

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

Chaire d'Agronomie

THESE

présentée pour l'obtention du titre de

DOCTEUR

de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon
"Sciences Agronomiques"

par

Jean ROGER-ESTRADE
Ingénieur Agronome de l'INA-PG

MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION À LONG TERME DE L'ÉTAT
STRUCTURAL DES PARCELLES LABOURÉES.
CONTRIBUTION À L'ANALYSE DES EFFETS
DES SYSTÈMES DE CULTURE

soutenue le 5 décembre 1995 devant le jury composé de :

A. CAPILLON
J. GUÉRIF
J. LUCAS
J. BOIFFIN
A. PAVÉ
H. MANICHON

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

REMERCIEMENTS

Avant de présenter ce mémoire, j'ai plaisir à remercier tous ceux qui, directement ou indirectement, ont contribué à sa réalisation.

Je tiens à marquer ma profonde reconnaissance à Hubert Manichon, qui a eu l'intuition de ce travail de modélisation et qui a bien voulu m'accorder sa confiance en me proposant ce sujet.

Jacques Caneill a su m'accorder, tout au long de ma démarche, une aide efficace ; François Papy et Philippe Leterme n'ont pas ménagé conseils avisés et encouragements ; qu'ils reçoivent ici l'expression de toute ma gratitude.

Mais au-delà de ce soutien direct, je me dois également de saluer tous ceux qui constituent l'équipe à laquelle je m'honore aujourd'hui d'appartenir. Les membres de la Chaire d'Agronomie de l'INA-PG, ceux du Laboratoire d'Agronomie et de l'Unité SAD Paris-Grignon qui lui sont associés, sans oublier le personnel du Centre Expérimental représentent un environnement scientifique de premier ordre ; je remercie en particulier Michel Sebillotte qui dirigeait ce groupe quand il m'y accueillit, et à qui je dois les bases de ma formation d'agronome.

Les données expérimentales traitées dans ce mémoire ont été acquises au cours de deux opérations de recherche : l'AIP "Travail du sol" et l'action concertée ONIC/INRA/ITCF (Convention RCI). Elles sont donc le fruit d'un travail d'équipe auquel cette thèse doit beaucoup. Mes remerciements vont à tous ceux qui ont, à un moment ou à un autre, participé à ce labeur, mais je tiens à citer tout particulièrement Isabelle Coulomb, Yvan Gautronneau et Pierre Curmi, dont je garde le meilleur souvenir de la collaboration sur le terrain, ainsi que Michel Tremblay et Olivier Buisson.

Jean Lucas et Jérôme Guérif ont accepté la tâche d'être les rapporteurs de ce document ; Alain Capillon, Jean Boiffin et Alain Pavé ont bien voulu faire partie du jury. Je les remercie très sincèrement de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et du temps qu'ils y ont consacré.

La mise en forme de ce mémoire doit beaucoup à la patience et au talent de Geneviève Baudran ; qu'elle reçoive ici la marque de toute ma sympathie.

Je terminerai en remerciant ma famille ; ce que je dois au soutien tant moral qu'affectif dont elle a su m'entourer tout au long de ce travail, va bien au-delà de ce que je pourrais exprimer.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1ère PARTIE : CHOIX DE LA MÉTHODE DE TRAVAIL

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES TRAVAUX PORTANT SUR LA CARACTÉRISATION DE LA STRUCTURE DU SOL ET LA RELATION SYSTEME DE CULTURE-ÉTAT STRUCTURAL

1. PLACE DE LA STRUCTURE DU SOL DANS L'ÉTUDE DU CHAMP CULTIVÉ	8
1.1. Définition et caractérisation de la structure	8
<i>a. La dimension des particules</i>	9
<i>b. L'organisation spatiale</i>	10
1.2. Evolution de l'état structural	10
1.3. Conséquences de la structure du sol sur le fonctionnement du peuplement végétal et l'environnement	11
2. CARACTÉRISATION DE L'ÉTAT STRUCTURAL ET ÉTUDE DE SON ÉVOLUTION SOUS L'EFFET DES SYSTEMES DE CULTURE	12
2.1. Les différentes méthode de caractérisation selon les objectifs poursuivis	12
<i>a. Prévoir des évolutions</i>	12
<i>b. Prévoir les répercussions de la structure du sol sur le fonctionnement des peuplements végétaux et l'environnement</i>	13
<i>c. Prévoir à la fois les évolutions et les conséquences de l'état du profil cultural</i>	14
2.2. Effet des systèmes de culture sur l'évolution à long terme de l'état structural	15
<i>a. Les recherches ne prenant pas en compte explicitement les effets propres au travail du sol</i>	16
<i>b. Les recherches prenant en compte les effets de compactage liés aux interventions culturales</i>	17
<i>c. Les recherches prenant en compte explicitement les effets sur le sol de l'ensemble des interventions culturales</i>	19
3. CONCLUSION	20

CHAPITRE II : DÉMARCHE

1. CARACTÉRISATION DES SYSTEMES DE CULTURE	21
1.1. Prise en compte de la variabilité spatiale : analyse géométrique des équipements et stratification du profil	23
1.2. Effets des systèmes de culture : fréquence et intensité des actions mécaniques qui s'exercent sur le profil	26
2. CARACTÉRISATION DE L'ÉTAT STRUCTURAL : CHOIX D'UN INDICATEUR DES EFFETS CUMULATIFS	28
2.1. Principes de description de l'état interne des mottes	28
2.2. Evaluation au champ des effets cumulatifs	31
3. CONCLUSION	35

2ème partie : ÉVALUATION DE LA TENEUR EN Δ DE H5-L3 EN PARCELLES EXPÉRIMENTALES ET MODÉLISATION DE SON ÉVOLUTION

CHAPITRE I : ÉVALUATION DE LA TENEUR EN Δ DE H5-L3 DANS LES PARCELLES EXPÉRIMENTALES DE GRIGNON

1. PRÉSENTATION DES SITUATIONS ÉTUDIÉES	39
1.1. Localisation	39
1.2. Systèmes de culture	39
a. Successions des cultures	39
b. Itinéraires techniques	39
c. Localisation des passages et caractéristiques géométriques des équipements employés : variabilité spatiale et temporelle des contraintes mécaniques appliquées et de leurs effets sur la structure	41
1.3. Conclusion sur le choix des situations	43

2. DESCRIPTION DE L'ÉTAT STRUCTURAL ET ÉVALUATION DE L'INDICATEUR "TENEUR PONDÉRALE EN Δ DE H5-L3"	45
2.1. Cartographie des profils	45
2.2. Evaluation de la teneur pondérale en Δ de H5-L3	47
a. Echantillonnage	47
b. Méthode de prélèvement et préparation de l'échantillon	47
c. Résultats et discussion	48
3. HYPOTHESES SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA COUCHE LABOURÉE DANS LES PARCELLES EXPÉRIMENTALES ÉTUDIÉES	51

CHAPITRE II : MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION DE L'INDICATEUR "TENEUR EN Δ DE H5-L3"

1. PRÉSENTATION DU MODELE	55
2. ADAPTATION AUX PARCELLES DU CENTRE EXPERIMENTAL DE GRIGNON	56
2.1. Motif géométrique	56
2.2. Paramétrage du modèle pour la parcelle 1	58
a. Création de Δ	58
b. Transferts de Δ	60
c. Disparition de Δ	64
2.3. Modèle mathématique associé (cas de la parcelle 1)	66
3. APPLICATION NUMÉRIQUE SUR TABLEUR ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS MESURÉES A GRIGNON	72
3.1. Résultats de la simulation pour les 4 parcelles étudiées	72
a. Parcelle N°1	72
b. Parcelle N°3	77
c. Parcelle N°2	80
d. Parcelle N°4	81
3.2. Conclusion	82
4. CONCLUSION ET PREMIERES APPLICATIONS	83

4.1. Modification des caractéristiques géométriques à t/l constant	83
4.2. Modification du rapport t/l	86
4.3. Limitation du tassement dans la position L1	88

3ème PARTIE : ANALYSE CRITIQUE DES HYPOTHESES DE LA MODÉLISATION, PERFECTIONNEMENT ET TEST DU MODELE

CHAPITRE I : ÉTUDE DE SENSIBILITÉ ET PERFECTIONNEMENT DU MODELE

1. INTRODUCTION	93
2. COINCIDENCE ENTRE LE COMPARTIMENTAGE DE L'HORIZON ET LE DÉCOUPAGE RÉALISÉ PAR LA CHARRUE	95
3. ANALYSE CRITIQUE DU COMPORTEMENT DE LA BANDE DE TERRE LORS DU LABOUR ET PROPOSITION D'UNE NOUVELLE REPRÉSENTATION	102
3.1. Présentation de l'expérimentation	102
3.2. Méthode de caractérisation des bandes de labour	103
a. Préparation de la face d'observation	103
b. Procédure photographique	104
c. Analyse des images obtenues	104
3.3. Procédure d'évaluation de ces paramètres sur les images de profil réalisées au champ	106
3.4. Valeurs calculées	106
3.5. Résultats et discussion	108
a. Section des bandes de labour	108
b. Fraction de la bande restant dans le compartiment d'origine (compartiment "i")	108
c. Fraction de la bande projetée dans le compartiment voisin (compartiment "i+1")	110
d. Fraction de la bande projetée dans le compartiment jouxtant le compartiment voisin de celui d'origine (compartiment "i+2")	112
e. Position du barycentre	112
f. Position du point de jetée maximale	114
g. Angle de la bande avec l'horizontale	114
h. Conclusion	114
3.6. Modification du modèle de retournement de la bande de terre au cours du labour	116

<i>a. Déplacement et déformation de la bande de terre au cours du labour : étude bibliographique</i>	116
<i>b. Modifications du modèle de retournement de la bande de terre au labour</i>	121
<i>c. Résultats de la simulation avec le nouveau modèle de retournement</i>	125
4. HYPOTHESES SUR LA RÉPARTITION DU Δ AU SEIN DE Ap	127
<i>4.1. Principe du programme de simulation</i>	127
<i>4.2. Structure et fonctionnement du programme</i>	129
<i>a. Structure des données</i>	129
<i>b. Algorithme</i>	129
<i>4.3. Résultats de la simulation</i>	130
<i>a. Sorties graphiques</i>	131
<i>b. Valeurs moyennes à l'équilibre</i>	132
<i>c. Répartition entre compartiments</i>	134
5. SENSIBILITE A LA VALEUR DU TAUX DE DISPARITION DU Δ	135
6. CONCLUSION	139

**Chapitre II : TEST DU MODELE ET PERSPECTIVES D'UTILISATION POUR L'ÉTUDE
DES EFFETS CUMULATIFS DES SYSTEMES DE CULTURE SUR L'ÉTAT
STRUCTURAL**

1. INTRODUCTION	141
2. TEST DU MODELE PAR SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DE L'ÉTAT DU PROFIL CULTURAL DES PARCELLES ENQUETÉES LORS DE L'ÉTUDE "ROTATIONS CÉRÉALIÈRES INTENSIVES"	142
<i>2.1. Présentation des situations étudiées</i>	144
<i>a. Les terrains</i>	144
<i>b. L'histoire culturelle</i>	145
<i>c. Description des profils cultureux</i>	147
<i>2.2. Diagnostics</i>	149
<i>a. Analyse de l'effet du labour</i>	151
<i>b. Analyse des effets de l'implantation du blé</i>	152
<i>c. Discussion et règles d'interprétation des états observés</i>	154
<i>2.3. Simulation des situations étudiées</i>	156
<i>a. Caractéristiques géométriques des outils employés et règles de localisation des passages</i>	157

<i>b. Scénarios de simulation</i>	158
<i>c. Résultats de la simulation et confrontation avec les observations</i>	161
2.4. Conclusion	171
3. APTITUDE DE L'INDICATEUR "TENEUR EN Δ DE H5-L3" A DIFFÉRENCIER L'EFFET DES SYSTEMES DE CULTURE SUR L'ÉTAT STRUCTURAL	172
3.1. Simulation	172
3.2. Conclusion	178

CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

INTRODUCTION

Un système de culture est l'ensemble des modalités techniques mises en oeuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit par :

- la nature des cultures et leur ordre de succession,
- les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues (Sebillotte, 1990).

La gamme des systèmes de culture qu'il est possible de mettre en oeuvre en un lieu donné est plus ou moins large : les caractéristiques du climat et des sols déterminent le choix des espèces végétales, leurs potentialités et les aptitudes culturales du milieu (Boiffin & Monnier, 1982) ; de plus, le contexte économique, politique et social conditionne les possibilités d'accès aux facteurs de production (disponibilité, coût), et au marché pour l'écoulement des produits (Manichon, 1995).

D'un autre côté, chaque agriculteur poursuit des objectifs qui dépendent de sa propre situation (familiale, patrimoniale, financière) et de ses projets d'avenir : c'est par le choix et la mise en oeuvre des systèmes de culture, en tenant compte des atouts et contraintes internes (liées aux caractéristiques du système de production, et, en particulier, héritées de son histoire) et externes (économiques, environnementales) à son exploitation, qu'il met en valeur l'espace dont il dispose, pour atteindre ses objectifs (Capillon, 1993).

Il existe donc, très généralement, entre régions (entre lieux caractérisés par un milieu naturel, une histoire et l'appartenance à un espace politique, économique et social), mais également au sein d'un même espace géographique, une grande diversité des systèmes de culture.

Cette diversité pose, en elle-même, de nombreuses questions méthodologiques à l'agronome dès lors qu'il s'agit de porter un diagnostic sur les systèmes de culture existants, d'en concevoir de nouveaux ou, plus largement, d'aider à la décision de l'agriculteur pour le choix et la conduite de ses systèmes de culture (Boiffin & Lemaire, 1992).

A cet égard, l'adoption d'une approche distinguant l'effet de la **pratique du système de culture sur le milieu, des conséquences de l'état de ce dernier sur le rendement des cultures ou la qualité des produits** (Sebillotte, 1974, 1990) a permis des progrès importants, en particulier pour l'étude du travail du sol (Manichon, 1982). Cette démarche aboutit en effet à la mise en évidence de relations plus stables et plus explicatives (entre l'acte technique et l'état du milieu d'une part, entre cet état transformé et le fonctionnement du peuplement végétal d'autre part), que l'approche plus traditionnelle consistant à étudier directement l'effet des techniques sur le rendement des cultures.

Nous nous intéresserons, dans ce travail, aux transformations d'une composante de l'état du milieu cultivé, la structure du sol, sous l'action des systèmes de culture.

Choisissant d'étudier cette relation, ce qui nous paraît par ailleurs essentiel pour que ce travail puisse s'intégrer dans une problématique plus globale portant sur la durabilité des systèmes de culture, nous ne pourrions cependant ignorer celle qui lie l'état du milieu au fonctionnement du peuplement végétal. En effet, si cette distinction est nécessaire pour l'analyse, il est également indispensable de pouvoir reconstituer la chaîne causale dans son ensemble, afin de pouvoir agir sur la production grâce aux actes techniques. Il faut pour cela que les variables utilisées pour caractériser les états du milieu rendent compte des effets du système de culture mais soient en même temps pertinentes par rapport à la compréhension de l'élaboration du rendement des cultures. Nous tiendrons compte de cette exigence dans nos choix méthodologiques.

La pratique d'un système de culture entraîne une modification plus ou moins importante de l'état de la parcelle. Ces effets sur le milieu sont le résultat de l'action directe des plantes, et de celle des techniques culturales, en interaction avec le climat. La variation des états du milieu (physiques, chimiques et biologiques) entre le début⁽¹⁾ et la fin d'une culture, sous l'influence de ces trois facteurs, définit l'**effet précédent**. Envisagées sur plusieurs années, ces variations successives déterminent l'**effet cumulatif** du système de culture sur le milieu (Sebillotte, 1982, 1986, 1990).

Les effets précédents comme les effets cumulatifs sont couramment étudiés et mis en évidence en effectuant, de façon synchrone, des observations et des mesures sur le profil cultural⁽²⁾ de différentes parcelles se distinguant par leurs systèmes de culture. Cette approche comparative permet de classer, par exemple dans un milieu donné, les systèmes de culture (ou les précédents) entre eux, et d'identifier ceux des actes techniques qui sont à l'origine des différences d'état du milieu observées. C'est ainsi que l'on a mis en évidence l'effet néfaste de récoltes tardives en conditions humides, fréquentes en monoculture de maïs, en comparant l'état structural du profil cultural de parcelles en monoculture avec celui de situations comportant des précédents prairiaux (Manichon & Sebillotte, 1973).

La capacité explicative de cette démarche est cependant limitée : elle ne peut porter que sur les éléments visibles ou mesurables au moment de l'observation. Une deuxième voie d'étude consiste à caractériser l'état d'une parcelle avant et après chaque étape de mise en oeuvre du système de culture (Boizard *et al.*, 1994). Dans la pratique, le coût élevé en temps d'une telle approche limite son emploi à un nombre restreint d'essais de longue durée, ce qui rend les résultats obtenus très contingents des conditions de ces essais, en particulier des climats rencontrés au cours des campagnes successives.

1. Pris, par convention, après la récolte du précédent cultural (Sebillotte, 1990).

2. Selon Hénin *et al.* (1969), le Profil Cultural est défini comme "**l'ensemble des couches de terre individualisées par l'intervention des instruments de culture, des racines de végétaux et des facteurs naturels réagissant à ces actions**". La caractérisation des différents horizons (anthropiques ou non) de ce système porte sur la constitution physique et physico-chimique du matériau, son état d'organisation (structure et propriétés liées), et les éléments biologiques qui y figurent (racines des végétaux, flore, faune,...).

Dans les deux cas, en fait, la portée des résultats et l'explication de leur variabilité ne pourraient être établies si l'on ne disposait en même temps de **modèles d'évolution d'indicateurs des effets des systèmes de culture**, permettant de simuler les effets précédents successifs et la manière dont ils se cumulent dans le temps.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de tels modèles portant sur l'effet des systèmes de culture sur l'état structural des horizons travaillés (Horn, 1989), en particulier lorsque la parcelle est soumise à un régime de travail du sol comportant des labours. Or ce type de conduite reste le plus fréquemment utilisé en Europe et dans de nombreux pays du monde. Cette carence constitue un obstacle majeur pour la conception et la modélisation de systèmes de culture adaptés à des contextes physiques et économiques variés, ou pour la mise au point d'outils d'aide à la décision efficaces pour la gestion de l'état structural.

Nous nous proposons, dans ce travail, de contribuer à la modélisation de l'évolution de l'état structural du profil cultural de parcelles labourées.

La définition même de l'effet précédent et de l'effet cumulatif conduit à aborder cette modélisation sur un pas de temps annuel, en terme de bilans d'actions antagonistes entraînant des gains et des pertes sur chaque composante de l'état du milieu (stocks de matière, populations d'organismes vivants favorables ou nuisibles à la production agricole, états structuraux) ; si le solde de ce bilan est non nul, il existe, pour la composante considérée, un effet du précédent cultural.

A chaque composante est associé un indicateur, solde du bilan de ces actions antagonistes, que l'on évalue sur la partie du profil cultural la plus pertinente ; ainsi, pour l'eau et les éléments minéraux qui y sont dissous, c'est l'ensemble des couches de sol concernées par les transferts hydriques qu'il faut prendre en compte (Hébert, 1969) ; pour d'autres composantes, comme le carbone organique (Hémin & Dupuis, 1945 ; Boiffin *et al.*, 1986 ; Mary & Guérif, 1994), ou les graines d'adventices (Debaecke, 1987), le système étudié peut être limité à la couche de terre dans laquelle ces éléments sont incorporés : il s'agit le plus souvent de l'horizon A_p (3). S'agissant de l'état structural, c'est au sein de cette couche que nous effectuerons des bilans entre les effets des compactages et des décompactages qu'entraînent les techniques culturales appliquées à la parcelle (Manichon & Roger-Estrade, 1990) : nous ne prendrons pas en compte, même s'ils existent, les tassements qui peuvent être engendrés par une transmission à des horizons plus profonds des pressions appliquées au sol.

Les effets cumulatifs résultent de la sommation algébrique, sur plusieurs années, des effets précédents successifs (Sebillotte, 1990). Si l'on peut, en théorie, appliquer cette

3. L'indice "p" signifie *ploughed* en anglais, c'est à dire labouré (que ce soit par une charrue à versoir ou par tout autre instrument entraînant une fragmentation) et "perturbé" (par les instruments de culture) en français. Cet horizon est maintenant dénommé L, pour Labouré (Référentiel Pédologique des sols d'Europe, INRA, 1992). Nous conserverons cependant l'ancienne dénomination, afin de ne pas introduire de confusion avec les positions latérales du profil (Gautronneau & Manichon, 1987), elles aussi nommées L.

définition à toute composante de l'état du milieu (il est toujours possible de sommer les soldes successifs dès lors que l'on dispose d'un indicateur qui s'y prête), cette notion ne concerne en fait que les composantes pour lesquelles on peut envisager une évolution à moyen et long terme que l'on puisse différencier des fluctuations aléatoires.

En d'autres termes, lorsqu'on envisage sur plusieurs années les valeurs successives de l'indicateur pour une composante donnée, on obtient une série chronologique sur laquelle on peut chercher à caractériser deux paramètres : la tendance et les fluctuations aléatoires⁽⁴⁾ (Sebillotte & al., 1989). L'existence d'un effet cumulatif du système de culture sur la composante considérée est liée à celle du premier de ces deux paramètres.

Un exemple de ce type d'évolution est celui du carbone organique du sol (Jenkinson & Raynes, 1977). Ces auteurs ont mis en évidence l'existence, sur de longues périodes (de l'ordre de la centaine d'années), de tendances d'évolution du stock de carbone organique liées aux systèmes de culture pratiqués sur des parcelles de Rothamsted.

A l'opposé, la quantité d'eau utile du sol fluctue de manière beaucoup plus aléatoire entre deux bornes extrêmes, correspondant à l'épuisement complet de la réserve et à la saturation du sol. On ne peut dans ce cas envisager d'effet cumulatif du système de culture, même s'il peut exister un effet de ce dernier sur l'évolution du stock d'eau entre deux années consécutives (au travers du mode de travail du sol, ou de la nature des cultures qui se succèdent sur la parcelle, par exemple).

Le concept d'effet cumulatif est donc lié à l'existence d'une tendance d'évolution. C'est cette dernière qu'il s'agit de modéliser.

La question qui se pose alors, est celle de l'existence d'effets cumulatifs pour ce qui concerne l'état structural du profil. Ne disposant pas de séries chronologiques sur de longues périodes comme c'est le cas pour la matière organique (Jenkinson & Raynes, 1977), ou certains éléments minéraux (Gachon, 1988), nous ne pouvons envisager cette modélisation en terme d'ajustement mathématique à une série de valeurs expérimentales.

Cependant, de nombreuses observations de terrain montrent la persistance, sur plusieurs années, des effets dégradants d'opérations culturales et, surtout, la stabilité du classement entre systèmes de culture quant à leurs effets sur la structure du sol (Manichon & Sebillotte, 1975 ; Manichon, 1982 ; Manichon & Roger-Estrade, 1990). Ces faits permettent de penser qu'il existe des processus cumulatifs d'évolution de l'état structural, et conduisent à l'idée que les effets précédents successifs amènent progressivement l'état physique de la parcelle vers un "état moyen", lié au système de culture (Sebillotte, 1982, 1990).

4. Il n'y a pas lieu ici de considérer les variations saisonnières (fluctuations régulières dont la période est de 12 mois), puisque le pas de temps est annuel. On pourrait toutefois envisager des cas où la tendance est décomposable en deux éléments, par analogie avec ce qui se fait par exemple en macro-économie : le trend (tendance à long terme non périodique), et le cycle, fluctuation dont la périodicité est de quelques années (de l'ordre de la durée de la rotation par exemple).

