, Eau*", Paris.

Sebillotte M., Soler L.G., 1988. Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. C.R. Acad. Agric. Fr., 74, 59-70.

Sequi P., 1978. Soil structure an Outlook. Agrochemica, XXII(5/6), 403-423.

Smith D.L.O., Godwin R.J., Spoor G., 1989. Modeling soil disturbance due to tillage and traffic. In "*Mechanics and related processes in agricultural soils*", Ed. W.E.Larson et al., NATO ASI Series. Ser. E : Applied Sciences. Kluwer Academic pub., 121-136.

Söhne W., 1956. Einige Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik. Grundlag. der Lanttechn., Heft 7, 11-27.

Söhne W., 1959. Untersuchungen über die Form von Pflugkörpern bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit. Grundlag. der Lanttechn., Heft 11, 22-39.

Söhne W., 1960. Anpassung der Pflugkörperform an höhere Fahrgeschwindigkeiten. Grundlag. der Lanttechn., Heft 12, 51-62.

Söhne W., Möller R., 1962. Über den Entwurf von Streichblechformen unter besonderer Berücksichtigung von Streichblechen für höhere Geschwindigkeit. *Grundlag. der Lantechn.*, Heft 15, 15-27.

Spoor G., 1975. Fundamental aspects of cultivations. In *"Soil and physical conditions and crop productions"*. Technical bulletin 29. Ministry of Agric. Fisheries and Food. London Her Majesty's Stationery Office, 128-144.

Spoor G., 1979. Soil type and workability in soil survey applications. Technical monograph n°13. Soil survey. Eds. M.G. Jarvis and D. Mackney. Harpenden printed by Adlard and Son limited, Bartholomew press, Dorking, 71-82.

Spoor G., Godwin R.J., 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *J. agric. Eng. Res.*, 23, 243-258.

Spoor G., Godwin R.J., 1979. Soil deformation and shear strength characteristic of some clay soils at different moisture contents. *J. Soil Sci.*, 30, 483-498.

Stafford J.V., 1979. The performance of rigid tines in relation to soil properties and speed. *J. agric. Eng. Res.*, 24, 41-56.

Stafford J.V., 1982. The concept of a soil failure index in the operation of tillage implements. The 9th Conference of ISTRO, Socialistic Federal Republic of Yugoslavia, OSIJEK, 532-536.

Stafford J.V., Tanner D.W., 1983. Effect of rate on soil shear strength and soil metal-friction. II - Soil-metal friction. *Soil Tillage Res.*, 3, 321-330.

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), 1-26.

Stengel P., 1982. Influence des contraintes hydriques et mécaniques sur l'espace poral. Comportement physique et mécanique des sols. In *"Séminaire du Département de Science du Sol"*, INRA, Pech-Rouge, 75-79.

Stengel P., 1990. Caractérisation de l'état structural du sol. Objectif et méthodes. In *Actes du colloque "La structure des sols et son évolution"*. Eds. Boiffin J. et Marin-Laflèche A., INRA Laon, 15-36.

Stengel P., Bourlet M., 1987. Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage : Effet de l'humectation. In *"Soil compaction and Regeneration"*, Ed. G. Monnier et M.J. Gosse, Balkema, Rotterdam, Boston, 95-110.

Stengel P., Gabilly Y., Bertuzzi P., Gaudu J.C., Ponfaut A., 1986. La double sonde gamma LPC-INRA. Définition, expérimentation et utilisation en agronomie. *Bull. liaison Labo P. et Ch.*, 141.

Tanner D.W., Dean J.R., 1963. The forces acting on the body and on the disc coulter of a plough. *J. agric. Eng. Res.*, 8(2), 194-201.

Tardieu F., 1984. Etude au champ de l'enracinement du maïs. Thèse Docteur ingénieur INA-PG, 232 p.

Tardieu F., 1987. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. III - Disponibilité des réserves en eau du sol. *Agronomie*, 7(4), 279-288.

Tardieu F., 1989. Root system responses to soil structural properties : Micro and Macro-scale. In *"Mechanics and related processes in agricultural soils"*, Ed. W.E. Larson *et al.*, NATO ASI Series. Ser. E : Applied Sciences. Kluwer Academic pub., 153-172.

Tardieu F., 1990. Effet de l'état structural du sol sur l'enracinement. Que prendre en compte pour la modélisation ? In *Actes du colloque "La structure des sols et son évolution"*. Eds. Boiffin J. et Marin-Laflèche A., INRA Laon, 91-109.

Tardieu F., Manichon H., 1986. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelles cultivées. I - Discussion des critères d'études. *Agronomie*, 6(4), 345-354.

Tardieu F., Manichon H., 1987-a. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie*, 7(3), 201-211.

Tardieu F., Manichon H., 1987-b. Conséquences de l'état du profil cultural sur l'enracinement, cas du maïs. In *"Soil compaction and Regeneration"*, Ed. G. Monnier et M.J. Gosse, Balkema, Rotterdam, Boston, 131-143.