Cette évolution, en supposant qu'elle aboutisse à un état stationnaire, doit être précisée (Pavé, 1994) : le système est en *équilibre statique* lorsque les actions antagonistes de compactage et de décompactage sont constantes et s'annulent au pas de temps considéré ; mais on ne peut exclure l'existence d'un état en *équilibre dynamique*, lié à l'existence de fluctuations autour de la tendance qui peuvent être de deux sortes :

- la première, de nature aléatoire, est liée aux effets du climat des années successives sur le milieu ; assimilable à un "bruit", elle apparaît seule lorsqu'il s'agit d'une monoculture et que les techniques culturales sont identiques d'une année sur l'autre ;

- la seconde, qui apparaît lorsque les cultures et les techniques qu'elles impliquent sont différentes entre les années, confère à l'évolution un caractère plus périodique.

C'est dans ce cadre conceptuel que s'inscrit notre démarche de modélisation :

Dans une première partie, nous exposerons la méthode de travail retenue pour cette étude. Nous proposerons un indicateur, mesurable au champ, de l'effet à long terme des systèmes de culture sur l'état structural : la teneur en éléments structuraux compacts (d'état interne Δ - Manichon, 1982), d'un compartiment donné du profil cultural.

Dans la seconde partie, nous présenterons des résultats obtenus sur le Centre Expérimental de Grignon (Yvelines), ce qui nous amènera à discuter de la pertinence de l'indicateur. Nous proposerons ensuite un modèle compartimental permettant d'en simuler l'évolution dans des parcelles régulièrement labourées. Ce modèle, établi en premier lieu dans le cas le plus simple (menant à un équilibre statique) a ensuite été utilisé pour simuler des situations plus complexes, aboutissant à un équilibre dynamique.

Nous étudierons en troisième partie la sensibilité du modèle aux principales hypothèses de sa constitution ; cela nous conduira à proposer un certain nombre d'améliorations, puis à présenter une technique de simulation plus performante, prenant en compte la répartition spatiale des éléments d'état interne Δ au sein du profil cultural. Enfin, dans un dernier chapitre, nous envisagerons la possibilité de l'utiliser dans les conditions réelles de la pratique agricole, en confrontant les résultats obtenus par simulation à des observations de profils réalisées sur un réseau de parcelles d'agriculteurs dans l'Ouest du Bassin Parisien.

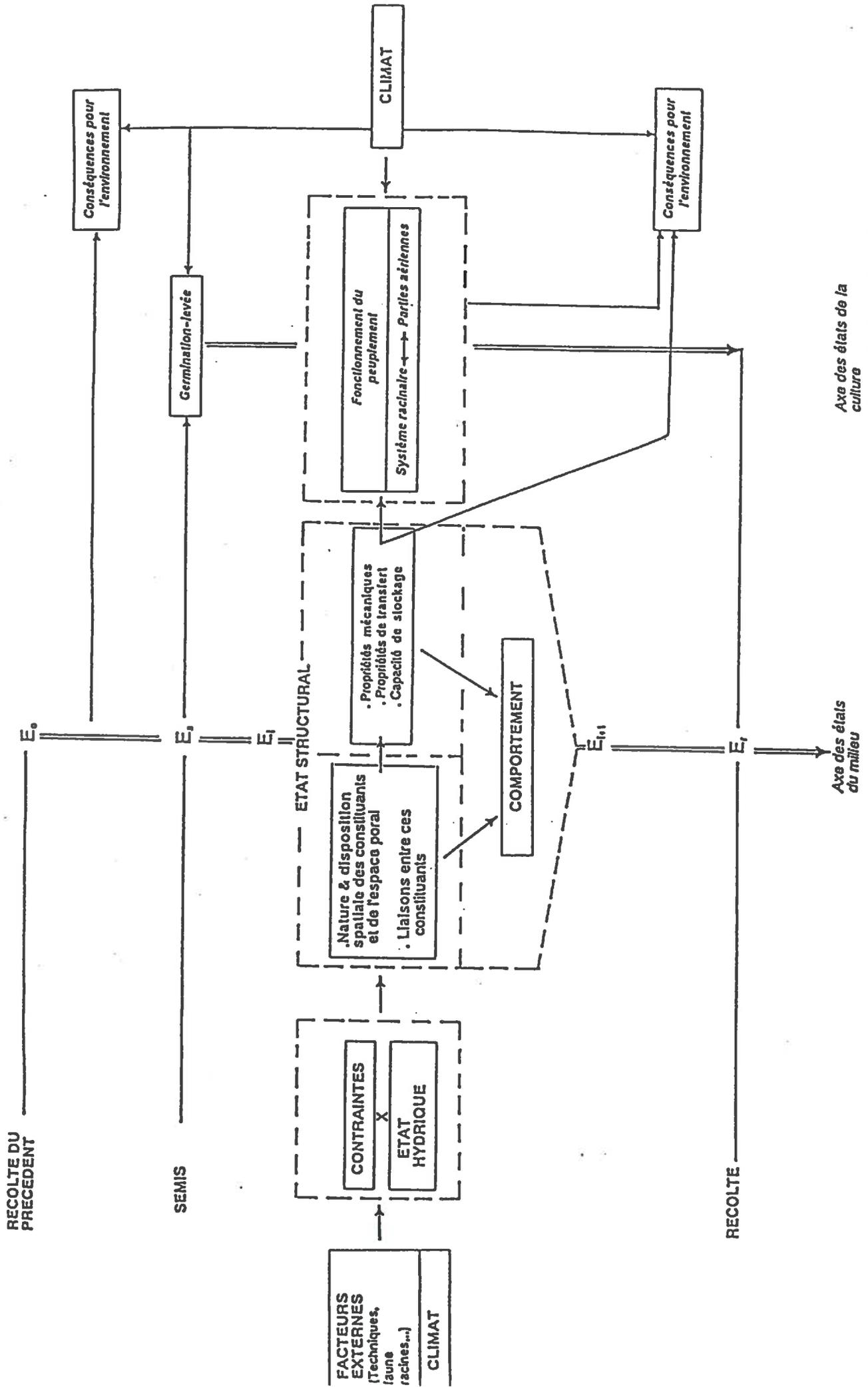
PREMIERE PARTIE :

CHOIX DE LA MÉTHODE DE TRAVAIL

CHAPITRE I :

**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES TRAVAUX PORTANT SUR
LA CARACTÉRISATION DE LA STRUCTURE DU SOL
ET LA RELATION SYSTEME DE CULTURE-ÉTAT STRUCTURAL**

Figure 1-1 : Place de la structure dans le fonctionnement du champ cultivé



Axe des états de la culture
(élaboration du rendement et de la qualité)

Axe des états du milieu

L'état physique des couches superficielles du sol d'une parcelle cultivée détermine, à chaque instant, les conditions de l'application des techniques culturales, et celles de la croissance et du développement des peuplements végétaux. Il détermine également les caractéristiques de circulation de l'eau, et donc, à l'échelle du bassin versant, les risques d'érosion et de pollution. Cet état est en constante évolution (Hénin *et al.*, 1969) : il est le résultat d'interactions complexes entre les propriétés du matériau constitutif, la terre, et différents facteurs d'origine naturelle (climat, faune) ou résultant plus ou moins directement de l'activité humaine (techniques culturales, racines des plantes, faune).

L'agronome (Sebillotte, 1974), comme le chercheur en science du sol, sont amenés à caractériser cet état physique dans un double souci : **celui d'en comprendre le déterminisme, et celui d'en étudier les répercussions sur le fonctionnement du peuplement végétal, la praticabilité, l'environnement.**

On a représenté sur le schéma de la figure I-1 une vue d'ensemble des relations à prendre en compte pour atteindre ces objectifs. Ce schéma découle d'une théorie du fonctionnement du champ cultivé (Sebillotte, 1974, 1990), reposant sur une **décomposition des relations qui existent au sein du système complexe CLIMAT-SOL-PLANTES sur lequel l'agriculteur intervient par ses techniques. Il envisage donc le champ cultivé comme un objet en constante évolution.** Les phénomènes physiques y sont ainsi considérés comme des processus dynamiques à l'interface des actions de l'agriculteur, du milieu et du fonctionnement du peuplement végétal.

Ce schéma est organisé, par commodité, suivant deux axes orthogonaux : celui du temps, vertical, qui marque l'évolution permanente des états du sol et du peuplement, et celui, horizontal, reliant les facteurs responsables de l'évolution de l'état physique aux conséquences de ce dernier.

Dans un premier temps, nous commenterons ce schéma, en abordant successivement les problèmes posés par la définition de la structure, l'étude de son évolution puis celle de ses conséquences.

Dans un second temps nous analyserons, à travers une étude bibliographique, la manière dont la caractérisation de la structure et l'étude de son évolution sous l'effet des systèmes de culture ont été abordées.

1. PLACE DE LA STRUCTURE DU SOL DANS L'ETUDE DU CHAMP CULTIVE

1.1. Définition de la structure

Bien qu'utilisé très couramment aussi bien par des praticiens que par les agronomes ou les spécialistes de science du sol, le concept de structure du sol est loin de faire l'objet d'un consensus. Les définitions en sont nombreuses et contiennent toutes une part d'ambiguïté. On peut néanmoins les classer entre deux tendances extrêmes :

- celle pour laquelle la structure est définie, pour un état donné, par deux composantes (Manichon, 1982 ; Stengel, 1990) : *"la disposition spatiale des particules constitutives du sol et la nature et l'intensité des liaisons qui existent entre elles"* ;

- à l'opposé, la conception la plus globale est celle de Dexter (1988) qui intègre à la définition du concept les propriétés qui déterminent la structure et/ou sont influencées par elle : *"soil structure may be defined as the spatial heterogeneity of the different components or properties of soil"*.

La première définition correspond à la position de la science du sol française. On considère que :

- la structure du sol, à un moment donné, résulte de comportements déterminés par les propriétés intrinsèques du matériau et les contraintes qu'il a subies. La connaissance de ces comportements est essentielle pour le raisonnement des effets des systèmes de culture sur le milieu, ou celui de l'évolution de ce dernier sous l'action des agents climatiques ;

- et qu'elle détermine les propriétés de transfert et mécaniques qui vont jouer sur le fonctionnement du peuplement végétal et la traficabilité⁽¹⁾. C'est de la précision avec laquelle sont connues les relations entre structure et propriétés que dépendra le jugement que l'on pourra porter sur les conséquences d'un état observé.

Avec le point de vue adopté dans la seconde définition, le concept de structure implique une caractérisation plus globale, non seulement par la répartition spatiale des éléments qui le constituent, mais aussi par celle de toute variable déterminée par cette organisation et définie dans le volume de sol. Ainsi, par exemple, la stabilité structurale, qui permet d'évaluer, sur de petits agrégats, la résistance à la dégradation par l'eau, est, dans cette conception, intégrée à la notion de structure. D'autres auteurs caractérisent la structure par les propriétés physiques qu'elle induit : propriétés de transfert (Cassel & Nelson, 1985 pour l'eau ; Mettauier & Hinsinger, 1989 pour l'air) ; ou mécaniques (Billot, 1982). Le risque est ici d'une caractérisation très contingente des conditions dans lesquelles elle est établie, en particulier la teneur en eau et sa variabilité spatiale ; il est également de ne pouvoir remonter au déterminisme de l'état observé (Manichon, 1982 ; Coulomb, 1991).

1. A ce propos, notons (avec Stengel, 1990) que le statut des propriétés mécaniques est ambigu, étant à la fois conséquence de la structure et partie prenante de sa définition car conditionnant l'intensité des liaisons entre particules élémentaires

Deux points communs existent cependant entre ces deux tendances :

- elles ne préjugent en rien de la **dimension des particules** considérées,
- elles font toutes deux référence explicitement à l'**organisation spatiale** des constituants.

a. La dimension des particules

Dexter (1988), Stengel (1990), Papy *et al.*, (1990), soulignent l'amplitude de la gamme concernée : des particules d'argile aux blocs créés par le labour, la taille des éléments concernés varie du micron à plusieurs décimètres.

A quelque échelle que l'on se situe cependant, chaque particule de terre est l'agglomération de particules plus petites. Cette observation a conduit certains auteurs à considérer l'existence d'une organisation hiérarchique de la structure : bien que l'on puisse définir de nombreux étages dans cette construction hiérarchique (par exemple dans le glossaire de pédologie, (ORSTOM, 1969), il est distingué cinq classes de particules selon leur taille), on distingue fondamentalement trois niveaux d'approche : le premier (infra-millimétrique) est celui des particules élémentaires (définies par la composition granulométrique du matériau); le second (du mm au cm) est celui des agrégats, constitué par le regroupement de ces particules élémentaires; enfin, l'assemblage de ces derniers forme le troisième niveau hiérarchique, celui des mottes (du cm au dm). En poursuivant cette hiérarchie, il semble naturel de proposer un étage supplémentaire, celui du profil cultural. Cette attitude reste cependant exceptionnelle, particulièrement hors de France, et on peut le regretter, dans la mesure où le profil constitue un système dont l'étude se situe à un niveau d'échelle plus compatible avec les facteurs de structuration impliqués par les opérations culturales.

D'un niveau hiérarchique à l'autre, les propriétés et les caractéristiques varient. Ainsi, les ordres les plus bas correspondent à des densités plus fortes, car chaque ordre hiérarchique exclue l'espace poral correspondant aux interstices entre les éléments de l'ordre suivant (Dexter 1988). De même Hadas (1987), Kuipers & Koolen (1989), montrent que les forces de liaison inter-agrégats sont plus faibles que celles existant au sein de ces derniers, à quelqu'ordre que l'on se situe. Enfin, plusieurs travaux suggèrent que les *propriétés du mélange de particules d'un ordre donné ne résultent pas de la simple addition de celle des parties* : Fiès, (1982) pour le niveau des particules élémentaires ; Guérif (1990) et De Leon (1991) montrent que le comportement d'un assemblage d'agrégats dépend non seulement de leur résistance mécanique propre, mais aussi des propriétés de l'assemblage ; enfin Guérif (1984), montre que le comportement mécanique d'un profil dépend non seulement des comportements des couches élémentaires, mais également de leurs interactions.

Ces considérations conduisent à la prudence quant à l'extrapolation au champ de résultats acquis à des niveaux d'échelle inférieurs, et justifient que l'on s'intéresse à plusieurs niveaux d'organisation de la structure du sol.

b. L'organisation spatiale

A l'échelle du champ cultivé, elle résulte du fait que les contraintes appliquées le sont rarement de façon homogène à l'ensemble du volume de sol que l'on considère. Ainsi par exemple, l'action du gel sera d'autant plus intense que l'on se situera à un niveau proche de l'interface sol-atmosphère ; l'action des outils portera sur des volumes de sol variables en fonction de leur profondeur d'action, celle des pneumatiques sera localisée au voisinage des passages de roues.

Cette variabilité spatiale des contraintes appliquées entraîne une variabilité des états qui est un obstacle à l'extrapolation au champ de résultats acquis en laboratoire sur des milieux soit homogènes et isotropes (échantillons remaniés), soit d'un volume tel qu'il ne représentent que très partiellement la variabilité réelle d'une parcelle cultivée (échantillons de sol non perturbés). Toute tentative d'extrapolation devra donc comprendre une **étape de caractérisation de la variabilité spatiale de la structure.**

1.2. Evolution de l'état structural

L'état structural évolue constamment sous l'action des agents naturels et anthropiques. A un moment donné, l'état que l'on caractérise ne représente donc qu'une modalité particulière dans une gamme très large (Manichon, 1982 ; Manichon et Roger-Estrade, 1990). Cette évolution (représentée le long de l'axe vertical du schéma de la figure I-1) est liée, au cours d'un cycle de culture, aux actions culturelles successives exerçant des effets contradictoires (compactage et fragmentation) et brutaux. Elle est également le fait d'actions, parfois plus lentes et progressives, de facteurs naturels. On observe également une variabilité inter-annuelle, surtout marquée lorsque les cultures se succédant impliquent des dates, des conditions et des modalités de travail différentes, et lorsque le climat est lui-même très variable.

Vis-à-vis de la prévision de ces évolutions, **c'est la connaissance des comportements mécaniques** (qui conditionnent la résistance mécanique au compactage ou à la fragmentation et la transmission des contraintes dans le milieu) qui est déterminante. Ces comportements dépendent non seulement des propriétés des éléments structuraux, mais également de celles de l'assemblage de ces éléments (Guérif, 1990), et des conditions dans lesquelles s'est formé cet assemblage (humidité, pressions appliquées). La connaissance de l'histoire est donc essentielle pour comprendre ou prévoir des comportements.

Mais, l'enregistrement en continu (ou sur des pas de temps très courts) des variations d'état structural et de l'occurrence des agents externes qui en sont responsables est matériellement difficilement envisageable. Il est donc nécessaire, pour étudier l'état structural

au champ, de choisir **des critères de caractérisation contenant une information sur les états antérieurs et leurs déterminants** (Manichon, 1982). On peut ainsi reconstituer l'histoire de la parcelle, par la distinction de ce qui ressort d'actions anthropiques (récentes ou plus anciennes), ou d'effets des agents naturels.

1.3. Conséquences de la structure du sol sur le fonctionnement du peuplement végétal et l'environnement

Les propriétés de transfert sont déterminantes pour évaluer les qualités trophiques du milieu ainsi que les risques de pollution et d'érosion ou sa traficabilité .

Ces propriétés dépendent du volume et de la configuration de l'espace poral du sol (de l'importance des vides, mais également de leur distribution dimensionnelle et de leur continuité). Comme pour le comportement mécanique, l'état hydrique joue un rôle essentiel : à un instant donné, il définit le taux de remplissage par l'eau de la porosité et l'énergie de rétention par la phase solide ; mais ses variations au cours du temps conditionnent également l'évolution de l'espace poral (phénomènes de gonflement – retrait liés aux alternances humectation – dessiccation du matériau).

Vis-à-vis de la croissance du végétal, l'état physique du sol et son humidité vont déterminer au cours du cycle de culture (Boiffin & Monnier, 1982) :

- Le profil de température, dont dépendent les vitesses de croissance des racines et des jeunes organes situés près du sol, les vitesses de germination et de levée des plantules, ainsi que les cinétiques de minéralisation des matières organiques.

- La teneur en oxygène au voisinage des points de consommation de cet élément (racines, semences et plantules, matières organiques fraîches).

- Les possibilités d'élongation et de croissance radiale des organes souterrains (racines, tigelles).

- La quantité et la mobilité de l'eau disponible pour assurer les flux d'imbibition puis de transpiration.

Vis-à-vis des conséquences pour l'environnement, l'état structural du sol intervient directement en conditionnant les flux d'eau et d'éléments minéraux, et, indirectement, à travers l'efficacité d'interception du peuplement. Ainsi, la circulation de l'eau au voisinage de la saturation dépend du volume et de la configuration de l'espace poral structural. Ce dernier, chemin préférentiel des transferts rapides (Lafolie *et al.*, 1990), favorise la circulation des solutés en profondeur, y compris celle des ions réputés peu mobiles. Par ailleurs, un état structural défavorable à la croissance et au fonctionnement du système racinaire limite l'absorption de l'azote par le peuplement et accroît les risques de pollution par les nitrates. Cependant, les situations anoxiques favorisent la dénitrification, et ont donc un effet inverse. Il est donc nécessaire d'effectuer un bilan de ces différents processus avant de porter un jugement. Enfin, ces propriétés sont également en jeu lorsqu'il s'agit d'*érosion* : quand la vitesse d'infiltration du sol devient inférieure à l'intensité des pluies, il y a apparition d'excès d'eau superficiel, et ruissellement si le terrain est en pente (Boiffin, 1984).

2. CARACTERISATION DE L'ETAT STRUCTURAL ET ETUDE DE SON EVOLUTION SOUS L'EFFET DES SYSTEMES DE CULTURE

2.1. Les différentes méthodes de caractérisation selon les objectifs poursuivis

La présentation précédente souligne à quel point les choix possibles en matière de niveau d'échelle, de variable d'état ou d'indicateur des effets sont liés aux objectifs que l'on se fixe. Nous organiserons la présentation des méthodes employées pour la caractérisation de la structure du sol au champ, à partir des objectifs poursuivis par les auteurs des différents travaux recensés. Nous distinguerons ainsi ceux qui cherchent à prévoir les évolutions de la structure sous l'effet des agents naturels ou anthropiques, ceux qui étudient les conséquences de l'état structural sur la végétation ou l'environnement et ceux, enfin, qui associent ces deux objectifs dans leur démarche.

a. Prévoir des évolutions

Si l'on ne tient pas compte des recherches relativement éloignées des préoccupations relatives au fonctionnement du champ cultivé (Bonneau & Souchier, 1979), on peut distinguer deux types d'approches dans les travaux essentiellement motivés par l'étude de l'évolution de la structure du sol :

- La description directe des états

Si, dans certains travaux, les auteurs étudient les distributions relatives de la phase solide et des vides au sein des horizons travaillés (Chancellor et Schmidt, 1962 ; Dexter, 1976 ; Chancellor, 1976 ; Horn, 1988), la plupart ne font intervenir que l'étude de la distribution des calibres des éléments structuraux : c'est un indicateur de la fragmentation (Lyles & Woodruff, 1961) ; elle conditionne la sensibilité à l'érosion (Zobeck & Onstadt, 1987), ou au compactage (Papy, 1987).

Les descriptions sont fondées sur une approche morphologique complétée par une détermination de la distribution des calibres des agrégats et de leurs assemblages en mottes, principalement grâce à des techniques de tamisage (Van Bavel, 1953 ; Gardner, 1956 ; Larson, 1964 ; Ojeniyi & Dexter, 1979 ; Hadas, 1987). Cette approche a surtout été développée par les auteurs étudiant la relation sol-outil (Hadas *et al.*, 1978). **La principale difficulté rencontrée est la part d'arbitraire liée à la procédure de tamisage.** Celui-ci est effectué de manière plus ou moins énergique sur des échantillons secs ou humides. Pour s'affranchir de cette contrainte, un certain nombre de méthodes basées sur l'analyse *in situ* d'images photographiques ont été développées. Ainsi, Coulomb *et al.* (1993a), proposent une approche basée sur l'analyse de photographies réalisées *in situ* sur la face d'observation du profil cultural ; les images sont ensuite analysées à l'aide de techniques de morphologie mathématique. La description associe alors à la répartition par classe de taille des éléments structuraux, des informations sur leur répartition géographique au sein du profil.

- *L'étude des comportements structuraux*

L'étude porte sur l'évaluation de comportements (à partir d'échantillons de petits agrégats), sous l'effet de contraintes externes (Hénin *et al.*, 1969 ; Emerson, 1977 ; Hamblin, 1985 ; Kay *et al.*, 1988 ; Groenevelt, 1989 ; Kemper *et al.*, 1989). Les auteurs cherchant ici à évaluer une *stabilité structurale* (c'est-à-dire l'aptitude, pour un matériau donné à conserver au cours du temps une organisation donnée). Celle-ci est appréciée à travers la mesure des réactions d'échantillons standardisés d'agrégats soumis à diverses contraintes, elles-mêmes standardisées. Deux types de préoccupations sous-tendent ces approches :

- déterminer les caractéristiques intrinsèques (c'est-à-dire indépendantes de l'état initial) du matériau (Monnier *et al.*, 1982 ; Stengel, 1990),
- évaluer l'effet du climat, des opérations culturelles ou des systèmes de culture sur l'évolution de ces comportements au cours du temps (Hamblin, 1985 ; Kay *et al.*, 1988 ; Cucci *et al.*, 1988). On cherche bien ici à évaluer des effets à plus ou moins long terme des systèmes de culture.

Par rapport à nos objectifs, la difficulté est ici de *séparer les caractéristiques propres de la structure, des réactions de celle-ci à des contraintes externes* : le comportement dépend en effet souvent de la contrainte elle-même et de son mode d'application (par exemple, durée d'application de la pression lors de tests de résistance au compactage - Guérif, 1984).

b. Prévoir les répercussions de la structure du sol sur le fonctionnement des peuplements végétaux et l'environnement

On distinguera également ici deux groupes de travaux :

- *La caractérisation directe de l'espace poral*

Considérant que l'espace poral est déterminant vis-à-vis des conséquences de l'état structural, on ne s'intéresse ici qu'à sa caractérisation (Russel, 1971), sans tenir compte de celle de la phase solide. Les mesures de porosité sont en effet effectuées indépendamment de celles portant sur la phase solide, sans qu'existent réellement des moyens de passage de l'une à l'autre. Cela tient à l'absence de modèles de structure suffisamment proches de la réalité pour qu'on puisse en déduire une morphologie de l'espace poral.

La porosité est évaluée soit de manière très globale, soit de façon plus précise, en définissant des catégories de pores en fonction de leur taille (Soane *et al.*, 1981). Nous reviendrons plus loin sur ce type d'approche.

- *La description indirecte de la structure (à travers les propriétés)*

Dans ces travaux, les auteurs mesurent une ou plusieurs propriétés déterminée(s) par la structure et affectant plus ou moins directement la croissance et le développement des plantes : résistance pénétrométrique (Taylor et Ratliff, 1969 ; Russell et Goss, 1974 ; Billot, 1982) ; propriétés de transfert d'eau (Cassel et Nelson, 1985), ou d'air (Mettauer et Hinsinger, 1989).

Nous avons souligné plus haut le risque d'une telle caractérisation très contingente des conditions dans lesquelles elle est établie et n'offrant pas toujours la possibilité de remonter au déterminisme des états observés.

c. Prévoir à la fois les évolutions et les conséquences de l'état du profil cultural

Appartiennent à cette catégorie les auteurs utilisant deux méthodes, par ailleurs complémentaires : l'analyse de la porosité (Monnier *et al.*, 1973 ; Stengel, 1979) et la description du profil cultural (Manichon, 1982). Dans ces deux approches déterministes, la motivation est bien de se donner les moyens d'évaluer les conséquences d'un état *tout en étant capable d'analyser l'effet des principaux facteurs de structuration*.

- *L'analyse de la porosité*

Cette analyse (Stengel, 1979 ; Coulon, 1988 ; Le Bissonais, 1988) repose sur la distinction dans le volume poral de deux ensembles de pores d'origines différentes :

- *ceux constituant la porosité **texturale***, liée à la constitution du matériau et à son état d'hydratation. On peut distinguer deux types de pores, dont l'existence a été confirmée par la porosimétrie à mercure (Fiès, 1984) : les premiers, (lacunaires), résultent du retrait de la phase argileuse entre les grains du squelette à la dessiccation; les seconds sont internes à la phase argileuse ;

- et *ceux qui définissent la porosité **structurale*** : résultant des vides entre assemblages élémentaires, cet espace poral structural est fortement affecté par les agents extérieurs (travail du sol, facteurs climatiques, faune).

L'intérêt d'une telle analyse est bien de permettre une quantification de phénomènes liés aux propriétés du sol (par exemple son fonctionnement hydrique (Curmi, 1987 ; De Cockborne *et al.*, 1986), tout en faisant la part de ce qui est intrinsèque de ce qui ne l'est pas. Par contre, cette analyse, plus pertinente pour notre objet que celle permise par une évaluation globale de la densité par exemple (Håkansson, 1988), ne prend pas en compte la morphologie de l'espace poral et pose un gros problème d'échantillonnage. Ce dernier point n'est cependant pas spécifique, et la forte variabilité spatiale de l'état structural que l'on observe au champ pose ce problème, quelle que soit la mesure physique que l'on effectue.

- *La description du profil cultural* (Manichon, 1982 ; Gautronneau et Manichon, 1987)

Elle répond, elle aussi, aux deux objectifs cités ci-dessus, mais, conçue pour pouvoir être opératoire au champ, elle prend en compte explicitement la variabilité spatiale, en l'utilisant dans une démarche de diagnostic sur l'origine des états observés. Cette méthode a été utilisée pour l'analyse du fonctionnement hydrique de la couche labourée (Papy, 1984), l'étude au champ de l'enracinement du maïs (Tardieu, 1987), l'analyse du rôle de l'état structural de la couche labourée sur l'élaboration du rendement du blé (Meynard, 1985 ; Manichon *et al.*, 1988 ; Leterme *et al.*, 1994). Les résultats positifs obtenus justifient le choix de l'échelle d'approche et des critères retenus. Associée à une analyse poussée de la dimension des éléments structuraux, cette méthode a également permis l'étude expérimentale du comportement du sol au labour (Coulomb *et al.*, 1993b) ; des travaux actuellement en cours visent à préciser le rôle de la distribution dimensionnelle des éléments sur les transferts d'eau et l'absorption racinaire. En fait Manichon & Roger-Estrade (1990), ainsi que Stengel (1990), montrent la complémentarité des deux approches, pour une caractérisation plus fine de l'espace poral structural.

L'indicateur de l'effet des systèmes de culture sur la structure du sol que nous proposerons plus loin devra être mesurable au champ par une méthode qui soit peu contingente des conditions d'humidité au moment de la mesure, qui tienne compte de la variabilité spatiale, et qui, enfin, permette d'analyser le déterminisme des états observés. *C'est a priori la caractérisation morphologique du profil cultural qui répond le mieux à ce cahier des charges, et l'évaluation de l'indicateur reposera sur une caractéristique de ce type.*

2.2. Effets des systèmes de culture sur l'évolution à long terme de l'état structural

Ces effets ne sont pas seulement directs, c'est-à-dire, dans une agriculture mécanisée, liés au travail du sol (fragmentation) ou à la circulation des engins de culture (compactage) : le système de culture conditionne aussi l'intensité et parfois la nature de l'action sur le sol des agents naturels (climat, faune, racines,...), à travers le calendrier de l'occupation de la parcelle et celui des interventions culturales. D'autre part, la constitution chimique de la terre (teneur en matières organiques, pH, salinité,...) évolue en fonction des cultures pratiquées et de la nature des amendements apportés ; cette évolution s'extériorise parfois à travers une modification des comportements structuraux du matériau.

Les travaux portant sur l'étude des effets à long terme des systèmes de culture sur le sol sont peu nombreux, l'essentiel des recherches portant sur l'analyse d'évolutions à des

pas de temps beaucoup plus courts que celui de la succession de cultures. Parmi les travaux abordant cette échelle de temps, ceux qui pourraient nous être utiles sont encore plus rares ; en effet, dans les dispositifs de longue durée qui existent, les chercheurs ont le plus souvent privilégié la comparaison directe entre traitements à travers les performances des cultures, sans suivi de l'évolution des états du milieu.

Certains travaux comportent cependant suffisamment d'informations pour permettre de relier ces évolutions à l'histoire culturale des parcelles. Nous les classerons en trois groupes :

a. Les recherches ne prenant pas en compte explicitement les effets propres au travail du sol

L'évolution de la structure du sol est étudiée à travers celle de la constitution du matériau, dans des essais de longue durée. C'est le cas par exemple des dispositifs de Rothamstead (Currie, 1966 ; Bullock & Thomasson, 1979), ou de celui des 42 parcelles de Versailles (Burgevin & Hénin, 1939 ; Hénin & Monnier, 1956), pour lequel les effets de différents types d'amendements sur un sol limoneux sont comparés depuis plus de 60 ans. On peut citer également l'essai de Montluel, dans l'Ain, où l'on a mis en place un dispositif de longue durée destiné à mesurer et à comparer l'influence de divers régimes de restitutions organiques sur la fertilité d'un sol limoneux très battant à tendance hydromorphe (Boiffin *et al.*, 1975).

Plus récemment, mais toujours dans le même esprit, Kay *et al.* (1988) ont publié des résultats portant sur l'évolution pendant 15 ans de parcelles soumises à des successions de cultures à base de maïs ensilage et de brome. Les indicateurs de l'état du sol sont des tests de stabilité à l'eau et des mesures de cohésion sur petits agrégats. Les effets sur le sol de cinq systèmes de culture présentant des durées variables de la culture de brome interrompant celle de maïs, sont imputés à l'évolution d'un stock de "*matériaux stabilisants*", essentiellement d'origine organique. L'influence du système de culture sur la composante physique de la fertilité passe donc ici par son action sur le bilan des matières organiques. Les auteurs proposent de quantifier cet effet à l'aide d'un modèle compartimental d'évolution du stock de "*matériaux stabilisants*", associé à une relation entre le niveau de ce stock et un indice de stabilité structurale. Ce modèle prévoit l'atteinte d'un état d'équilibre après une dizaine d'années de pratique du système de culture (Baldock & Kay, 1987 ; Angers *et al.*, 1987 ; Gibbs & Reid, 1988).

Ces travaux font ressortir l'existence d'effets à long terme des systèmes de culture, à travers l'évolution d'indices de stabilité (ou d'instabilité) structurale. Ce type d'approche soulève néanmoins deux types de questions. Tout d'abord, les relations entre ces effets et le fonctionnement du peuplement végétal sont parfois difficiles à établir : ainsi, dans l'essai de Montluel, Boiffin *et al.* (1975) constatent un effet positif de l'âge de la prairie sur les résultats des tests d'instabilité structurale, mais ne peuvent relier ces valeurs à la densité de

peuplement du maïs suivant la prairie⁽²⁾. Une origine possible de cette discordance tient au fait que la battance met aussi en cause l'état structural du lit de semence ; or, si la présence de la prairie augmente la stabilité structurale, elle a également pour effet de laisser une structure très fine (action intense de fragmentation par les racines – Bui Huu Tri, 1968), ce qui accroît la sensibilité aux pluies. La valorisation de l'effet précédent prairial implique ici une modification du mode de préparation du sol pour le semis du maïs (en vue de limiter la quantité de terre fine créée en surface). Une autre difficulté est le caractère très contingent de l'effet améliorateur des matières organiques : Boiffin (1976) montre par exemple que l'histoire hydrique du matériau joue sur le résultat du test de stabilité structurale.

Ces deux observations montrent la difficulté de l'étude des effets cumulatifs des systèmes de culture sur les états du milieu. En particulier, l'extériorisation de ces effets sur le comportement du sol ou de la végétation ne peut être analysée indépendamment de l'ensemble des facteurs intervenant sur le fonctionnement du système climat-sol-peuplement végétal.

b. Les recherches prenant en compte les effets de compactage liés aux interventions culturales

Les travaux classés dans ce second groupe sont conduits dans des pays où les chercheurs sont surtout préoccupés par l'utilisation croissante de matériels lourds et puissants, utilisés souvent en conditions humides dans des systèmes où les cultures de printemps reviennent fréquemment dans la succession (Pays-Bas, Angleterre, Suède...).

Les auteurs ont étudié des parcelles d'agriculteurs en cherchant à mettre en évidence et à quantifier d'éventuels effets dégradants des systèmes de culture. Ceux-ci sont caractérisés par les variables qui permettent d'estimer l'importance et la fréquence des compactages (proportion de la surface roulée, nature et pression de gonflage des pneumatiques, charge moyenne sur essieu,...). Par contre, la fragmentation par les outils de travail du sol n'est pas prise en compte, et l'on postule de fait que le facteur essentiel d'évolution de l'état du sol est l'énergie de compactage qui lui est appliquée.

Dans un article récent, Kuipers et Van De Zande (1994) passent en revue les différents indices permettant de comparer les systèmes de culture sur la base d'une "intensité de trafic". Les critères utilisés (ces auteurs en recensent 11) vont de la simple estimation du taux de recouvrement de la parcelle par les pneumatiques (Frese, 1969 ; Holloway & Dexter, 1990) durant une ou plusieurs opérations culturales, au calcul d'un "indice de risque de tassement" (Compaction Risk Factor en anglais, exprimé en $kN^2ha^{-1}an^{-1}$ – Van de Zande, 1991). Il s'obtient en estimant la surface de la parcelle entrant en contact avec les pneumatiques, que l'on multiplie par la charge sur essieu et la pression de gonflage des pneumatiques. Cet indice ne tient compte ni de la vitesse d'avancement, ni de l'humidité

2. Les 3 systèmes de culture comparés de 1963 à 1984 étaient :

A. Maïs/blé/colza/blé, pailles enlevées ;

B. Maïs/blé/colza/blé, pailles enfouies ;

C. rotation A + 4 ans de prairie (fétuque+trèfle blanc).

du sol lors des opérations. Sur ces bases on peut caractériser chaque système de culture par un *niveau de risque potentiel*, lié aux contraintes appliquées par unité de surface. Ce niveau est ensuite mis en rapport avec l'état structural de la parcelle, appréhendé de manière globale, à travers l'évaluation de la densité apparente ou d'une résistance pénétrométrique moyenne.

Les résultats montrent :

- des différences significatives de la valeur de cet indice selon le type de système de culture pratiqué,
- l'existence d'une liaison positive **mais très variable** suivant les années, entre la valeur de l'indice et le degré de compactage des couches travaillées (Van de Zande, 1991). Une explication possible de ce résultat tient au fait que l'on ne considère que le compactage, sans prendre en compte les actions de fragmentation qui permettent d'en corriger les effets, plus ou moins efficacement suivant les types d'interventions et les conditions de leur application (humidité). D'autre part, on ne distingue pas, dans ces travaux, les compactages ayant lieu avant le labour et ceux qui lui succèdent : l'état structural du sol au moment de l'application de la contrainte est ignoré, et l'on cumule des actions dont les effets pour certaines ont, pour partie, été supprimés.

Dans le même esprit, plusieurs modèles de prédiction du tassement ont été proposés (par exemple Raghavan & Mc Kyes, 1978 ; Van Den Akker & Van Wijk, 1987). Ils utilisent en entrée des variables permettant de calculer la pression appliquée au sol (caractéristiques des pneumatiques, charge sur essieu,...). Ces travaux reprennent en le perfectionnant le modèle de déformation proposé par Boussinesq (1885). Ces modèles mécaniques ne peuvent cependant être utilisés pour la simulation de l'évolution à long terme de la couche labourée, en raison de deux difficultés majeures : le manque de lois de déformation de la structure prenant en compte l'état initial de celle-ci, **ce qui interdit d'enchaîner des modèles de déformation successifs** (Unger & Van Doren, 1982), et, surtout, le manque de connaissances théoriques permettant de prendre en compte l'effet des opérations de fragmentation s'exerçant sur l'ensemble des couches travaillées. C'est le cas du labour en particulier, dont la modélisation est également rendue délicate par le déplacement de la terre lors de cette opération (Coulomb, 1991). Ainsi, ces modèles ne permettent pas vraiment d'étudier (de simuler) l'évolution à moyen et long terme de la structure des horizons travaillés sous l'effet des systèmes de culture.

Parallèlement, on assiste, depuis une vingtaine d'années, au développement d'essais sur des systèmes de culture où les passages d'engins sont tous les ans strictement localisés dans des zones de roulage, de manière à préserver une part importante de la parcelle de tout compactage en cours de culture (*controlled traffic* - Voorhess, 1979 ; Perdock & Lamers, 1985 ; Hadas, 1987), ou *zero tillage* - Dickson & Campbell, 1990). Ces auteurs comparent les effets de ces systèmes sur l'état structural à partir d'évaluations de la porosité globale des horizons de surface, ou de différentes propriétés (résistance pénétrométrique, aération, réserve en eau,...). Ces travaux font ressortir une amélioration de la structure du

sol dans les zones non roulées, lorsque l'on passe d'un mode classique de conduite à un contrôle strict des zones de passage. Cette amélioration porte sur une augmentation de la porosité globale, une diminution de la résistance pénétrométrique et de l'effort de traction.

Par rapport à nos propres recherches, un point apparaît intéressant dans ces derniers résultats : on observe une différenciation progressive (certaines observations portent sur des durées de l'ordre de la dizaine d'années) de l'état structural entre les traitements sans compactage et les témoins conduits de manière traditionnelle (Lamers *et al.*, 1986 ; Hadas, 1987). Ceci confirme l'existence d'effets cumulatifs du système de culture sur l'état structural.

c. Les recherches prenant en compte explicitement les effets sur le sol de l'ensemble des interventions culturales

On a regroupé ici les travaux mettant en comparaison différentes modalités de travail du sol, afin d'en comprendre les effets, à plus ou moins long terme, sur l'état du profil cultural. A l'inverse des recherches présentées précédemment, on tient compte ici de l'ensemble des actions exercées par les équipements, qu'elles contribuent à la fragmentation ou au compactage des horizons travaillés.

Le souci d'évaluer les effets à long terme sur le milieu de la simplification du travail du sol a conduit à la mise en place en France d'essais de longue durée à Grignon dès 1958, puis par l'ITCF à partir de 1971, sur plusieurs sites. Le principe de ces essais était la comparaison de 3 régimes de travail du sol (labour, travail superficiel, semis direct). Les indicateurs de l'état structural portaient d'une part sur les systèmes de porosité (Stengel, 1976 ; Guérif, 1991), d'autre part sur l'observation de profils culturaux (Manichon et Bodet, 1976). Les auteurs concluent à la mise en place d'un "*état structural type*", correspondant à l'atteinte d'un état qui pourrait être considéré comme représentatif d'un équilibre (Guérif, 1990, 1991) dans le cas des situations en semis direct. Cet état diffère de celui obtenu dans les traitements labourés par une valeur plus faible de la porosité totale de la couche préalablement travaillée, l'écart ne concernant que l'espace poral structural. Il se caractérise également par une certaine variabilité spatiale de cette porosité, celle-ci étant plus élevée en surface, où l'intensité de l'effet des agents climatiques est plus forte, et dans les zones indemnes de passages de roues récents. Des recherches similaires ont également été entreprises en Angleterre, aboutissant à des conclusions comparables (Cannell *et al.*, 1978).

A ces travaux visant à mieux comprendre la relation entre l'itinéraire technique et l'évolution de l'état structural, il faut ajouter ceux de Manichon & Sebillotte, (1973, 1975), sur des systèmes de culture pratiqués dans les limons du Béarn, et caractérisés par deux successions principales : monoculture du maïs, et succession prairie (de plus ou moins longue durée) – maïs. Les interventions culturales ont été caractérisées par les paramètres qui, pour un état structural donné, déterminent l'intensité de la déformation subie par le sol : l'énergie appliquée et l'humidité au moment des travaux. L'état du profil cultural était alors observé au champ, *non seulement à travers une évaluation globale de la porosité, mais également sur la base d'une description morphologique stratifiée*, comportant la

caractérisation de deux niveaux d'organisation de l'état structural : l'état interne des mottes d'une part, l'appréciation de leur mode d'assemblage et de leur calibre d'autre part. Les résultats montrent l'échec de la caractérisation globale de la porosité pour différencier les effets des systèmes de culture étudiés. Par contre, l'étude des deux niveaux d'organisation structurale se révèle pertinente, dans la mesure où elle permet d'expliquer en partie la liaison itinéraire technique-état du profil, et surtout de mettre en évidence le comportement très différent des deux systèmes comparés vis-à-vis de leurs effets sur l'état structural. Reprenant ces résultats, Manichon (1982) propose un modèle qualitatif d'évolution de l'état du profil cultural, explicitant l'effet des opérations culturales récentes (de la récolte du précédent cultural à la mise en place du maïs). Contrairement aux auteurs précédents, Manichon prend en compte la chronologie des opérations mécaniques appliquées au profil cultural. Il distingue en particulier les compactages qui, placés avant le labour, sont suivis d'une fragmentation, et ceux qui sont postérieurs au travail de la charrue. Ses résultats montrent que l'on peut appréhender l'effet des compactages antérieurs au labour en utilisant la méthode de description morphologique du profil qu'il propose, et ce plus particulièrement au niveau de l'état interne des mottes. *Ceci suggère d'utiliser ce niveau de description de l'état structural pour rechercher d'éventuels effets cumulatifs du système de culture.*

3. CONCLUSION

Aucun des travaux que nous venons de présenter ne correspond entièrement à notre objectif : modéliser l'évolution à long terme de l'état structural de parcelles labourées.

Dans les essais de longue durée, les recherches portent essentiellement sur l'évolution de la constitution du matériau ; l'étude des effets propres au travail du sol n'y est pas abordée, sauf pour analyser la suppression du labour. A l'opposé, les travaux prenant en compte les effets du travail du sol et des contraintes mécaniques appliquées à la parcelle ont été menés sur des durées qui dépassent rarement l'année de culture et ont surtout privilégié l'étude du compactage. Les modèles qui en sont issus ne permettent pas de simuler l'évolution à plus long terme de l'état de la couche travaillée. Les travaux mettant en évidence l'existence d'effets cumulatifs des systèmes de culture sur l'état du profil cultural ne concernent que des situations particulières. Ils ne s'adressent pas aux parcelles soumises à un régime de travail du sol comportant un labour, et dont l'état évolue au cours du temps sous l'effet d'actions mécaniques (naturelles ou anthropiques) entraînant compactage et fragmentation des horizons travaillés. Cet état de fait s'explique en partie, nous l'avons vu, par le manque de connaissances théoriques sur le fonctionnement mécanique du sol au compactage et, surtout, à la fragmentation. A cela il faut ajouter le problème posé par la variabilité spatiale des contraintes mécaniques appliquées. **Cela interdit d'envisager, à l'heure actuelle, une modélisation entièrement mécaniste à l'échelle de la parcelle cultivée de l'évolution de l'état structural dans ces situations.**

Il nous faudra composer avec cet état des connaissances et admettre, pour notre modélisation, un certain nombre de simplifications concernant les mécanismes d'évolution de la structure.

CHAPITRE II :

DÉMARCHE

Nous avons choisi de situer notre démarche à l'échelle du profil cultural. Ce n'est qu'à celle-ci, en effet, que nous serons en mesure de rendre compte des interactions entre le système de culture et l'état du sol.

Nous choisirons également une démarche qui tienne compte de la variabilité des états structuraux au champ. Cette variabilité n'est pas complètement aléatoire : elle est liée à la géométrie des équipements utilisés (Sebillotte, 1975 ; Manichon & Sebillotte, 1975 ; Manichon, 1982, 1988 ; Manichon & Roger-Estrade, 1990 ; Van De Zande, 1991). Nous rejetterons donc toute évaluation **en moyenne sur la parcelle** des effets des techniques culturales, et tiendrons compte de la variabilité spatiale des contraintes appliquées.

Nous détaillerons dans ce chapitre les choix qui nous ont progressivement amené à l'élaboration de notre modèle : choix des variables décrivant les systèmes de culture dans leurs relations avec l'évolution de la structure du sol, choix d'un indicateur de leurs effets sur l'état structural, choix enfin d'un type de modèle permettant d'effectuer la simulation de l'évolution de cet indicateur.

Ces trois aspects ne sont pas indépendants les uns des autres : du choix des variables décrivant les systèmes de culture dépend celui de l'indicateur (type de critère et niveau d'échelle); les options retenues influent à leur tour sur le type de modèle. Enfin, l'objectif poursuivi dans cette modélisation rendait obligatoire le choix d'un indicateur permettant de quantifier les effets étudiés.

1. CARACTERISATION DES SYSTEMES DE CULTURE

Il ressort du chapitre précédent que, dans un milieu donné, les relations entre système de culture et état structural doivent être considérées :

- **spatialement**, à travers la variabilité des contraintes mécaniques appliquées au sol ;
- **au cours du temps**, par la fréquence et l'intensité des actions de compactage et de fragmentation qui prennent place, dans un calendrier fixé par la nature des cultures, à des périodes qui conditionnent l'humidité au moment des interventions, et l'action, favorable ou non, des agents climatiques et biologiques (racines,...).

Nous nous intéresserons aux systèmes de culture dont les itinéraires techniques comportent des opérations mécanisées (récolte du précédent cultural, traitement des résidus de récolte, labour, préparation du semis, semis, façons d'entretien, apports d'engrais et de produits de traitement).