Tardieu F., Manichon H., 1987-c. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. I - Modélisation d'états structuraux types de la couche labourée. *Agronomie*, 7(2), 123-131.

Tessier D., 1982. Méthode d'approche de l'organisation des argiles et des matériaux argileux. Comportement physique et mécanique des sols. In *"Séminaire du département Science du Sol INRA"*, Pech-Rouge, 43-55.

Thaer R., 1962. Versuche mit Häufeln verschiedener Anstell- und Seitenrichtungswinkel, *Grundlag. der Landtechn.*, Heft 15, 37-45.

Travers T., Ami M., Bideau D., Gervois A., Lemaitre J., Messenger J.C., Troadec J.P., 1988. Compression de milieux granulaires. Modèles à deux dimensions. *Rev. fr. Géotechnique*, 43, 20-34.

Utomo W.H., Dexter A.R., 1981. Age hardening of agricultural top soils. *J. Soil Sci.*, 32, 335-350.

Van Bavel C.M.M., 1949. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical Index of aggregation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 20-23.

Van Loon C.D., Bouma J., 1978. A case of study on the effect of soil compaction on potato growth in a loamy sand soil. 2 - Potato plant response. *Neth. J. agric.*, 26, 421-429.

Van Ouwerkerk C., Koolen H. et A.J., 1988. Pedotechnique : a modern approach to present-day problems in soil handling and field traffic. *Soil Tech.*, 1, 283-288.

Verma S., 1989. Contribution à la modélisation du comportement au labour d'un ensemble tracteur-charrue. Thèse Docteur INA-PG, Paris, 141 p. + annexes.

Voight B., 1973. Technical notes, correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils. *Géotechnique*, 23, 265-267.

Wolf D., Hadas A., 1987. Determining efficiencies of various moldboard ploughs in fragmenting and tilling air-dry soils. *Soil Tillage Res.*, 10, 181-190.

Zhang H.Q., Hartge K.M., 1990. Die Kohäsion ungesättigter Sandböden und deren Beeinflussung durch organische Substanz. *Soil Tech.*, 3, 311-326.

SUMMARY

Our work aimed to analyze the modifications of soil structure during ploughing.

We evaluated volumes of zones with contrasting structure from the area occupied by the zones in the cultural profil.

Soil structure evolution was appraised using balances of volumes characterised before and after ploughing.

We showed in silty clayey soil, silt soil with friable behaviour that we couldn't cancel after ploughing differences between structures resulting from differences of structure before ploughing.

Nevertheless we managed to reduce the differences after ploughing by increasing ploughing speed in addition of skim coulters.

Results showed that transformations depend on soil structure but not much on ploughing speed.

The transformations consist of increase of poral space in the ploughed layer but also modifications of clods layout and clod splitting status.

We proposed hypothesis on the mechanical processes. The most important mechanisms are division of clods in compacted layer, erosion of clods in uncompacted layer.

Analysis of relations between tractor draught and soil structure showed that draught depends on the latter but is only an overall gauge of the mechanical processes during ploughing: when the work of the forces within the furrow slice is significant, draught can not predict soil structure evolution.

Key words : *ploughing – soil structure – clods – cultural profil – balance – draught.*

RESUME

Notre travail consiste en l'analyse des modifications de l'état structural de la couche labourée sous l'effet du labour.

Nous avons évalué l'importance volumique des éléments structuraux à partir de la surface qu'ils occupent dans le profil cultural. L'évolution de l'état structural a été appréciée par les bilans des volumes caractérisés avant et après labour.

Nous avons montré, en terres limono-argileuses à limoneuses à comportement fragile, qu'il était impossible d'annuler les différences entre des états structuraux obtenus après labour à partir d'états structuraux initiaux contrastés.

En augmentant la vitesse de labour et en ajoutant des rasettes aux corps de charrues, il a néanmoins été possible en terres limoneuses de réduire nettement les différences après labour.

Les résultats montrent que les transformations dépendent de l'état initial mais peu de la vitesse de labour. Elles se traduisent non seulement par une augmentation de l'espace poral au sein de la couche labourée mais aussi par une réorganisation de l'arrangement entre les mottes et une fissuration des mottes.

Nous avons montré la plausibilité des hypothèses sur les processus mécaniques de transformation. Les principaux mécanismes sont une division des mottes dans les parcelles à état initialement tassé, une érosion des mottes dans les parcelles à état fragmentaire.

L'analyse des relations entre l'effort de traction et l'état structural du sol a permis de montrer que l'effort dépend de ce dernier mais n'est qu'un indicateur global des processus mécaniques au cours du labour : si le travail des forces intérieures à la bande de labour est important, l'effort ne permet pas de prédire les variations d'état structural.

Mots clés : labour – état structural – mottes – profil cultural – bilan – effort de traction.