(a) Définition des compartiments :

Roue du tracteur		Roue du tracteur		
III	II	III	II	III
IV	I	IV	I	IV

Définition des quatre types de compartiments par la nature des actions mécaniques subies lors d'une opération de travail superficiel :

- I : Compactage
- II : Compactage plus fragmentation
- III : Fragmentation
- IV : Aucune action (on ne tient pas compte, dans ce schéma de principe, d'actions de compactage exercées directement par les pièces travaillantes des outils).

b) Exemple de tailles de compartiments (exprimées en pourcentage du volume de l'horizon labouré), pour différents types d'opérations :

Opérations	Compactage par les roues du tracteur		Fragmentation seule III	Aucune action directe (1) IV
	seul I	suivi de fragmentation II		
Fertilisation, désherbage, semis, récolte	t/l	0	0	$1 - t/l$
Exemple : Semoir maïs 4 rangs	0.25			0.75
Déchaumage, reprise de labour	$(t/l)(1 - p/P)$	$(t/l)(p/P)$	$(1 - t/l)(p/P)$	$(1 - t/l)(1-p/P)$
Exemple : Canadien (2)	0.30	0.10	0.14	0.46

t = largeur d'appui au sol ; l = largeur de travail ; p = profondeur de travail ; P = épaisseur de A_p
 (1) Sans tenir compte du fluage éventuel lié au compactage des zones voisines.
 (2) $t/l = 0,40$; $p/P = 0,24$

Figure 1-2 : Définition de compartiments au sein du profil ; cas d'une seule opération (d'après Manichon, 1988)

1.1. Prise en compte de la variabilité spatiale : analyse géométrique des équipements⁽³⁾, et stratification du profil

Une opération culturale donnée (qu'il s'agisse ou non de travail du sol), peut être caractérisée par la nature des actions mécaniques qu'elle exerce sur le sol et le volume au sein de l'horizon Ap concerné par chacune (Manichon, 1988).

Si l'on ne considère que le compactage par les roues du tracteur (et de l'outil si celui-ci n'est pas porté) et la fragmentation par les pièces travaillantes des outils de travail du sol, plusieurs données géométriques permettent d'évaluer le volume de Ap affecté par chacune de ces actions :

- la **largeur d'appui au sol du tracteur** (et des roues de l'outil s'il y a lieu). Soit "t" cette valeur, mesurée perpendiculairement à la direction d'avancement ; elle dépend de la dimension des pneumatiques et de leur nombre ;
- la **largeur de travail** "l" dont dépendent en partie les règles de circulation sur la parcelle; c'est bien parce que cette largeur est en règle générale différente de "t" qu'il existe une variabilité spatiale des contraintes appliquées ;
- éventuellement l'**épaisseur** "p" de l'horizon fragmenté par l'outil, au plus égale, dans la plupart des cas, à l'épaisseur totale de l'horizon Ap.

Sur ces bases, il est possible de définir sans ambiguïté quatre types de compartiments, correspondant aux différents cas possibles (figure 1-2 a) : compartiment ayant subi un compactage, seul ou suivi d'une fragmentation; compartiment non compacté, avec ou sans fragmentation. Les tailles de ces compartiments (le volume qu'ils occupent dans la couche travaillée) dépendent des valeurs des paramètres géométriques présentés ci-dessus (figure 1-2 b). Notons que, dans cette double partition du profil, verticale et horizontale, on ne tient pas compte de l'intensité des transformations subies par le sol, mais uniquement de l'existence d'une contrainte mécanique appliquée à celui-ci ; **on ne préjuge donc en rien de la variabilité des états structuraux intra ou inter compartiments.**

La délimitation des compartiments s'effectue sans ambiguïté pour un passage d'outil donné. A l'échelle de la parcelle, il faut aussi tenir compte des règles de localisation des passages successifs d'un même engin. Ces règles dépendent du degré de recouvrement entre passages successifs. Si ceux-ci sont parfaitement contigus, deux compartiments de même nature seront séparés d'une largeur correspondant à la largeur de travail; s'il y a recouvrement, ces deux compartiments seront plus proches l'un de l'autre. La connaissance de cette règle de décalage est nécessaire pour déterminer avec précision le **motif géométrique** qui se répète dans la parcelle, perpendiculairement à la direction d'avancement, pour chaque intervention⁽⁴⁾.

3. Par équipement, nous entendons l'ensemble cellule motrice-outil.

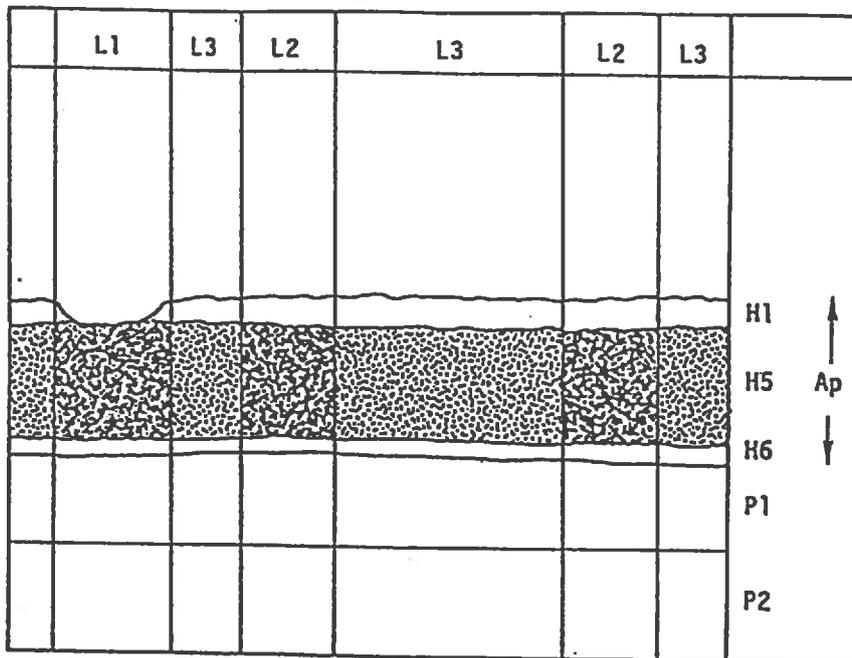
4. On ne considère pas ici les cas où les passages sont croisés.

Lorsque plusieurs opérations ont été réalisées et que l'on veut opérer une stratification qui tienne compte de l'ensemble, il est en principe nécessaire d'avoir repéré précisément les passages lors de chaque opération, ce qui n'est pas toujours réalisable pour des raisons pratiques évidentes. Dans une optique de diagnostic, Manichon (1987) propose de procéder plus simplement, en délimitant sur la face d'observation du profil, une double partition (Figure 1-3) :

- dans le sens vertical en indentifiant au sein de l'horizon Ap des sous-horizons dont les limites sont définies par les profondeurs d'action des différents outils de travail du sol, visibles au moment de l'observation ;

- latéralement, en découpant dans la face d'observation plusieurs positions ayant subi (ou non) des compactages par les roues des engins qui ont circulé sur la parcelle après le dernier labour.

Dans les cas les plus simples, les volumes délimités par les intersections entre limites verticales et horizontales correspondent aux compartiments définis plus haut dans le cas d'une seule opération. Ces volumes élémentaires se distinguent par la nature et l'intensité des contraintes mécaniques qu'ils ont subi lors de l'itinéraire technique.



Dénomination conventionnelle des horizons

Positions latérales

	Ho.	Surface du sol
Ap	H1 à H4	Horizons de reprise du "labour"
	H5	Horizon "labouré" non repris
	H6 à H7	Bases d'horizons "labourés" anciens
	H8	Sous le fond de "labour" le plus ancien, horizon partiellement ameubli par des outils profonds du type sous-labour.

L1	emplacements affectés par les roues d'engins, après les derniers travaux d'ameublissement superficiel. Leurs traces sont visibles en surface au moment de l'observation.
L2	endroits où ont circulé les roues d'engins utilisés entre le labour et la dernière façon d'ameublissement.
L3	résidu indemne des actions précédentes.

Figure 1-3 : Principe de la double partition du profil (Gautronneau & Manichon, 1987)

Cette stratification a d'abord été utilisée pour mener les observations au champ. Elle est réalisée après l'implantation de la culture, sur une face d'observation dont la largeur et l'emplacement dans la parcelle ont été choisis de manière à rendre compte de l'ensemble des actions mécaniques appliquées au profil. Elle sert de cadre à la description des états structuraux, *et s'avère indispensable à l'étude de leur déterminisme.*

Lorsqu'il importe que les observations ne dépendent pas du temps écoulé entre la date des interventions culturales et celle de la description du profil⁽⁵⁾, il faut exclure de l'analyse l'horizon de surface (H1), dont l'état structural est trop contingent des actions climatiques récentes. L'étude porte alors sur les compartiments de l'horizon H5. L'analyse de l'origine des états structuraux observés (de l'histoire de la parcelle) dans une situation donnée passe d'abord par l'étude de leur localisation dans cet horizon (de leur géographie). L'observation des positions L3 permet d'étudier l'effet du dernier labour sur la structure, et c'est ensuite la comparaison de l'état des positions L1 et L2 avec celui de L3 qui permet d'analyser l'effet des compactages postérieurs au passage de la charrue sur un état structural visible en L3. C'est également l'étude du compartiment H5-L3, indemne de toute action anthropique depuis le dernier labour, qui permet d'analyser l'effet des opérations culturales antérieures à cette opération (de piéger les *effets hérités* du système de culture ; Manichon, 1987). Pour effectuer les comparaisons synchrones entre parcelles sur le Centre Expérimental de Grignon (cf. infra), c'est au sein de ce compartiment que nous évaluerons les effets à long terme du système de culture.

Nous conserverons le principe de cette stratification dans notre modélisation ; mais si, comme nous venons de le voir, restreindre les observations à ce compartiment est pertinent pour les évaluations au champ de certains effets des systèmes de culture, il n'en va pas de même lorsque l'on veut modéliser ces effets au cours du temps, sur une période qui dépasse l'année d'observation et celle qui la précède : limiter cette modélisation au seul compartiment H5-L3 n'aurait de sens que si sa position était fixe dans la parcelle d'une année sur l'autre (si les passages des engins étaient parfaitement localisés au même endroit tous les ans). Il faut également considérer l'existence de transferts entre compartiments, par déplacement latéral lors du labour : cela interdit de considérer l'état de H5-L3 à un moment donné indépendamment de celui qu'avaient, les années précédentes, les autres compartiments du profil. Il ressort de ces considérations que le système que nous modéliserons sera **l'ensemble de la couche travaillée des parcelles labourées.**

Nous conserverons cependant la possibilité d'identifier au sein de cette couche de sol les différents compartiments du profil tels qu'ils ont été définis ci-dessus, nous laissant ainsi non seulement la possibilité de confronter les résultats du modèle aux mesures de terrain, mais également celle de tester par simulation la capacité de cet indicateur à différencier les systèmes de culture sur la base de leurs effets à long terme sur la structure du sol.

5. C'est le cas par exemple, lorsque le diagnostic porte sur un ensemble de parcelles dans un dispositif d'enquête (nous présenterons dans le dernier chapitre de ce mémoire un exemple de ce type d'étude).

1.2. Effets des systèmes de culture : fréquence et intensité des actions mécaniques qui s'exercent sur le profil

On peut distinguer trois grandes catégories de processus affectant l'état structural, qui se succèdent au long des cycles de culture successifs :

- **diminution** de l'espace poral, en général accompagnée d'une augmentation du calibre des mottes,
- **augmentation** de la porosité structurale, qui peut s'accompagner d'une diminution du calibre des éléments structuraux.
- **déplacement** de volumes de terre.

Dans les trois cas, les agents responsables sont soit de nature anthropique, soit naturels.

Toute opération culturale exerce l'une et/ou l'autre de ces actions sur le sol : nous prendrons donc en compte pour caractériser l'effet du système de culture, l'ensemble des opérations de l'itinéraire technique.

L'état physique initial du sol (dans ses composantes hydrique et structurale) conditionne le degré de modification de la structure, et, parfois, le sens de cette modification : ainsi, une pression exercée sur le sol pourra mener à une diminution de l'espace poral si le matériau est dans un état plastique, ou au contraire entraîner une fragmentation s'il est friable (voire ne modifiera pas l'espace poral structural si celui-ci est déjà nul, ou en cas de fluage).

Pour caractériser un système de culture dans ses effets sur l'évolution dans le temps de l'état structural, nous devrions en principe :

- prendre en compte chacune des opérations constituant les itinéraires successifs appliqués à la parcelle, en incluant les conditions d'intervention (humidité du sol) et les réglages (vitesse d'avancement, pression de gonflage des pneumatiques, ...)
- envisager, de façon séparée, toutes les contraintes liées aux effets du climat,
- tenir compte, au moment de chacune des actions s'exerçant sur le profil, de l'état initial du sol.

Une telle exhaustivité ne nous paraît cependant pas envisageable en l'état actuel des connaissances. L'étude bibliographique montre en effet que l'on ne dispose pas de modèle satisfaisant de l'effet de chaque action unitaire, permettant "d'enchaîner" des modèles déterministes. Les deux raisons majeures de cet état de fait sont l'impossibilité d'appliquer les données de la mécanique des sols au milieu hétérogène et anisotrope qu'est la parcelle, et l'absence quasi totale de modèles de comportement prenant en compte l'état initial (Koolen & Kuipers, 1989).

Nous n'essayerons donc pas dans ce travail d'utiliser des modèles sol-machine ou climat-sol issus des travaux récents de la mécanique des sols (Koolen, 1994). Nous caractériserons de manière plus simple et plus globale l'effet des opérations culturales sur le milieu. Ceci nous amènera à faire un certain nombre de simplifications **dont nous aurons à discuter l'effet sur les résultats de la modélisation.**

Nous ferons, pour caractériser les systèmes de culture, les choix suivants :

a. Nous regrouperons les opérations culturales en grandes catégories par rapport à leurs effets les plus probables sur la structure du sol. Ces regroupements seront opérés sur la base des résultats des études de l'effet des systèmes de culture sur l'état structural cités plus haut.

Nous considérerons ainsi trois groupes d'interventions sur la base de la nature des contraintes mécaniques qu'elles exercent :

- **Celles qui n'entraînent qu'un compactage** (opérations de récolte des organes aériens, ou traitements en cours de culture),

- **Celles qui occasionnent une fragmentation intense des horizons de surface et un compactage des horizons sous-jacents** (interventions lors des semis de printemps par exemple).

- **Le labour**, qui occupe une place à part du fait de l'important déplacement de terre qu'il entraîne, en plus de son action principale sur l'état structural, la fragmentation.

b. Nous ne tiendrons pas compte de certains effets du climat sur la structure : c'est le cas en particulier de l'entraînement de particules de terre en profondeur (nous ne nous situons pas à ce niveau d'échelle), de la prise en masse à la dessiccation (difficilement appréciable en l'état actuel des connaissances) ou liée à l'action des pluies successives (6).

Le type d'indicateur que nous retiendrons devra tenir compte de cette simplification.

c. Nous tiendrons compte, en revanche, d'un effet du climat sur les processus de fragmentation (alternances humectation-dessiccation, effet du gel), au voisinage de la surface du sol.

6. Ce choix est raisonnable dans le cas des situations que nous analysons.

2. CARACTERISATION DE L'ETAT STRUCTURAL : CHOIX D'UN INDICATEUR DES EFFETS CUMULATIFS DES SYSTEMES DE CULTURE

Les conclusions de l'étude bibliographique menée au chapitre précédent, nous amènent à retenir pour caractériser l'état structural un critère qui :

- permette de décrire un état et non des propriétés ou des comportements déterminés par la structure,
- accorde une place centrale à l'évaluation de l'espace poral structural,
- puisse être relié à l'histoire culturelle de la parcelle,
- soit évalué à une échelle pertinente par rapport à l'étude de l'effet des principaux facteurs de structuration, ou des conséquences de la structure.

Comme nous le verrons ci-après, c'est un critère fondé sur l'état interne des mottes (Manichon, 1982) qui permettra de répondre à ce cahier des charges.

Après avoir rappelé les principes de la description de cet état interne, nous en discuterons l'intérêt pour notre étude. En reprenant les éléments de stratification de la partie précédente, nous proposerons alors la définition de notre indicateur.

2.1. Principes de description de l'état interne des mottes (Manichon, 1982 ; Gautronneau & Manichon, 1987)

Dans la méthode de description morphologique de la structure proposée par Manichon (1982), le parti pris est résolument déterministe : les critères de description sont ceux qui sont le plus directement en relation avec les facteurs majeurs de structuration du profil cultural. C'est ce qui a amené cet auteur à choisir la motte comme niveau d'échelle privilégié pour l'observation de la structure.

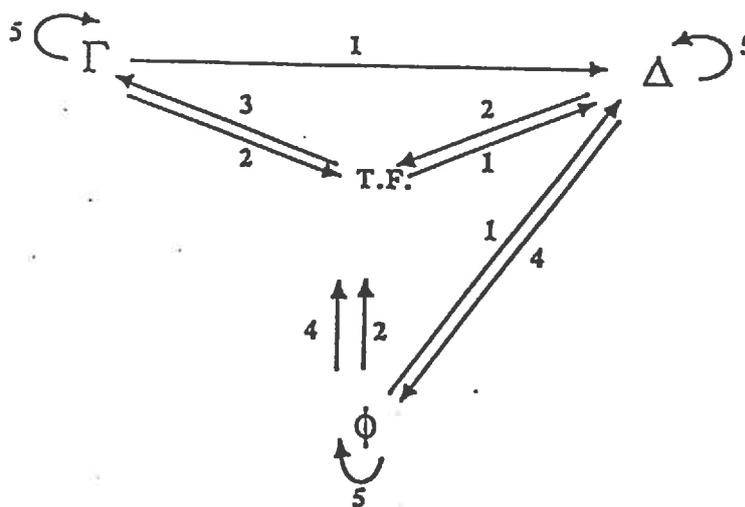
En effet, lorsqu'on applique à une parcelle qui ne subissait jusqu'alors pas d'actions anthropiques notables, un système de culture comportant des plantes annuelles et un travail du sol profond, on perturbe de façon importante son état structural. Partant d'un profil présentant une stratification assez simple, essentiellement verticale (on y distingue en particulier un horizon de surface plus riche en matières organiques) où l'élément de base de la description de la structure est l'agrégat, on assiste progressivement à une différenciation verticale et latérale des états structuraux. En particulier on note la création de "*sur-structures*" par agglomération des agrégats initiaux au sein de mottes (lors de compactages par les roues des tracteurs) qui sont ensuite divisées plus ou moins progressivement par fragmentation lors du travail du sol ou sous l'effet du climat et des racines. *L'application d'un système de culture se traduit ainsi par un cycle, où alternent création de mottes par compactage, et destruction ou diminution du calibre de ces mottes par fragmentation.*

C'est donc bien au niveau des mottes qu'il convient de décrire les effets du système de culture sur le milieu.

(a) Définition des états internes

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

(b) Schéma des inter-relations entre états



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 (interaction Climat-Texture-Faune...)
4. Fragmentation par gonflements et retraits (interaction Climat-Texture)
5. Fluctuations sans changement d'état interne

Figure I-4 : Définition des états internes des mottes et schéma des inter-relations entre ces états (Manichon, 1982)

C'est également le souci de l'analyse des relations entre système de culture et état structural qui a conduit cet auteur à distinguer **deux niveaux d'organisation de la structure**, l'état interne des mottes (figure I-4) d'une part, leur calibre et leur mode d'assemblage d'autre part. La signification de ces deux niveaux d'organisation n'est en effet pas la même dans l'étude de la relation entre le système de culture et l'état structural du sol :

- **Le second niveau (assemblage des mottes) est contingent des actions culturelles et climatiques récentes.** Son évaluation se prête mal à l'analyse des effets à moyen et long terme du système de culture. Il est par contre indispensable de le prendre en compte dans l'évaluation des conséquences à court terme de l'état du profil sur la végétation.

- **Le premier niveau, quant à lui, est moins contingent.** De plus, sa définition, centrée sur l'importance et la nature de la porosité structurale des mottes, est directement liée aux facteurs de structuration du profil (figure I-4a). Ainsi :

. Γ est directement en relation avec les agrégats : les mottes Γ proviennent de l'agglomération d'éléments plus fins, constituant la terre fine, sous l'effet des agents climatiques ou lors de l'application de contraintes modérées. Les caractéristiques de cet état (morphologie, densité, propriétés) sont donc variables d'un matériau à l'autre, et, pour un même matériau, selon l'histoire des contraintes mécaniques subies.

. Δ correspond à un **état d'organisation limite**, où l'espace poral structural a été très fortement diminué sous l'action de contraintes mécaniques sévères (définies par le couple humidité-énergie appliquée), le plus souvent anthropiques, ayant entraîné la coalescence des agrégats préexistants, soit au sein de mottes Γ , soit dans la terre fine. Sur des matériaux de texture limoneuse, provenant du centre expérimental de Grignon, Manichon (1982), Manichon et Roger-Estrade (1990) et De Leon (1991) ont effectué des mesures de densité de mottes, avant d'examiner leurs états internes. Lors de ces observations, ces différents auteurs observent toujours que la distribution des densités s'ordonne en fonction des types d'états internes, l'état Δ étant associé aux densités les plus élevées. Par contre, ces distributions sont plus ou moins disjointes, et la variabilité des valeurs associées à l'état interne delta plus ou moins forte, suivant les expérimentations. Cette variabilité apparaît cependant toujours plus faible pour cet état interne que pour les échantillons non delta.

. Φ dérive de l'état Δ par le jeu des agents naturels (gel et alternance humectation-dessiccation), lorsque la teneur en argile le permet. C'est parce que la porosité fissurale qui se crée de cette manière est aisément reconnaissable au champ, qu'a été introduite cette modalité. Elle permet d'affiner la description, en distinguant les effets du climat de ceux des outils.

- **La terre fine (TF)**, résulte de la fragmentation de mottes (d'état interne Γ , Δ ou Φ) par l'action des outils ou du climat (alternances gonflement-retrait). Une définition précise de la terre fine implique de fixer un seuil de calibre aux éléments qui la constituent. Dans la pratique, il est très difficile d'apprécier l'état interne d'éléments structuraux de très petite taille. Le seuil de 2 cm a été retenu pour cette raison. Nous discuterons ultérieurement de sa

pertinence, tout en soulignant dès maintenant que celle-ci dépend de l'utilisation que l'on veut faire de ce critère.

De nombreuses observations au champ (Campbell, 1979 ; Manichon, 1982 ; De Leon, 1991 ; Coulomb *et al.*, 1993a ; Boizard *et al.*, 1994) montrent que ces différents états internes co-existent au sein d'un même profil, en proportions très variables suivant les systèmes de culture. Cela conduit à l'idée que **les états sont reliés entre eux par les processus de structuration** (compactage et fragmentation sous l'effet des agents naturels et anthropiques), et que les passages de l'un à l'autre sont réversibles (figure I-4b). Il a été proposé (Manichon, 1982) que les teneurs respectives entre ces différents éléments caractérisent, à un moment donné, un état d'évolution du profil cultural.

Plus simplement, la proportion d'éléments structuraux d'état interne Δ peut être considérée comme le solde du bilan des actions ayant entraîné tassement et fragmentation (Manichon et Roger-Estrade, 1990).

2.2. Evaluation au champ des effets cumulatifs

Les considérations précédentes nous amènent à choisir l'horizon H5 comme lieu de l'évaluation (tout en conservant la possibilité de pouvoir distinguer entre les compartiments définis au 1.1), et à retenir l'état interne Δ comme indicateur de l'effet cumulatif des systèmes de culture. C'est l'évaluation quantitative de cet état qui mesurera le solde du bilan entre tassements sévères (création de Δ) et décompactages intenses (réduction des éléments d'état interne Δ à l'état de terre fine).

Cette attitude est une simplification par rapport à celle qui aurait consisté à mesurer l'évolution des teneurs de différents états internes. Cette simplification qui consiste à opposer l'état interne Δ aux autres états, se justifie si :

- Les conditions de la formation de cet état interne sont suffisamment restrictives pour pouvoir attribuer au Δ une origine exclusivement anthropique, et l'associer à l'application de contraintes correspondant à des couples (énergie appliquée - humidité) appartenant à un domaine compatible avec les conditions du champ cultivé. L'aptitude de l'indicateur à révéler les effets de compactage liés au système de culture dépend en effet de cette condition.

Nous pouvons sur ce point, reprendre les travaux cités au paragraphe précédent qui portent également sur le déterminisme des états structuraux au champ. Ils ont permis de mettre au point ou de valider un certain nombre de modèles qualitatifs reliant le niveau des contraintes mécaniques appliquées au profil lors d'interventions en conditions humides et l'état observé. De Leon (1991), cherchant à préciser (et à quantifier) ces relations a tenté d'obtenir expérimentalement les différents états internes observables.

Il ressort de ses travaux :

- qu'il est possible de reproduire, au laboratoire, des états internes très voisins de ceux observés au champ en appliquant à des agrégats de différentes tailles un protocole simple de compactage (compression uniaxiale confinée, avec ou sans drainage), suivi d'un séchage,

- qu'il n'apparaît pas, pour la texture étudiée, de prise en masse après dessiccation (on ne peut toutefois exclure ce phénomène pour d'autres textures),

- qu'un compactage par chargements cycliques, en conditions drainées, entraîne une augmentation progressive de l'état de compacité jusqu'à atteindre un indice des vides structuraux nul,

- que, s'il est possible d'obtenir l'état interne Δ par compression à partir de terre fine (fragments < 2 mm), il n'est pas possible en revanche de l'obtenir, dans ces conditions expérimentales, lorsque la structure initiale comporte des éléments grossiers.

De Leon conclut cette partie de son travail en précisant les conditions probables d'obtention du Δ au champ. En une seule application de charge, c'est pour des pressions au sol dépassant $5 \cdot 10^2$ kPa, et pour des teneurs en eau voisines de la capacité de rétention, que l'on est le plus susceptible d'atteindre cet état. Ces conditions peuvent être réunies, par exemple, lors d'épandage de traitements phytosanitaires, d'engrais ou de lisier, lors de récoltes en conditions humides (ensilage, maïs, betterave,...), par les engins de récolte ou de charroi. Par ailleurs, la répétition des charges (passages répétés, localisés au même endroit) entraîne la disparition de l'espace poral structural.

L'extension au champ de ce dernier résultat requiert cependant une très grande prudence, dans la mesure où les conditions de compactage réalisées sous les roues sont probablement différentes de celles reproduites en laboratoire (problème du freinage latéral par exemple). Ainsi, en plein champ, on peut envisager l'apparition de mottes présentant un indice des vides structuraux très faible, en faisant intervenir des phénomènes de fluage (permettant l'évacuation de l'air et/ou de l'eau en excès) ou limitant la recouvrance dans les zones compactées (une dessiccation ultérieure, figeant pour partie l'état obtenu lors du compactage, pourrait alors générer un état Δ).

Ces travaux nous amènent à retenir l'hypothèse d'une origine uniquement anthropique du Δ , au moins dans les conditions de climat et de texture inventoriés (sols de limon en climat tempéré). Le passage à d'autres conditions, en particulier plus sableuses ou argileuses, ou à des climats impliquant des variations brutales de l'état hydrique du sol, amènera à reconsidérer cette hypothèse (existence possible de phénomènes de prise en masse à la dessiccation). Ils valident par ailleurs nos choix concernant la répartition des opérations culturales en trois groupes, sur la base de leurs effets probables sur la structure (Cf. *supra*, page 27).

- Il existe une certaine stabilité temporelle de l'état Δ , dans l'horizon H5

Cela suppose l'influence négligeable des agents climatiques dans l'horizon situé en profondeur (sous le lit de semence), et prête au labour un effet de fragmentation insuffisant pour faire disparaître une proportion importante de Δ . Cette hypothèse est déterminante vis-à-vis de la capacité de l'indicateur à révéler les effets hérités du système de culture, **c'est-à-dire à jouer le rôle de "mémoire"** au sens que Sebillotte (1982) donne à ce terme.

Deux aspects sont à considérer ici : l'effet du climat et celui du labour.

- Concernant le premier point, les travaux portant spécifiquement sur l'étude au champ de la fragmentation sous l'action du climat sont peu nombreux. Cependant, la plupart des observations réalisées dans des textures limoneuses, font ressortir d'une année sur l'autre, la permanence de l'état interne Δ dans l'horizon H5, voire la persistance de cet état sur quelques années, l'action des agents climatiques restant localisée au voisinage du contact terre-atmosphère (Manichon & Sebillotte, 1975 ; Manichon, 1982 ; Manichon & Roger-Estrade, 1990). Nous admettons cette persistance sur la durée de notre modélisation, et nous proposerons ensuite un test de la validité de cette hypothèse.

- Sur le second point, Coulomb *et al.* (1993a) ont précisé l'effet de la charrue sur l'état structural. Leurs travaux portent sur une gamme de situations expérimentales très proches de celles des parcelles expérimentales de Grignon. Ces auteurs ont montré que le labour, s'il modifiait le calibre et l'état de fissuration des mottes Δ , n'entraînait pas de variation de leur importance au sein de l'horizon H5. On constate parfois une création lors du labour d'éléments d'état interne Δ par écrasement de terre fine en fond de raie, mais cette augmentation n'est, dans les bilans en volume effectués, que de 4% en moyenne, et ne dépasse jamais 7%, ce qui est négligeable par rapport à la création de Δ par compactage sous les roues de tracteurs circulant après le labour sur la parcelle.

Il nous semble donc raisonnable d'admettre l'existence de cette permanence des éléments Δ au sein de l'horizon H5, en dehors des compartiments affectés par les compactages, ainsi que l'invariance de la teneur sous l'action du labour.

Mais, au-delà de ces deux conditions, il est également important de savoir si l'indicateur choisi est susceptible d'être pertinent vis-à-vis de l'analyse et de la prévision des conséquences de l'état du profil.

Nous séparerons les résultats des travaux qui nous permettront de discuter ce point en deux groupes, selon le niveau d'approche retenu : études de mottes en laboratoire, évaluation au champ des conséquences de l'état du profil cultural.

- Au premier niveau, Papy (1984) et Curmi (1987) ont mis en évidence des différences de comportement hydrique et mécanique de mottes d'états internes différents. De Leon (1991) observe cependant une certaine variabilité de la porosité structurale pour un échantillon de mottes Δ (provenant du même matériau et à la même humidité), qui l'amène à rejeter, compte tenu de la grande sensibilité de la plupart des propriétés physiques à ce paramètre, l'hypothèse d'une homogénéité des propriétés physiques pour une classe morphologique et un matériau donnés. Il lui paraît nécessaire d'affiner la classification, avant d'aller plus loin dans l'adaptation à l'estimation de variables telles que coefficients de diffusion pour les gaz (Renault, 1988), ou conductivité hydraulique. Ses travaux montrent cependant *la faisabilité d'un tri des états internes corrélable avec des classes ou des niveaux moyens de propriétés physiques, dont l'utilité est de rendre possible la prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle grâce à la rapidité et à l'économie de moyens de mesure.*

- A l'échelle du profil cultural, Papy (1984, 1986), Tardieu (1987), Coulomb *et al.* (1990), Doré (1992), Gede Wibawa (1992), mettent en relation l'état structural du profil avec son fonctionnement hydrique ou avec celui du peuplement végétal. La proportion d'état interne Δ joue un rôle déterminant dans ces relations, *mais ce n'est pas le seul critère à prendre en compte* : le calibre des mottes, leur mode d'assemblage et leur disposition dans le profil sont également des facteurs explicatifs, en interaction avec le climat.

En conclusion, nous retiendrons qu'il est possible de relier classe morphologique et densité de motte, mais que l'on n'est pas en mesure d'utiliser un indicateur basé uniquement sur l'importance en proportion d'éléments d'état interne Δ dans le profil pour prévoir les conséquences de l'état structural sur le fonctionnement du peuplement végétal ou le fonctionnement hydrique. Il faudra, pour cela, non seulement prendre en compte l'importance du Δ , mais également d'autres paramètres (description plus précise de l'espace poral, calibre des mottes, importance des vides,...). Le fait, cependant, que dans un régime de travail du sol comportant un labour tous les ans, la teneur en Δ du compartiment H5-L3 soit corrélée positivement avec le calibre des mottes de ce type (Manichon, 1988), permet de penser que la valeur de cet indicateur n'est pas sans rapport avec l'état global du profil, et, en particulier, avec le degré de fragmentation des bandes de labour. Le caractère pénalisant d'un horizon H5 constitué de mottes décimétriques de type Δ (sur l'enracinement, l'alimentation en eau et la production) ayant été démontré dans plusieurs situations (notamment Tardieu, 1984 ; Coulomb *et al.*, 1990), nous pouvons considérer que l'indicateur retenu remplit au moins en partie les objectifs que nous nous sommes fixés.

3. CONCLUSION

L'indicateur dont nous proposons de modéliser l'évolution est donc la *teneur en Δ des différents compartiments du profil cultural*. Nous conserverons cependant dans le modèle la possibilité d'évaluer la teneur du compartiment H5-L3, choisi pour les mesures de terrain, afin de pouvoir confronter les valeurs simulées aux valeurs mesurées.

Cet indicateur se devait avant tout d'être apte à rendre compte de l'évolution de l'état du profil cultural. Celle-ci dépend, pour un matériau donné, constitutif de la couche labourée :

- des agents naturels (pluie, évaporation, gel, faune du sol, racines...) dont les effets sur la structure dépendent aussi de la nature du peuplement végétal et de son calendrier de présence sur la parcelle,
- des actions anthropiques exercées sur le sol, c'est-à-dire de l'ensemble des opérations culturales impliquées (travail du sol, mais aussi semis, entretien et récolte de la culture).

L'objectif de notre travail excluait de choisir des critères dont les variations seraient trop sensibles à l'action des agents naturels. Tout en rendant compte de ces actions, il nous fallait surtout privilégier les critères dont les modifications peuvent être assez directement reliées aux interventions culturales et à leurs conditions. Il fallait aussi que l'indicateur retenu puisse être mis en relation avec le fonctionnement du profil et les conséquences de son état sur la production végétale. A la suite des travaux de Manichon (1982) sur le diagnostic de l'état structural au champ, c'est le choix d'un indicateur basé sur la teneur en Δ qui nous a semblé le plus pertinent pour rendre compte des effets à long terme du système de culture.

Il faut souligner ici que ce critère n'est qu'un *indicateur* dont on suppose qu'il permet de rendre compte d'une évolution, et, surtout, de différencier les systèmes de culture sur la base de cette évolution. **Il ne s'agit donc pas de proposer une approche globale permettant, seule, de porter un jugement sur la qualité du profil, son fonctionnement, et ses conséquences sur la production végétale.** Il est en particulier nécessaire, pour porter un tel jugement, de prendre en compte les proportions respectives des différents compartiments au sein de l'horizon H5 et leur état structural (Manichon 1982, 1987 ; Gautronneau & Manichon 1987).

Avant d'aborder la modélisation proprement dite, une étape de validation de l'indicateur s'avérait nécessaire. Une première solution eût été la conduite systématique d'enquêtes dans des parcelles d'agriculteurs. Si cette méthode a permis d'élaborer des diagnostics sur les effets des itinéraires techniques sur l'état du profil cultural (Manichon et Sebillotte, 1973), elle ne peut dépasser l'établissement de corrélations entre ceux-ci et l'état du profil par la mise en cause des événements les plus récents. Par ailleurs, l'existence de

confusions d'effets entre parcelles et systèmes de culture, fréquentes dans les enquêtes ne peut, en toute rigueur, être exclue.

Une seconde solution, de nature expérimentale, aurait consisté à suivre pendant plusieurs années l'évolution de l'indicateur dans des parcelles différenciées par la nature des systèmes de culture pratiqués. Nous l'avons écartée dans la mesure où ces résultats expérimentaux auraient demandé de nombreuses années pour être obtenus, et auraient nécessité la mise en place de dispositifs lourds pour pouvoir étudier l'effet de la variation de certains facteurs comme les caractéristiques géométriques des équipements ou les règles adoptées pour leur mise en oeuvre.

Ne pouvant aborder cette étude validation de l'indicateur de façon **diachronique**, nous avons choisi une démarche **synchronique**, basée sur la comparaison de parcelles soumises sous le même climat à des systèmes de culture différents, **depuis assez de temps pour que l'on puisse considérer leur état structural suffisamment différencié**. Ces situations étaient présentes sur le Centre expérimental de Grignon : quatre parcelles, conduites depuis plus de dix ans avec des systèmes de culture contrastés, nous serviront de base au test de l'indicateur "teneur en Δ de H5-L3".

L'interprétation des données mesurées nous conduira à formuler un **jeu d'hypothèses** sur l'évolution de la teneur en Δ de la couche travaillée de parcelles régulièrement labourées. Nous formaliserons ces hypothèses sous la forme d'un premier modèle d'évolution de la teneur en Δ de l'ensemble de la couche labourée. Ce modèle, compartimental, nous permettra de simuler l'évolution de l'indicateur sous l'effet des systèmes de culture.

Dans un second temps, nous mènerons une étude de sensibilité de ce modèle, ce qui nous conduira à proposer un certain nombre d'améliorations. La dernière étape de la démarche sera alors une confrontation des résultats de la simulation à des situations plus proches de la réalité de la pratique agricole que ne le sont celles du Centre Expérimental, provenant d'un réseau de parcelles pour lesquelles on disposait des informations nécessaires à la mise en oeuvre du modèle.

DEUXIEME PARTIE :

ÉVALUATION DE LA TENEUR EN Δ DE H5-L3

EN PARCELLES EXPÉRIMENTALES

ET MODÉLISATION DE SON ÉVOLUTION

CHAPITRE I :
ÉVALUATION DE LA TENEUR EN Δ DE H5-L3
DANS LES PARCELLES EXPÉRIMENTALES DE GRIGNON

Elément	Gamme de variation pour les parcelles de la pièce des Vignes (% de la terre fine et sèche)
Argile	23.5 - 23.8
Limons fins	22.1 - 26.1
Limons grossiers	45.4 - 40.3
Sables fins	6.8 - 6.9
Sables grossiers	1.8 - 3.3
Carbone total	1.31-1.53
CaCO ₃ total	0.8 - 1.9

Tableau II-1 : Caractéristiques moyennes de la couche labourée pour les parcelles expérimentales de la pièce des Vignes (d'après De Leon, 1990)

Parcelle	Succession depuis la campagne 75-76
1	B-B-B-L-L-L-L-B-C-B
2	B-B-M-B-B-C-B-C-B-B
3	M-B-M-B-M-B-M-B-M-B
4	B-B-M-B-B-C-B-C-B-B

M = Maïs Grain; B = Blé d'hiver; C = Colza d'hiver; L = Luzerne

Tableau II-2 : Les successions de cultures pratiquées sur les parcelles étudiées

1. PRESENTATION DES SITUATIONS ETUDIEES

1.1. Localisation

Les quatre situations sont localisées sur le domaine expérimental de Grignon (Yvelines), dans la partie dite "*Pièce des Vignes*". Les caractéristiques générales de la texture de la couche travaillée sont présentées dans le tableau II-1. Les parcelles étudiées reposent sur un sol brun lessivé développé sur limon loessique du Würm récent, reposant à une profondeur d'environ 2 m sur un calcaire dur du Lutécien. Le contexte climatique est celui de l'Ouest du Bassin Parisien. L'analyse des normales sur la période 1957-1987 fait ressortir une pluviométrie annuelle de 625 mm, avec un automne et un printemps relativement pluvieux (164 mm pour la période septembre-octobre-novembre et 144 mm pour mars-avril-mai). L'amplitude thermique est faible (le mois le plus froid est janvier avec une température moyenne de 2,6°C, et les mois les plus chauds sont juillet et août avec tous deux 18°C de température moyenne). Il y a en moyenne 22 jours de gel par an.

1.2. Systèmes de culture

a. Succession des cultures

Les systèmes de culture pratiqués sur le centre sont ceux d'une région de grande culture céréalière. Quatre situations ont été retenues. Les successions sont indiquées au tableau II-2.

On distingue d'une part les parcelles (numérotées 1, 2 et 4 dans la suite du texte), pour lesquelles la succession comprend au moins 8 cultures d'hiver en dix campagnes, et d'autre part la parcelle 3 sur laquelle on alterne maïs et blé d'hiver depuis dix ans. Les observations ont toutes été réalisées alors que les 4 parcelles étaient cultivées en blé.

b. Itinéraires techniques

Sur les situations étudiées, quelle que soit la culture, l'itinéraire technique comprend six groupes d'opérations :

- Le déchaumage et l'épandage d'un engrais de fond avant les cultures d'hiver et d'un engrais complet avant celle de maïs. Les passages ont lieu dans tous les cas à la fin de l'été.

- Un labour d'automne, à une profondeur d'environ 25 cm. La charrue utilisée est une bisoc réversible de 14 pouces.

- Des reprises superficielles (à l'automne pour les cultures d'hiver, au printemps pour le maïs). Ces opérations se font en deux temps : une première reprise est réalisée avec un vibroculteur et/ou un rouleau croskill, afin d'opérer un premier émiettement du labour et de niveler sa surface. On parachève ensuite la fabrication du lit de semence avec une herse rotative, le plus souvent en un seul passage.

Opération	Outil	Largeur de travail
Déchaumage	Disques	3 m
Epannage 0-25-25	Epanneur	3 m
Labour	Charrue bisoc 14 pouces	0.70 m
1ère reprise	Vibroculteur ou Rouleau Croskill	1.75 m
2nde reprise	Herse rotative	1.75 m
Semis	Semoir à céréales ou à maïs	1.75 m
Roulage	Rouleau Croskill	1.75 m
Epannages d'azote et Traitements	Pulvérisateur	8.20 m
Récolte maïs	Corn-picker porté	1.75 m
Récolte céréales et colza	Moissonneuse- batteuse	3.50 m

Tableau II-3 : Caractéristiques géométriques des outils utilisés sur les parcelles expérimentales du Centre

- Le semis, réalisé immédiatement après les opérations de reprise, est en général suivi d'un passage de rouleau crosskill.

- Les épandages d'azote et les traitements (protection de la culture, désherbage, raccourcisseurs de paille) : le nombre d'interventions en cours de culture est de quatre passages minimum au printemps sur blé et colza (deux apports d'azote et au moins deux traitements en cours de culture), trois traitements minimum sur maïs, deux passages minimum sur luzerne (un apport d'azote après la première coupe, un traitement si nécessaire en cours de culture).

- La récolte : les céréales à paille et le colza sont récoltés avec une moissonneuse-batteuse, le maïs avec un corn-picker 2 rangs, la luzerne est fauchée, bottelée puis récoltée à la main.

Parmi les quatre situations étudiées, il convient d'isoler le cas de la parcelle N°4 : sur cette situation, dont l'histoire culturale est identique à celle de la parcelle 2, on a réalisé, avant le labour de l'année d'observation, un compactage intense sur sol humide, afin de simuler l'effet d'une récolte tardive en conditions dégradantes pour la structure du sol.

c. Localisation des passages et caractéristiques géométriques des équipements employés : variabilités spatiale et temporelle des contraintes mécaniques appliquées et de leurs effets sur la structure

Sur le domaine expérimental, ces quatre parcelles ont une longueur de 30 m pour une largeur de 17,50 m.

Ces dimensions sont adaptées à l'équipement spécifique du centre dont on dispose pour les cultiver (les caractéristiques géométriques des outils utilisés sont présentés au tableau II-3) : pour l'ensemble des opérations culturales, on utilise un tracteur dont la voie (distance entre les axes des pneumatiques) est de 1,75 m, et la largeur des pneumatiques de 0,35 m. Les équipements utilisés pour les reprises ainsi que le semoir ont cette même largeur de 1,75 m. Ainsi lors de l'implantation des cultures, il est possible de localiser les passages de tracteur de telle sorte que chaque parcelle expérimentale soit divisée en dix planches correspondant à dix trains de semoir, chacune étant encadrée par deux zones de roulement. Dès que la parcelle a été labourée, les passages de roues ne s'effectuent que sur ces zones, et ce jusqu'à la récolte. Pour les traitements en cours de culture, on dispose d'un épandeur qui permet de traiter une parcelle en deux passages, eux aussi localisés sur les zones de roulement. Tous les travaux sont effectués dans la même direction. Un système de repères permet de localiser les parcelles tous les ans au même endroit, ***ce qui entraîne une position fixe d'une année sur l'autre des zones de passage de roues***. La précision de ce positionnement est de l'ordre d'une largeur de pneumatique.

Cette disposition, qui existe depuis la création du centre, correspond au souci des expérimentateurs d'obtenir, sur les parcelles élémentaires, des planches de semis ayant un état structural aussi homogène que possible, afin de limiter dans les essais des causes de variation de la croissance des plantes difficilement contrôlables.

Par contre, lors des opérations antérieures au labour, (déchaumage et épandage d'engrais de fond), ainsi qu'à la récolte, **les passages ne sont pas localisés** au niveau de ces bandes de roulement. L'observation des chantiers de récolte montre qu'un passage de roues en moyenne se situe en dehors de celles-ci.

Du point de vue des actions mécaniques exercées sur le profil, nous classerons les opérations qui viennent d'être citées en trois catégories.

◆ **Celles n'ayant qu'un effet de compactage**

Épandage d'engrais de fond, semis, traitements en cours de culture, récoltes ; les effets sur la structure auxquels on peut s'attendre sont cependant variables entre ces opérations :

- *L'épandage de l'engrais de fond* a lieu en fin d'été, sur un sol non ameubli. Le risque de tassement est faible.

- *Lors des semis*, quelle que soit la culture, on intervient sur un sol ameubli par le labour, qui est dans un état d'humidité variable suivant les années mais souvent proche de la capacité au champ (au printemps pour le semis de maïs, ou à l'automne pour l'implantation des céréales et du colza). Les risques de tassement sont plus faibles pour le colza (semis de début septembre).

- *Au cours des traitements en cours de culture*, les conditions d'humidité sont variables, le tassement provient ici de la répétition des passages localisés, qui coïncident avec les passages de roues au semis.

- *A la récolte du maïs*, on intervient en automne sur un sol non ameubli, mais souvent humide. Les charges sur essieu étant par ailleurs élevées, la probabilité de tassement est forte.

- *Pour les autres récoltes* (colza, luzerne, blé d'hiver), par contre, les interventions ont lieu en conditions généralement sèches. Les risques de tassement sont faibles.

◆ **Les opérations occasionnant compactage et fragmentation des horizons de surface**

Déchaumage et opérations de reprise : ici également, les effets sur la structure ne sont pas identiques entre ces deux types d'opération :

- *Le déchaumage* a lieu au cours de l'été, sur un sol généralement sec, les risques de tassement sont faibles. Par ailleurs, on utilise des outils à dents qui ne sont pas animés par la prise de force du tracteur, l'intensité de fragmentation est moindre que dans le cas des

reprises de labour.

- Lors de ces dernières, l'humidité et la localisation des passages entraînent un risque élevé de tassement dans l'horizon ameubli par la charrue.

- *Le labour*, qui fragmente et déplace l'ensemble des horizons travaillés. Le sens de versement de la charrue est, alternativement d'une année sur l'autre, la droite et la gauche, pour éviter le déplacement des limites latérales des parcelles au cours des années.

Si les fragmentations s'exercent de façon relativement homogène sur l'ensemble de la surface de la parcelle, la localisation et l'importance des surfaces **compactées** diffèrent entre ces opérations. Ainsi, par exemple :

- *Reprises, semis et traitements* n'affectent que les bandes de roulement précédemment décrites. Mais, si les zones compactées n'occupent qu'une portion limitée de la surface totale de la parcelle (20%), le nombre de passages est par contre important : sauf pour celles bordant la parcelle, chaque zone roulée l'est en effet deux fois pour une même opération (les passages étant contigus, le tracteur repasse dans la trace extérieure à chaque aller-retour). Ainsi, au cours d'une campagne, chacune de ces zones est roulée au moins huit fois, après le labour ;

- *La récolte du maïs* touche une proportion plus importante de la parcelle (faible largeur de la moissonneuse, accompagnée du tracteur et des remorques), qui n'est pas limitée aux bandes de roulement.

1.3. Conclusion sur le choix des situations

Si l'on ne tient pas compte des opérations pour lesquelles on n'a pas de localisation stricte des passages de roues, les règles de circulation dessinent sur les parcelles un motif géométrique simple et bien défini dans l'espace (figure II-1) : il se caractérise par la répétition d'une bande de roulement de 35 cm de largeur (correspondant à la position L1 dans la partition latérale du profil correspondant) et d'une zone de 1,40 m de largeur (position L3) indemne de tout compactage postérieur au labour.

On s'attend à observer entre les emplacements qui ont subi des contraintes mécaniques variées, des états structuraux très différenciés.

Par ailleurs, les 4 parcelles retenues ont subi, dans un même milieu, des systèmes de culture très différenciés quant aux successions pratiquées, mais pour lesquelles les travaux (à l'exception des récoltes) sont réalisés avec les mêmes engins et des règles d'emploi identiques (profondeur d'action des outils de travail du sol et localisation des passages).

Les critères de caractérisation de l'état structural que nous utilisons doivent donc permettre de mettre en évidence :

- une *variabilité intra-parcelle* importante entre la zone correspondant aux passages répétés des roues et le compartiment L3,

- une *variabilité entre situations* qui, dans la mesure où les observations sont toutes réalisées sous une même culture conduite de manière identique entre les parcelles l'année d'observation, pourra être attribuée aux effets cumulatifs des systèmes de cultures pratiqués. On s'attend à ce que la valeur de l'indicateur soit la plus faible dans la parcelle 1 : les risques de tassement y sont les moins élevés, la succession de cultures ne comportant pas, sur la période étudiée, d'espèce à récolte d'automne. A l'opposé, la parcelle 3, comportant un maïs tous les deux ans depuis dix ans, présente les risques les plus élevés de tassement. Nous privilégierons donc la comparaison de ces deux parcelles. La parcelle 2 est très voisine de la première au plan des effets attendus sur la structure, étant données les hypothèses faites sur les risques de tassement affectés aux différentes cultures. La présence d'un maïs sept ans avant la date d'observation nous permettra d'examiner l'effet d'un éventuel tassement cette année-là sur le résultat observé en 1985. Quant à la parcelle 4, identique à la précédente à l'exception du compactage supplémentaire introduit l'année d'observation, elle nous permettra d'évaluer l'effet de cette opération sur la valeur de l'indicateur.

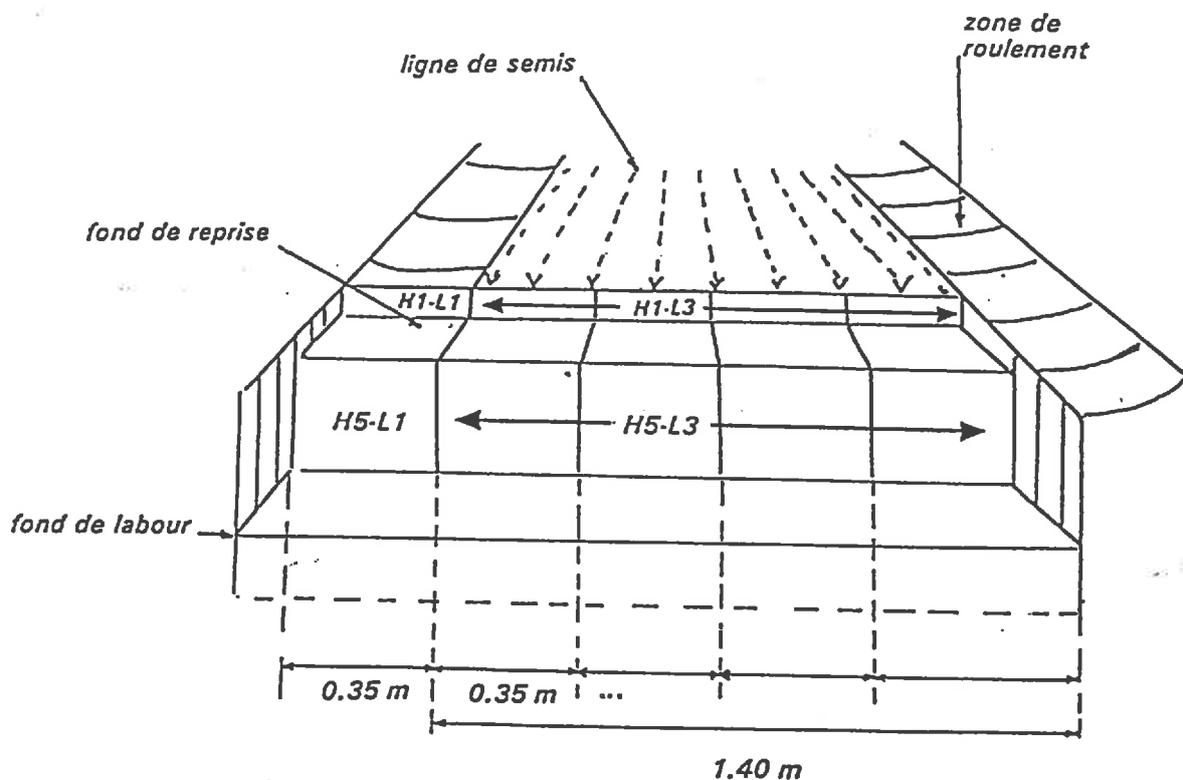


Figure II-1 : Principe du partitionnement de la couche travaillée dans les parcelles du Centre Expérimental de Grignon (Yvelines)

2. DESCRIPTION DE L'ÉTAT STRUCTURAL DES PARCELLES, ET ÉVALUATION DE L'INDICATEUR "TENEUR EN Δ DE H5-L3"

2.1. Cartographie des profils

Dans un premier temps on a réalisé, sur les parcelles 1 et 3, des cartographies de l'état structural de l'horizon H5, en distinguant les zones où dominait l'état interne Δ de celles caractérisées par l'abondance de terre fine et de mottes Γ . Ces cartes, sur lesquelles on a positionné la partition définie ci-dessus, sont présentées à la figure II-2. On n'y a pas délimité les contours précis des mottes des différentes catégories d'état interne, comme on a pu le faire ultérieurement dans d'autres situations (Caneill *et al.*, 1992) ; de ce fait, on ne peut les utiliser pour évaluer l'abondance des éléments d'état interne Δ dans les différents compartiments de H5. Elles permettent cependant d'avoir une image de la morphologie d'ensemble des profils. Pour la parcelle 1, on observe une forte variabilité intra-profil : l'état structural de la position L1 est Δ ; celui de la position L3 est caractérisé par la présence abondante de terre fine et de mottes Γ ; les compartiments 4 et 5 de cette dernière position présentent une proportion plus faible de zones Δ que son compartiment 2. Pour la parcelle 3, la position L1 est, comme dans le cas précédent, presque entièrement d'état interne Δ . En L3, les zones à dominante Δ sont par contre plus importantes et en proportions moins variables entre compartiments que dans le cas précédent. Ces observations qualitatives vont dans le sens des résultats attendus au vu des caractéristiques des systèmes de culture de ces deux parcelles.

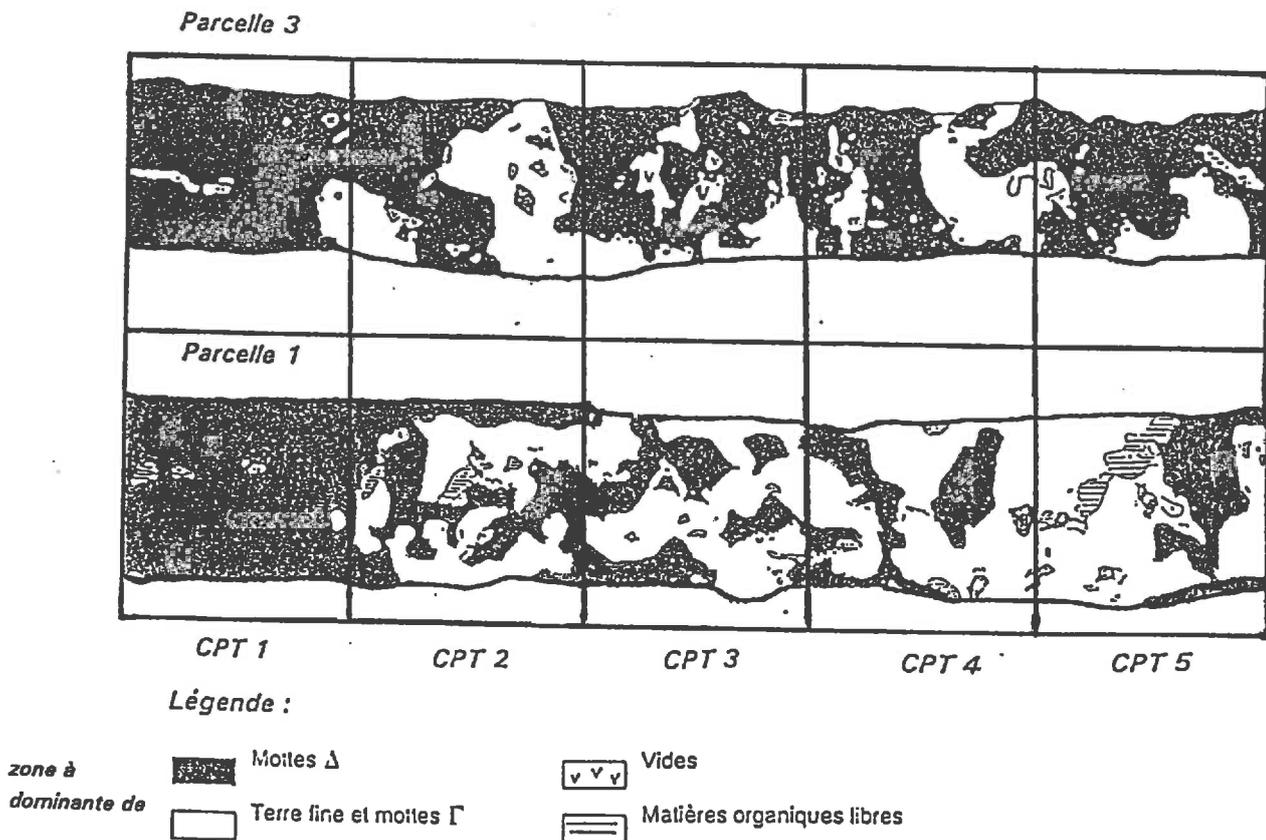
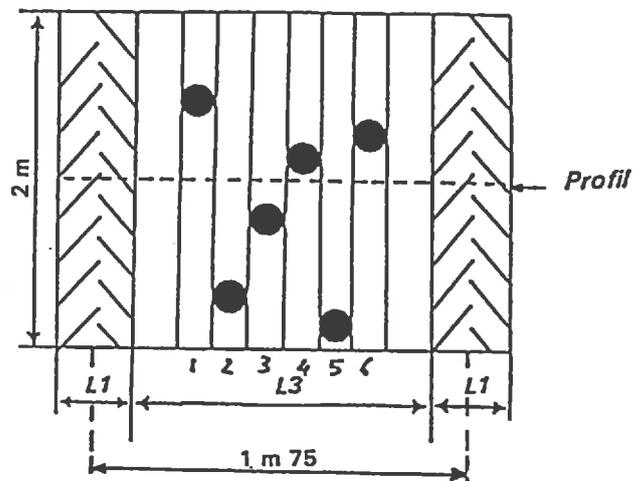
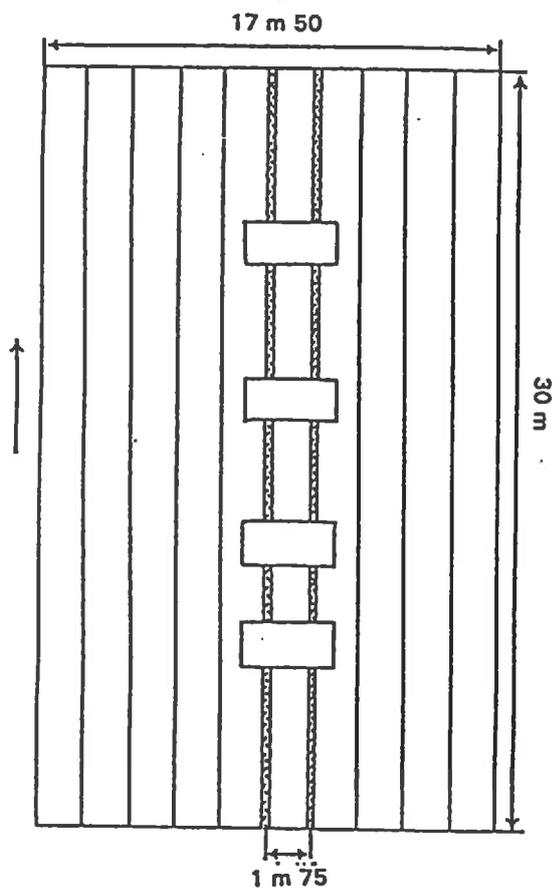


Figure II-2 : Cartographie des états structuraux de l'horizon H5 dans les parcelles 1 et 3



De part et d'autre du profil,
tirage de l'emplacement des 6 carottes
de prélèvement

Tirage de 4 profils dans
la longueur de la parcelle
(= 4 stations)

Figure II-3 : Principe de l'échantillonnage pour l'évaluation de la teneur en Δ de H5-L3

L'observation de ces cartes confirme que ce n'est pas dans la position L1, fortement tassée tous les ans du fait de la localisation des passages de roues, qu'il faut rechercher l'indicateur des effets cumulatifs du système de culture sur l'état structural, mais bien dans la partie du profil indemne de compactages post-labour (position L3). D'un autre côté, l'horizon H1, caractérisé par un état structural fortement affiné presque exclusivement constitué de terre fine, n'était pas différencié entre situations. C'est donc bien dans H5-L3 que l'on pourra observer les effets cumulatifs des systèmes de culture.

Cette évaluation de l'indicateur a été réalisée dans l'horizon H5 et les positions L3 des parcelles que nous venons de décrire, en utilisant une méthode de tri densimétrique.

2.2. Evaluation de la teneur pondérale en mottes d'état interne Δ de H5-L3

Cette évaluation s'est déroulée au cours de la campagne 84/85, après les travaux d'implantation du blé et avant sa récolte. La méthode est décrite en détail dans Dekkers & Gandais, 1985 (voir l'annexe 1) ; nous n'en reprendrons ici que les points essentiels.

a. Echantillonnage (figure II-3)

Il s'agit d'un échantillonnage à deux niveaux : la **station** (quatre sont tirées au hasard dans la longueur de la parcelle) et la **carotte** (six prélèvements dans les positions L3 des profils). Notons que le prélèvement des carottes a été effectué dans une bande de 2 m de large, afin d'éviter le risque de non-indépendance des échantillons.

Ce type d'échantillonnage permet d'analyser les variabilités longitudinales (dans le sens du labour) et latérales (au sein des L3) de la teneur en Δ .

b. Méthode de prélèvement et préparation des échantillons

Les échantillons sont prélevés dans les compartiments H5-L3, à l'aide de tubes de PVC, enfoncés dans le sol avec un vérin double effet. Les carottes sont cylindriques, elles ont 15 cm de diamètre et la hauteur de l'horizon H5. Les échantillons de terre sont ensuite fractionnés, séchés à l'air puis tamisés afin d'obtenir 2 fractions :

- la terre fine < 20 mm,
- les mottes > 20 mm.

C'est sur cette dernière fraction qu'a lieu le tri densimétrique.

Sur un échantillon de mottes dont la morphologie est contrôlée, on peut définir une valeur de masse volumique qui permette au mieux de séparer celles d'état interne Δ des autres. Cette valeur définit la densité du liquide dans lequel les mottes issues des carottes

de prélèvement sont plongées, après imperméabilisation par de la paraffine. Les fractions surnageantes et coulantes sont **respectivement assimilées aux fractions non delta et delta de l'échantillon, et sont pesées**. Un contrôle morphologique par sondage permet de vérifier *a posteriori* la validité de la séparation.

On obtient ainsi la teneur pondérale en mottes Δ de chaque échantillon.

c. Résultats et discussion

Les valeurs obtenues sont présentées au tableau II-4. L'indicateur oppose nettement deux groupes de parcelles : la teneur mesurée dans le compartiment H5-L3 des parcelles 3 et 4 est environ le double de celle observée dans les parcelles 1 et 2.

Il s'agit cependant de moyennes, qui recouvrent une certaine variabilité au sein de L3, dont l'analyse est rendue possible par la structure de l'échantillonnage.

Une analyse de variance a été réalisée pour chacune des parcelles, après transformation des variables (log) pour stabiliser la variance (Dagnélie, 1975), les valeurs étant exprimées en pourcentages. Dans ce tableau, sur une même ligne ou dans une même colonne, les moyennes affectées d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil $\alpha = 10\%$. De même, concernant les moyennes générales par parcelle, les valeurs obtenues dans les parcelles 1 et 2 ne sont pas significativement différentes entre elles ; elles le sont par contre des moyennes des parcelles 3 et 4. Les valeurs de ces deux dernières parcelles ne sont pas différentes.

Ainsi, on constate que la variabilité longitudinale (entre stations) est plus faible que la variabilité latérale (entre carottes de prélèvement).

Il apparaît donc que la différence entre les 2 groupes de situations (parcelles 1 et 2 d'une part, 3 et 4 d'autre part) porte non seulement sur la **valeur moyenne de l'indicateur, mais également sur la variabilité des teneurs en Δ au sein des positions L3(1)**. Nous aurons à revenir sur les causes de cette variabilité de la répartition du Δ au sein de L3, déjà observée sur les cartes morphologiques.

Les caractéristiques géométriques et les règles d'emploi étant identiques depuis au moins dix ans sur ces parcelles expérimentales, *nous admettrons que les valeurs mesurées de l'indicateur sont représentatives d'un état moyen de la parcelle*.

1. Notons par ailleurs que ces résultats montrent que l'objectif initial de l'expérimentateur d'obtenir des conditions de croissance homogènes au sein de la planche de semis n'est pas atteint dans les parcelles 1 et 2.

Parcelle 1

	1	2	3	4	5	6	moyenne
I	40.00	11.00	33.90	32.00	28.80	32.70	29.73a
II	62.30	19.30	16.00	26.60	29.60	28.60	30.40a
III	55.60	39.70	39.10	36.10	27.10	26.10	37.28a
IV	58.70	30.20	19.40	47.10	34.10	28.50	36.33a
MOY	54.15a	25.05b	27.10b	35.45b	29.90b	28.97b	33.44

Parcelle 2

	1	2	3	4	5	6	moyenne
I	62.00	33.20	31.10	29.10	38.60	38.90	38.82a
II	44.50	23.30	39.60	35.70	24.30	33.00	33.40a
III	46.20	16.10	40.80	43.30	30.70	26.50	33.93a
IV	55.70	21.10	37.10	29.00	26.80	14.30	30.67a
MOY	52.1a	23.42b	37.15b	34.28b	30.10b	28.18b	34.20

Parcelle 3

	1	2	3	4	5	6	moyenne
I	62.40	63.60	79.20	55.80	77.40	72.90	68.55a
II	68.90	61.80	76.80	68.30	76.20	65.80	69.63a
III	53.20	71.20	69.10	73.30	77.80	72.90	69.58a
IV	59.40	65.50	70.00	62.80	79.00	55.40	65.35a
MOY	60.98a	65.53a	73.78a	65.05a	77.60a	66.75a	68.28

Parcelle 4

	1	2	3	4	5	6	moyenne
I	67.70	68.60	63.40	61.90	65.00	53.40	63.33a
II	68.80	61.10	65.60	60.00	63.50	71.80	65.13a
III	65.20	77.90	72.40	63.20	65.00	69.50	68.87a
IV	64.40	60.40	69.70	63.70	76.20	70.50	67.48a
MOY	66.53a	67.00a	67.78a	62.20a	67.43a	66.30a	66.20

MOY = Moyenne

Les chiffres romains sont ceux des stations de prélèvement ;

Les chiffres arabes sont ceux des carottes de prélèvement ;

Tableau II-4 : Valeurs de Teneur en Δ en H5-L3 mesurées sur les quatre parcelles du Centre
Expérimental de Grignon

Deux conclusions importantes peuvent être tirées de ces observations :

- l'indicateur choisi rend compte de différences entre systèmes de culture impliquant des niveaux et des modalités de compactage différents (présence ou absence de récolte en conditions dégradantes) ;

- bien que les successions aient été différentes entre parcelles, lorsque les actions de compactage sont identiques, les valeurs de l'indicateur sont semblables.

Nous ne rechercherons donc pas dans la nature des espèces végétales des précédents cultureux l'explication des similitudes et des écarts observés entre parcelles, mais *dans la variabilité spatiale et temporelle des contraintes mécaniques appliquées au sol, liée aux caractéristiques géométriques des équipements utilisés, et à leurs règles d'emploi.*

Ce que nous proposons concorde avec les résultats antérieurs de Manichon dans les limons du Béarn (Manichon, 1982). Cet auteur mettait en effet en opposition des systèmes de cultures dégradants ou non dégradants, sur la base de l'énergie appliquée au profil (nombre et intensité des compactages au cours de l'itinéraire technique) et des états d'humidité probables au moment des interventions.

Ceci nous amène, dans une seconde étape de notre démarche, à formuler plusieurs hypothèses sur le fonctionnement de la couche labourée des parcelles étudiées, hypothèses qui seront à la base de la modélisation de l'évolution de l'indicateur.

3. HYPOTHESES SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA COUCHE LABOUREE DANS LES PARCELLES EXPERIMENTALES ETUDIEES

1. La création de mottes d'état interne delta est anthropique : les compactages lors des passages de roues des engins entraînent des tassements, plus ou moins intenses suivant les conditions d'humidité. C'est la répétition de ces compactages, toujours situés au même endroit, qui entraîne une disparition de l'espace poral structural des volumes affectés. On obtient tous les ans, à la fin de la campagne, un état interne de type delta sur la totalité du volume de profil correspondant aux zones de roulement (positions L1).

2. La charrue, par découpage⁽²⁾ puis basculement latéral des bandes de terre, déplace les volumes tassés des positions L1 vers les autres, et entraîne l'apparition de mottes delta dans les compartiments de L3, hors effet des récoltes de maïs (parcelle 3) ou des tassements créés expérimentalement (parcelle 4). Ce basculement s'effectue alternativement, d'une année sur l'autre, vers la droite et vers la gauche.

3. Lors des reprises de labour, les outils utilisés créent une fragmentation intense au sein de l'horizon H1. Dans cet horizon, les mottes delta (créées lors de la culture précédente, fragmentées puis déplacées par le labour) sont transformées en terre fine par les outils de travail superficiel. Cette action de fragmentation importante est renforcée par celle des agents climatiques, maximale dans cet horizon au contact de l'atmosphère, même si dans cette texture (environ 23% d'argile, Cf. tableau II-1), l'activité fissurale n'est pas très intense.

4. Lors des récoltes, les passages de roues sont susceptibles d'entraîner des tassements supplémentaires dans le compartiment L3, si les conditions hydriques s'y prêtent. Pour les cultures d'hiver, récoltées en été (blé, colza), on peut penser qu'elles ne causent qu'une dégradation modérée de la structure ; par contre, on attribue le pourcentage plus élevé de delta dans les successions à fréquence élevée de maïs aux récoltes en conditions tardives qu'implique cette culture. Aux tassements liés au passage du corn-picker lui-même et situés dans les positions L1, il faut ajouter ceux dus aux passages des roues de remorque, situés aléatoirement dans le champ.

La comparaison de la valeur obtenue sur la situation N°4 avec celle de la parcelle 2, conforte cette interprétation : en effet, jusqu'en 1984, ces deux situations étaient identiques ; ce n'est qu'à l'automne 1984 (le 26/10, avant le labour) que l'on a créé un état structural tassé en opérant un compactage énergétique en conditions humides, pour simuler une récolte tardive dégradante, différenciant ainsi les situations 2 et 4. Pour la suite de l'itinéraire d'implantation du blé, les travaux ont été identiques et réalisés aux mêmes dates. Ainsi les valeurs plus élevées de l'indicateur en 4 peuvent être attribuées au tassement de l'automne, toutes choses étant égales par ailleurs entre ces deux situations.

2. Nous ne tiendrons pas compte, dans la suite de ce travail, de l'effet des rasettes. Celles qui équipent chaque corps de la charrue utilisée sont de petite taille. Leur action est donc limitée : elles n'affectent pas sensiblement la bande de terre elle-même, et ne jouent que sur la localisation dans le profil des débris végétaux enfouis.

Nous proposerons un premier modèle compartimental, reposant sur les hypothèses que nous venons d'exposer. **Son écriture sera basée sur le cas de la parcelle 1.** Dans ce cas en effet, on ne prend pas en compte les compactages non localisés dans les positions L1 (on fait l'hypothèse qu'ils n'ont pas d'effet sur la structure) ; on considère que la création de Δ est systématique dans ces positions (elle a lieu tous les ans, quelles que soient les conditions climatiques) et qu'elle affecte la totalité du compartiment. On peut donc ici proposer un modèle dont l'écriture ne fait pas intervenir de règles aléatoires de compactage.

Ce ne sera pas le cas lorsqu'il faudra l'adapter au cas des autres parcelles, ce que nous ferons dans un second temps. En effet interviennent, dans ces situations, des compactages lors des récoltes d'automne (parcelles 2 et 3) ou simulés (parcelle 4), qui ne sont pas strictement localisés aux mêmes endroits d'une année sur l'autre. Cela nous amènera à introduire une partie aléatoire dans le fonctionnement du modèle, en tirant au sort la position des passages de roues en L3.

Nous confronterons les résultats de ces simulations aux valeurs mesurées sur le terrain, puis nous mènerons une analyse critique des hypothèses supplémentaires rendues nécessaires par l'écriture même du modèle.

Cette analyse nous conduira à apporter un certain nombre d'améliorations au modèle, puis à définir une autre méthode de modélisation, reposant toujours sur les quatre hypothèses de base formulées ci-dessus, mais basée sur une description point à point de l'état structural de la couche labourée et non plus sur l'évolution de la teneur en delta de compartiments homogènes.

CHAPITRE II :

**MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN Δ
DANS LES PARCELLES EXPERIMENTALES DE GRIGNON**

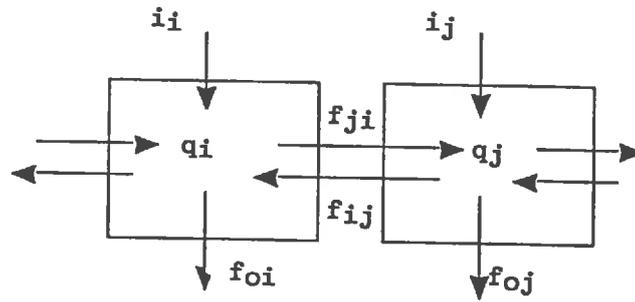


Figure II-4 : Schéma de principe du modèle compartimental proposé

(la signification des coefficients est précisée dans le texte)

1. PRESENTATION DU MODELE

Deux attitudes étaient possibles, pour le choix du type de modèle :

- la méthode de stratification du profil cultural (Manichon, 1982) suggère d'étudier les fluctuations de teneur dans des compartiments du profil délimités par l'action des outils. Cette teneur évoluant par des mécanismes que l'on peut apparenter à des dilutions (décompactage), ou à des concentrations (compactages), on utilise alors les outils de la **cinétique chimique**.

- une autre possibilité eût été de considérer le phénomène comme un processus de *naissance (compactage) - mort (décompactage) de delta*, et d'utiliser alors les outils de la **dynamique des populations**.

D'un point de vue mathématique, les deux méthodes mènent à des formalisations analogues⁽³⁾, mais le modèle compartimental nous a paru mieux correspondre à la réalité du phénomène décrit, et la seconde solution se prêtait mal à la prise en compte de l'alternance des sens de labour, les processus démographiques étant, par essence, irréversibles.

Le modèle compartimental simule, avec un pas de temps annuel, *l'évolution de la teneur en delta de compartiments de l'horizon Labouré, dont la position dans l'espace est fixe. Ces compartiments correspondent aux volumes de sol découpés par la charrue. Chacun d'entre eux est décrit par sa teneur en éléments d'état interne Δ , à un moment que l'on choisit, par convention, situé juste avant la récolte de la culture.*

Cette teneur évolue sous l'effet de trois types de flux de matière (figure II-4) :

- *Création* de Δ , par compactage. Le paramètre définissant l'entrée dans le i ème compartiment est noté i_j .

- *Transferts* entre compartiments lors du labour, traduisant le déplacement latéral lors de cette opération. $f_{ji} \cdot q_j$ est la quantité de matière transférée du j ème compartiment vers le i ème. Le sens de versement de la charrue s'inversant chaque année, on introduit également un coefficient f_{ij} de transfert du compartiment j vers le compartiment i .

- Enfin, *disparition*, lors de la reprise et sous l'effet du climat, d'une fraction du delta, par fragmentation ; c'est la sortie du système, à laquelle correspond, pour un compartiment i donné, le paramètre f_{oi} . $f_{oi} \cdot q_i$ est la quantité de matière quittant le i ème compartiment.

Par convention, tous ces coefficients sont positifs.

Cette formalisation des hypothèses de fonctionnement appelle plusieurs remarques :

. La variable d'état décrivant le compartiment i à un instant donné est q_i , la *quantité de Δ présente dans le compartiment*. En fait, en considérant que tous les compartiments ont un volume identique, stable dans le temps, le passage à la teneur ne pose pas de problème.

3. Historiquement, c'est d'ailleurs la cinétique chimique qui inspira le développement de l'écologie mathématique (Lebreton, 1973).

. Par son écriture même, ce modèle n'impose pas de différencier les calibres des mottes ou fragments d'état interne Δ : c'est l'évolution de la teneur dans les compartiments, tous calibres confondus, qui est modélisée.

. Ce type de modèle suppose que le produit dont on suit l'évolution soit réparti de manière homogène dans chacun des compartiments. Nous considérons donc, dans cet analogue chimique, que le Δ est uniformément réparti au sein des compartiments considérés. Il en résulte que les transferts entre compartiments et la disparition du Δ sont proportionnels au stock en place.

. La réversibilité des transferts n'est pas simultanée ; elle résulte de l'alternance des sens de labour, et les transferts ont lieu dans un sens une année donnée, dans l'autre l'année suivante. C'est une originalité par rapport aux modèles compartimentaux habituellement traités.

. Nous ne pourrions considérer qu'un nombre fini de compartiments. Partant du fait que l'on peut identifier un motif géométrique caractéristique du système de culture étudié qui se répète dans la parcelle, nous proposons d'ajouter un bouclage, en considérant que les compartiments d'une extrémité du motif géométrique reçoivent de la terre des compartiments de l'autre extrémité opposée du motif adjacent au moment du retournement de la bande de terre découpée par la charrue.

Le choix de ce type de modèle implique par ailleurs des simplifications par rapport à la réalité des processus en cause. Nous en discuterons en adaptant le modèle aux autres parcelles du Centre expérimental, puis dans l'étude de sensibilité (3ème partie, chapitre I).

2. ADAPTATION AUX PARCELLES DU CENTRE EXPERIMENTAL DE GRIGNON

Cette adaptation (que nous réaliserons tout d'abord, comme annoncé plus haut dans le cas de la parcelle 1) concerne le motif géométrique retenu et le paramétrage du modèle. Elle nous amènera à proposer un schéma fonctionnel, basé sur les hypothèses de fonctionnement énoncées plus haut, que nous traduirons en modèle mathématique.

2.1 Motif géométrique (Figure II-5)

Nous considérons un motif de base composé d'une position L1 associée à une position L3. C'est en effet le motif géométrique que dessinent sur les parcelles expérimentales les équipements utilisés.

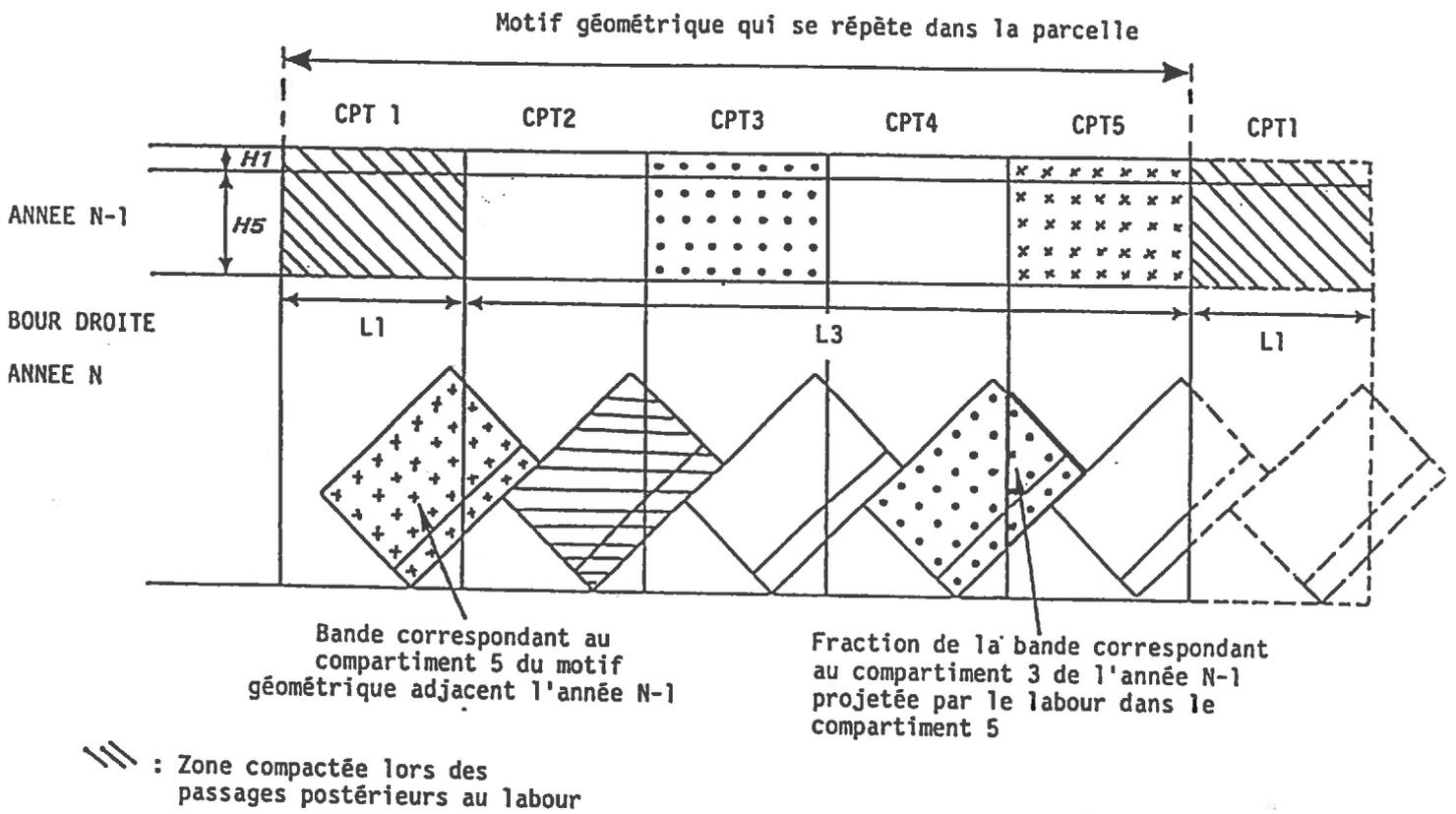


Figure II-5 : Schéma de principe du fonctionnement de la couche labourée dans les parcelles du Centre Expérimental de Grignon

La position L1 est constituée d'un seul compartiment, la position L3 de 4. Ces 5 compartiments ont tous la même largeur correspondant :

- pour ce qui concerne L1 à la dimension des pneumatiques des roues motrices du tracteur (35 cm) ;
- pour ce qui est de L3, à la largeur des bandes de terre découpées par la charrue⁽⁴⁾.

Nous considérerons que la position de ce motif dans la parcelle ne varie pas au cours du temps. En particulier, l'emplacement de la position L1 est fixe d'une année sur l'autre. Dans la réalité, la contiguïté des parcelles expérimentales impose cette fixité, que l'on ne peut cependant prétendre être strictement assurée.

Tous les ans, le labour entraîne, par la découpe des bandes de terre puis leur déport latéral, une redistribution des volumes de terre entre compartiments. Nous supposons dans un premier temps, qu'il y a coïncidence parfaite entre les limites des compartiments et celles des bandes de terre. En particulier (figure II-5) la position L1 correspond à une seule bande de labour découpée chaque année. Nous discuterons de cette hypothèse dans l'étude de sensibilité du modèle.

2.2. Paramétrage du modèle pour la parcelle 1

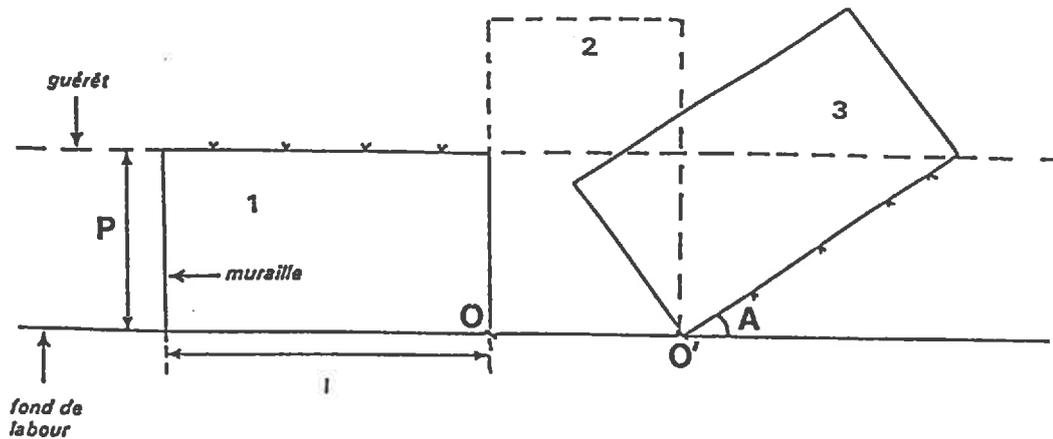
L'évaluation des paramètres dans le cas des parcelles expérimentales nous conduira à effectuer quelques hypothèses supplémentaires sur le fonctionnement du système. Nous examinerons successivement la création de Δ dans le système, les transferts entre compartiments dûs à l'action de la charrue, et le taux de disparition.

a. Création de Δ

Elle est appréhendée, dans le modèle, par les valeurs des paramètres i_i, i_j, \dots . En fait, seul i_1 est non nul, le premier compartiment étant le seul à subir des compactages occasionnant des tassements après labour. Ce paramètre est défini comme la teneur en Δ du compartiment 1 avant récolte, il s'interprète comme une valeur de forçage. Les observations de terrain (figure II-2) conduisant à admettre que le tassement est maximal dans le compartiment 1, on choisira une valeur égale à 1. Cela tient au nombre élevé de passages de roues localisés à cet endroit en cours de campagne, qui assure la création d'un état Δ , quelles qu'aient été les conditions d'humidité au moment des passages. A la fin de ce chapitre, nous envisagerons l'effet d'autres valeurs de forçage.

4. En fait, cette largeur est de 35,6 cm (14 pouces). L'erreur commise en ne prenant que 35 cm est de 2 % environ, ce que nous accepterons.

a) Principe du double pivotement



Décomposition du mouvement :

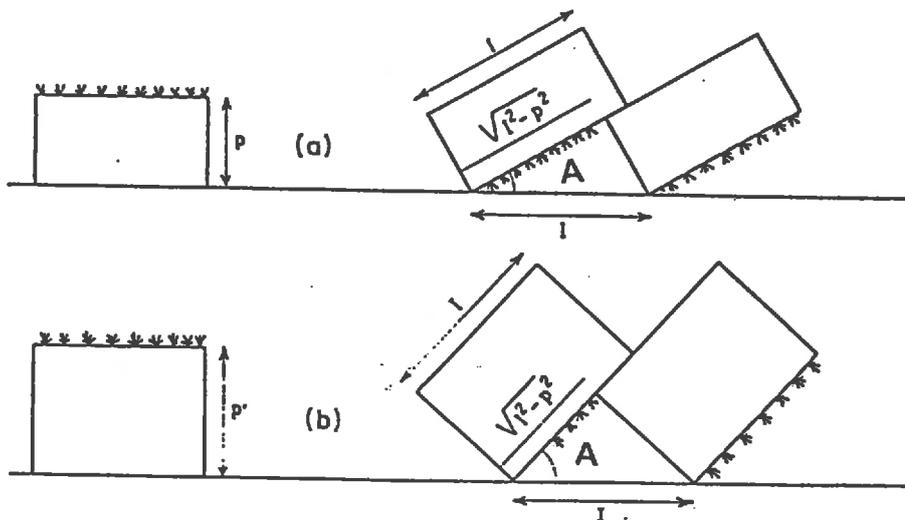
1. La terre est d'abord tranchée verticalement par le coutre, puis horizontalement par le soc. La bande ainsi découpée décrit alors une double rotation :

2. 1ère rotation, autour de O, de 90°

3. 2ème rotation, autour de O'

L'angle final avec l'horizontale est A, tel que $\sin A = P/l$

b) Deux exemples d'inclinaison de la bande (extrait de Hénin et al., 1969)



(a) Labour couché : $l/P = 2$; $\cos A = \sqrt{3}/2$; $A = 30^\circ$

(b) Labour dressé : $l/P' = 4/3$; $\cos A = 0.66$; $A \approx 45^\circ$

Figure II-6 : Schéma théorique du labour sans rasette (extrait de Hénin et al., 1969)

b. Transferts de Δ

Ils correspondent, dans le modèle, aux coefficients f_{ij} , f_{ji} ,... Nous considérerons que ces coefficients sont constants dans le temps (pas de modification des caractéristiques géométriques du labour). Pour le calcul de ces paramètres, considérant que le Δ est réparti de façon homogène au sein de chaque bande de terre, on admettra que la proportion de Δ transférée par le labour dans un compartiment donné est égale à la proportion du volume de terre déplacé dans ce même compartiment.

L'étude bibliographique sur la modélisation du déport latéral et du retournement lors du labour, fournit un modèle unique, dont l'origine remonte à 1880 (Bousfield) et qui a été repris depuis par divers auteurs (Nichols & Reed, 1934 ; Söhne, 1956 ; Feuerlin, 1960, 1966 ; Hénin *et al.*, 1969). On considère dans ce modèle que la bande de terre retournée reste rigide tout au long de son retournement, et l'on représente ce mouvement dans un plan vertical perpendiculaire à la direction d'avancement de l'outil (figure II-6). Le mouvement ainsi représenté se compose d'un double pivotement, autour de deux axes distincts (figure II-6 a) : dans un premier temps, la bande pivote autour du point O, et subit une rotation de 90°, qui l'amène sur le flanc. Dans un second temps, le pivotement s'effectue autour du point O', et s'arrête lorsque la bande repose sur celle précédemment retournée. Le sinus de l'angle que fait alors la bande retournée avec l'horizontale est égal au rapport profondeur de travail/largeur de travail.

Le mouvement réel de la bande de terre est plus complexe ; en particulier, il existe également un déport longitudinal (Nichols & Reed, 1934), la bande étant entraînée dans le sens d'avancement de la charrue. Nous négligerons ce déport dans notre modèle. D'autre part, sauf cas extrêmes (Hénin *et al.*, 1969), la bande se fragmente au cours de son mouvement le long du versoir, puis en retombant sur la bande précédemment retournée. Nous considérerons, dans un premier temps, que la bande de terre reste rigide. Nous discuterons cette hypothèse dans le chapitre suivant.

On constate, sous ces hypothèses, que *le déport latéral ne peut excéder deux compartiments*, c'est-à-dire que la terre d'un compartiment "i" ne peut être projetée au delà du compartiment "i + 2". En effet, le déport latéral est maximal lorsque $A = 0^\circ$ (labour complètement couché), et, dans ce cas, le point de la bande de terre le plus éloigné de sa position d'origine (B ou B' sur la figure II-7) est à une distance égale à $P + l$, inférieure à $2l$ puisque P est toujours inférieur à l en théorie. De plus, toujours en conformité avec le modèle de retournement utilisé, on considère que *toute la terre d'un compartiment est redistribuée par le labour dans les deux compartiments voisins* ; en effet, dès la première rotation, toute la bande est déplacée dans le compartiment adjacent (figure II-6a). Il suffit donc, pour évaluer le transfert, de calculer la proportion de la section de la bande de terre projetée dans le compartiment "i+2" (figure II-7). Nous appellerons "c" cette proportion. Après retournement, la fraction se retrouvant en "i + 1" est le complément à 100% de cette valeur. Nous exprimerons les valeurs de "c" en pourcentage de la section de la bande de labour.

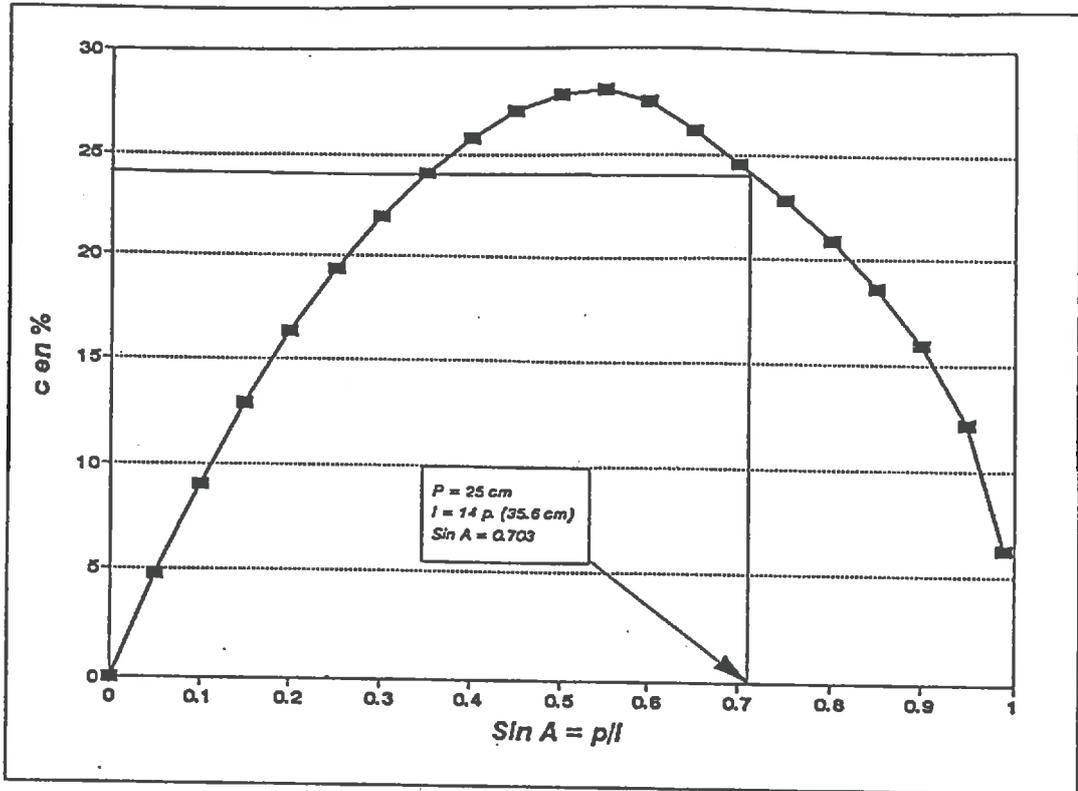


Figure II-8 : Valeurs de "c" en fonction de Sin A

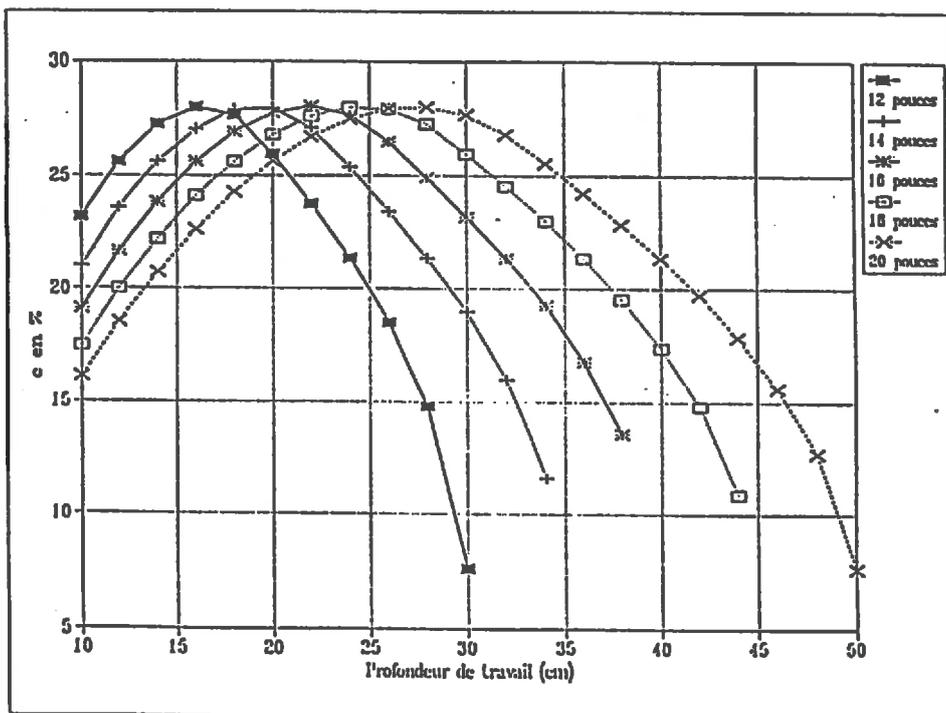


Figure II-9 : Valeurs de "c" en fonction de P et de l

Profondeurs de travail (cm)	Largeurs de travail (pouces)				
	12	14	16	18	20
10	23.2	21.0	-	-	-
15	27.7	26.4	24.8	-	-
20	26.0	28.0	27.7	26.8	25.6
25	20.0	24.4	27.2	28.0	27.7
30	7.6	18.9	23.2	26.0	27.7
35	-	7.6	18.1	22.2	24.9
40	-	-	7.6	17.4	21.3
45	-	-	-	7.6	16.8

Tableau II-5 : % du volume de la bande de labour balancé dans le second compartiment jouxtant le compartiment d'origine (valeurs de "c")

Il n'est pas possible, en pratique, d'atteindre toutes les valeurs de "x". Ainsi, on ne peut envisager, quelle que soit la largeur de travail, de profondeur inférieure à 10 cm. De même, on ne peut avoir, par construction, une profondeur de travail supérieure à la largeur de prise de la charrue (cela donnerait un sinus supérieur à 1). On a porté à la figure II-9 et au tableau II-5 les valeurs de "c" obtenues pour différentes profondeurs de travail possibles avec des charrues de 12 à 20 pouces (30 à 50 cm de largeur de travail). Pour une largeur de travail donnée, la valeur du déport croît avec la profondeur jusqu'à un maximum (lorsque "p" et "l" sont tels que $\sin A = 0.55$), puis diminue avec la profondeur de travail, pour tendre vers zéro lorsque $p = l$; la bande est alors complètement dressée avec $A = 90^\circ$, et se trouve entièrement dans le compartiment "i + 1".

Hénin *et al.*, (1969) proposent de classer les labours en fonction de leur inclinaison (figure II-6 b) : le labour est dit **dressé** lorsque l'angle est compris entre 45 et 90°. Lorsque l'angle est inférieur à 45°, le labour est **couché**. Enfin, si la partie initialement à la surface du sol se retrouve plaquée en fond de travail, le labour est qualifié de **retourné**.

Ces différents types de labour se comportent très différemment vis-à-vis de la circulation de l'eau, de la répartition et de l'enfouissement des matières organiques, de la destruction des adventices. L'agriculteur recherchera telle ou telle inclinaison en fonction des caractéristiques de la parcelle et des objectifs qu'il poursuit. Lorsque la charrue n'est pas équipée d'un système permettant de faire varier la largeur de travail, c'est par la profondeur de celui-ci que l'on peut agir. Sur le Centre Expérimental de Grignon, on dispose d'une charrue dont la largeur de travail par corps est de 14 pouces, et le labour est réalisé à une profondeur de 25 cm : la valeur de "c" correspondante est de 24,4% (figure II-9 et tableau II-5).

Nous avons souligné plus haut les hypothèses simplificatrices du modèle de retournement. Rappelons en particulier que *le mode d'évaluation de "c" suppose un placement de la charrue tel qu'elle découpe exactement les volumes de sol définis par le compartimentage du système*. Cette simplification est nécessaire dans un premier temps pour analyser le déport latéral.

c. Disparition de Δ

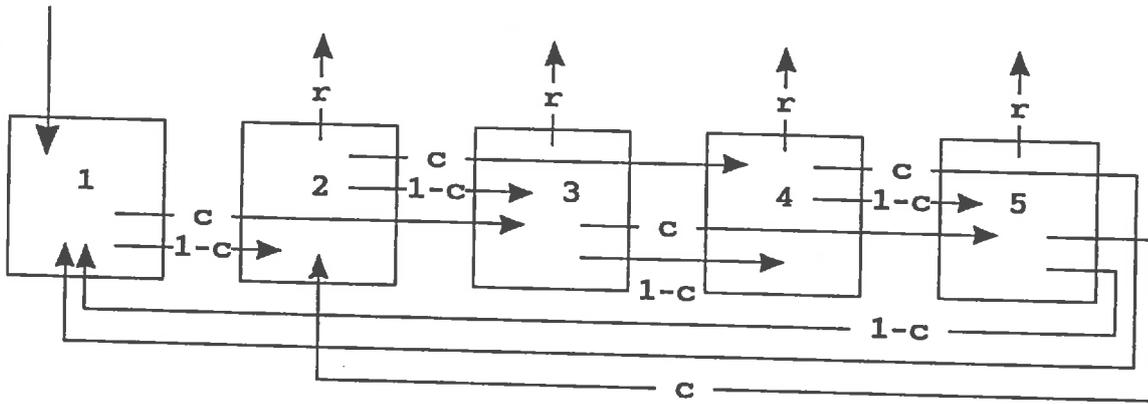
Elle est appréhendée, dans le modèle par les paramètres f_{oi} , f_{oj} Les résultats de Coulomb (1991) nous amènent à considérer que le labour n'entraîne pas de disparition du Δ préexistant : il diminue le calibre des volumes tassés, mais ne crée pas de terre fine à partir de Δ (Cf. *supra*, chapitre I). La seule cause de disparition de Δ est donc l'action des outils de reprise et celle du climat dans H1, entraînant une diminution du calibre des mottes d'état interne Δ présentes dans cet horizon, qui passent progressivement à l'état de terre fine, sous ces deux actions conjuguées. Nous poserons donc que, avant la récolte, la teneur en éléments d'état interne Δ est nulle dans cet horizon. Ce faisant, nous supposerons d'une part que les actions de fragmentation ne dépassent pas le niveau du fond de H1, d'autre part qu'il n'existe pas de processus entraînant sa reprise en masse (sous l'action des pluies par exemple). Ce dernier point est cohérent avec les caractéristiques du milieu considéré.

Nous supposerons en outre que l'épaisseur de l'horizon de surface est la même dans tous les compartiments de la position L3(5). Il s'agit d'une simplification, car on sait par ailleurs que l'action des outils de reprise du labour n'est pas parfaitement régulière et dépend en particulier de la résistance rencontrée localement par les pièces travaillantes. Enfin, considérant que la répartition du Δ est homogène dans un compartiment donné, nous poserons que la disparition, proportionnelle au stock en place, est égale à la proportion du volume de la couche labourée occupée par l'horizon H1. Nous appellerons "r" cette proportion, égale au rapport des épaisseurs de H1 et de l'horizon L. Dans le cas de la parcelle 1, ce rapport est égal à 5/25, soit 0,2 (20 %). Nous conserverons cependant cette simplification, mais nous reviendrons sur l'effet qu'elle peut avoir sur le fonctionnement du modèle.

Sur ces bases, nous proposons le schéma fonctionnel de la figure II-10, pour représenter le fonctionnement du modèle associé à la parcelle 1 du Centre expérimental de Grignon.

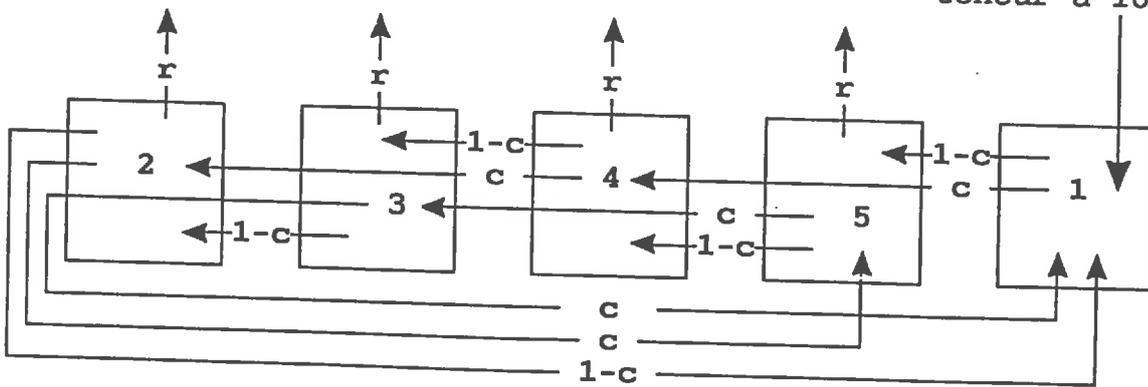
5. Nous n'avons pas à considérer la position L1, tassée en totalité lors de l'évaluation, avant la récolte (cf *supra*).

Forçage de la teneur à 100 %



LABOUR DROITE

Forçage de la teneur à 100 %



LABOUR GAUCHE

Figure II-10 : Schéma de principe du modèle proposé pour rendre compte de l'évolution de la teneur en Δ de la couche labourée dans le cas de la parcelle 1

2.3. Modèle mathématique associé (cas de la parcelle 1)

Le modèle correspondant au schéma de la figure II-10, adaptation du modèle général proposé au début de ce chapitre au cas de la parcelle 1, est :

- **Ouvert**, puisqu'il y a création et disparition de delta dans le système étudié, l'horizon Ap.

- **Bouclé**, pour tenir compte du fait que le motif étudié se répète dans la parcelle ; la terre du compartiment 4 est en effet redistribuée dans le compartiment 5 du même motif et dans le premier compartiment du motif adjacent, en cas de labour versant vers la droite. De même, le compartiment 1 reçoit de la terre des compartiments 4 et 5 du motif voisin. Ceci se traduit dans le modèle par le bouclage des flèches de transferts entre compartiments.

- **Réversible**, puisque les flux entre compartiments s'inversent d'une année sur l'autre du fait de l'alternance des sens de labour.

Pour amener la formulation des équations correspondant au modèle mathématique associé, prenons l'exemple du compartiment N°3 :

soit " x_3^t " sa concentration en delta à l'année "t", en fin de campagne ; " x_3^t ", exprimé en pourcentage, est la proportion en volume de la terre du compartiment 3 présentant un état interne Δ .

Si, à l'année "t", le labour a versé vers la droite, alors on a :

- **Après le labour :**

$$x_{3t} = 0 \cdot x_3^{t-1} \quad \text{l'ensemble du compartiment a été redistribué en 4 et 5}$$
$$+ c \cdot x_1^{t-1} \quad \text{fraction du compartiment } x_1 \text{ déportée dans le compartiment } x_3$$
$$+ (1-c) \cdot x_2^{t-1} \quad \text{fraction du compartiment } x_2 \text{ déportée dans le compartiment } x_3$$

- **Puis, lors de la reprise et sous l'action du climat en cours de campagne :**

$$x_3^t = [0 \cdot x_3^{t-1} + c \cdot x_1^{t-1} + (1-c) \cdot x_2^{t-1}] \cdot (1-r)$$

"r" étant le taux de disparition.

- **Donc, en fin de campagne :**

$$x_3^1 = [c \cdot x_1^{t-1} + (1-c) \cdot x_2^{t-1}] \cdot (1-r)$$

et, en développant :

$$X^t = (1-r)^2 M * M' * X^{t-2} + [(1-r)M + I] * U^t, \quad (I = \text{matrice identité})$$

car $U^{t-1} = U^t$, avec nos hypothèses (même valeur de forçage du compartiment 1 tous les ans).

On peut alors écrire, en ne s'intéressant qu'aux années paires :

$$X^{2k} = (1-r)^2 MM' * X^{2(k-1)} + [(1-r)M + I] * U^{2k} \quad (4)$$

avec :

$$MM' = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c(1-c) & c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-c)^2 & c(1-c) & 0 \\ 0 & 0 & c(1-c) & c^2+(1-c)^2 & c(1-c) \\ c(1-c) & 0 & 0 & c(1-c) & c^2+(1-c)^2 \end{vmatrix}$$

et, quel que soit k

$$[(1-r)M + I] * U = \begin{vmatrix} 1 \\ (1-r)*(1-c) \\ (1-r)*c \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

En développant, on obtient l'expression de chacune des concentrations au temps 2k en fonction des concentrations au temps 2(k-1) :

$$x_1^{2k} = 1$$

$$x_2^{2k} = (1-r)^2 [c(1-c)x_1^{2(k-1)} + c^2 x_2^{2(k-1)}] + (1-r)(1-c)$$

$$x_3^{2k} = (1-r)^2 [(1-c^2)x_3^{2(k-1)} + c(1-c)x_4^{2(k-1)}] + (1-r)c$$

$$x_4^{2k} = (1-r)^2 [(c(1-c)x_3^{2(k-1)} + (c^2+(1-c)^2)x_4^{2(k-1)} + c(1-c)x_5^{2(k-1)}]$$

$$x_5^{2k} = (1-r)^2 [(c(1-c)x_1^{2(k-1)} + c(1-c)x_4^{2(k-1)} + (c^2+(1-c)^2)x_5^{2(k-1)}]$$

Il est alors possible d'écrire, à partir de la relation de récurrence (4) et en posant $A = (1-r)^2 MM'$ et $B = [(1-r)M + I]$:

$$\begin{aligned}
 X_{2k} &= A \cdot X_{2(k-1)} + B \cdot U_{2(k-1)} \\
 &= A \cdot (A \cdot X_{2(k-2)} + B \cdot U_{2(k-2)}) + B \cdot U_{2(k-1)} \\
 &= A^2 \cdot X_{2(k-2)} + A \cdot B \cdot U_{2(k-2)} + B \cdot U_{2(k-1)} \\
 &= A^2 \cdot (A \cdot X_{2(k-3)} + B \cdot U_{2(k-3)}) + A \cdot B \cdot U_{2(k-2)} + B \cdot U_{2(k-1)} \\
 &= A^3 \cdot X_{2(k-3)} + A^2 \cdot B \cdot U_{2(k-3)} + A \cdot B \cdot U_{2(k-2)} + B \cdot U_{2(k-1)} \\
 &\dots\dots \\
 X_{2k} &= A^k \cdot X_0 + \sum_{i=0}^{k-1} A^{k-1-i} \cdot B \cdot U_{2i} \quad (A^k = A \text{ à la puissance } k)
 \end{aligned}$$

Lorsque "k" tend vers l'infini, le système atteindra un état d'équilibre si et seulement si:

- la limite de A^k est finie et la série :

$$\sum_{i=0}^{k-1} A^{k-1-i} \cdot B \cdot U_{2i}$$

est convergente.

Une condition nécessaire et suffisante pour que cela soit le cas est que les valeurs propres de l'équation caractéristique de A soient toutes de module inférieur à 1 (Gueguen et al., 1978).

Dans ce cas en effet, $\lim A^k = 0$ lorsque "k" tend vers l'infini, et c'est une condition nécessaire et suffisante pour que la série converge. Ces valeurs sont les racines de l'équation caractéristique de A :

$$\text{Det}(A - \lambda \cdot I) = 0.$$

Nous présentons à l'annexe 3 le calcul des solutions, et la démonstration qu'elles vérifient bien la condition recherchée, quelles que soient les valeurs prises par les paramètres r et c, et quelles que soient les conditions initiales retenues.

Le modèle proposé prévoit donc bien l'atteinte d'une valeur d'équilibre stable, quelles que soient les valeurs prises par r et c dans l'intervalle [0,1] et indépendamment des conditions initiales. La valeur à l'équilibre de l'indicateur dépend de la limite lorsque "k" tend vers l'infini de la série

$$\sum_{i=0}^{k-1} A^{k-1-i} \cdot B \cdot U_{2i}$$

La relation de récurrence que nous avons établie permet de calculer l'expression littérale des concentrations à l'équilibre dans chacun des compartiments (annexe 4).

L'autre approche mathématique possible de l'étude du modèle consiste à considérer le pas de temps retenu comme très petit devant la durée du phénomène, et conduit à un système d'équations différentielles du premier ordre à coefficients constants, dont les solutions sont des fonctions continues décrivant l'évolution des concentrations des différents compartiments au cours du temps. Les solutions correspondant au jeu de paramètres de la parcelle 1 sont présentées à l'annexe 5.

Conclusion

L'analyse mathématique montre que, pour la gamme des valeurs admissibles des paramètres r et c , le modèle prévoit l'atteinte d'un état d'équilibre stable. Celui-ci apparaît dynamique (Pavé, 1994) lorsque l'on considère la teneur en Δ dans chacun des compartiments qui le composent (oscillations périodiques autour d'une valeur moyenne (cf. figures A5-1 et A5-2 de l'annexe 5). L'équilibre est par contre statique lorsque l'on considère la valeur moyenne sur la position L3. L'analyse mathématique montre par ailleurs l'existence d'une forte variabilité des teneurs entre compartiments, dans le cas de la parcelle 1, variabilité que nous avons constaté sur le terrain.

A partir des équations établies précédemment, il est maintenant possible de réaliser une application numérique sur tableur, afin de simuler l'évolution de l'indicateur dans les conditions des quatre parcelles du Centre expérimental. Nous le ferons d'abord sur la parcelle 1, pour laquelle nous n'avons pas à prendre en compte de compactages répartis aléatoirement sur la surface ; nous envisagerons dans un second temps l'application du modèle aux cas des parcelles 2, 3 et 4. Ceci nous amènera à introduire une partie aléatoire dans la simulation afin de rendre compte de l'effet des tassements sur les compartiments de la position L3. Ceux-ci, qui correspondent aux récoltes d'automne (parcelles 2 et 3) ou à un traitement expérimental (parcelle 4) affectent environ un quart de la surface de la position L3 dans le premier cas, l'ensemble de cette surface dans le second. Ne pouvant les localiser précisément pour les parcelles 2 et 3, nous tirerons au hasard le numéro du compartiment de L3 tassé. Nous supposerons par ailleurs que, dans le cas de la parcelle 3, les récoltes de maïs sont tous les ans dégradantes.

Pour les 4 situations, nous fixerons les conditions initiales en choisissant une teneur nulle dans les quatre compartiments de L3. Dans la mesure où nous recherchons les valeurs à l'équilibre, et ayant démontré que celles-ci étaient indépendantes de l'état initial, ce choix ne pose *a priori* pas de problème.

3. APPLICATION NUMERIQUE SUR TABLEUR, ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS MESUREES A GRIGNON

Les deux équations correspondant aux deux sens de versement du labour, ont été programmées en alternance sur un tableur (annexe 6). Ceci permet un calcul sur un pas de temps annuel des concentrations au sein des différents compartiments.

L'objectif est ici de comparer les valeurs obtenues par simulation dans la position L3 aux valeurs mesurés sur le terrain. Cette comparaison appelle cependant deux remarques :

- les valeurs de concentration calculées par le modèle portent sur l'ensemble de l'horizon labouré, alors que les mesures ont été faites dans le seul horizon H5. Mais, le delta étant supposé (dans le modèle) réparti de façon homogène dans l'ensemble de chacun des compartiments, on peut rapprocher les valeurs mesurées et calculées.

- il faut ensuite souligner qu'il ne s'agit pas ici de comparer deux voies d'estimation de la même variable ; les variables de sortie du modèle et les mesures de terrain sont en effet de natures très différentes : teneur pondérale en mottes supérieures à 2 centimètres d'état interne Δ d'un côté, concentration au sein de volumes, sans hypothèse sur le calibre des éléments, de l'autre. L'identité numérique éventuelle entre ces valeurs n'a donc pas ici tellement de signification ; ce qui importe c'est que la convergence des valeurs soit obtenue avec le même jeu de paramètres pour les quatre parcelles, que l'on ait des variabilités entre compartiments similaires et, surtout, que le classement entre situations soit respecté.

3.1. Résultats de la simulation pour les quatre parcelles étudiées

a. Parcelle N°1

Sur cette parcelle, qui ne comprend que des cultures d'hiver, on considère que les opérations de récolte n'ont aucun effet sur la structure.

Les résultats de la simulation sont présentés à la figure II-11, qui comprend trois graphes :

- l'évolution des teneurs des compartiments 3 et 4 ;
- celle des compartiments 2 et 5 ;
- et l'évolution de la teneur moyenne pour ces 4 compartiments dans la parcelle 1.

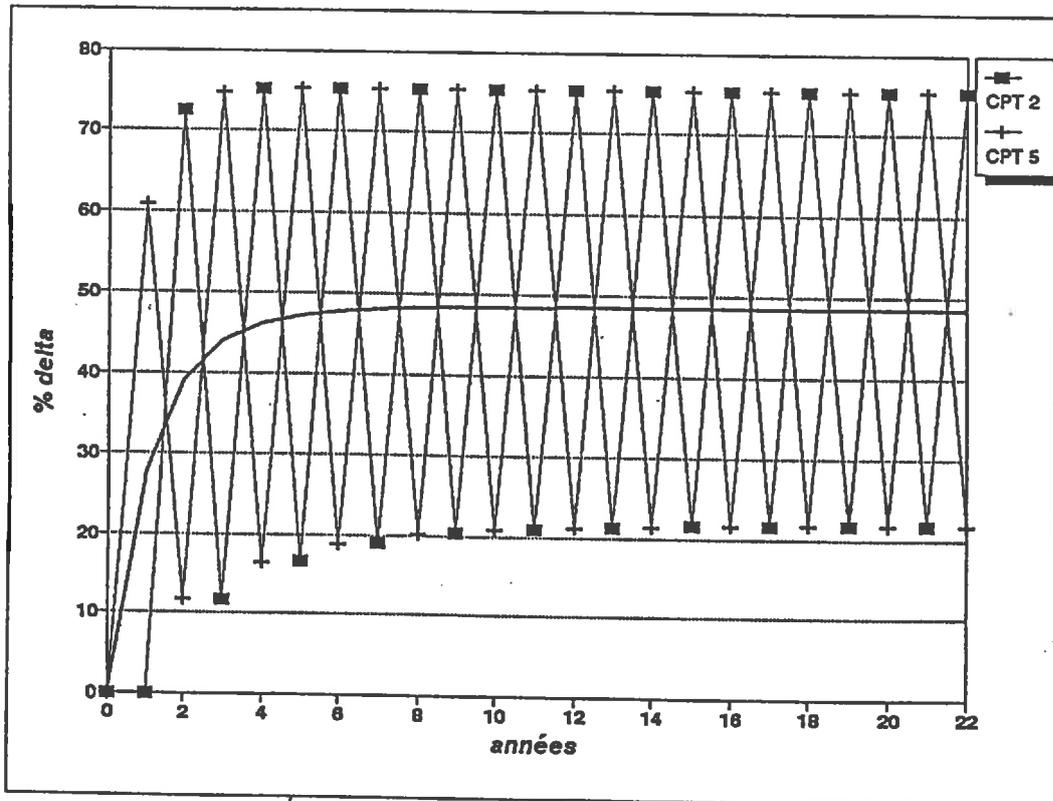
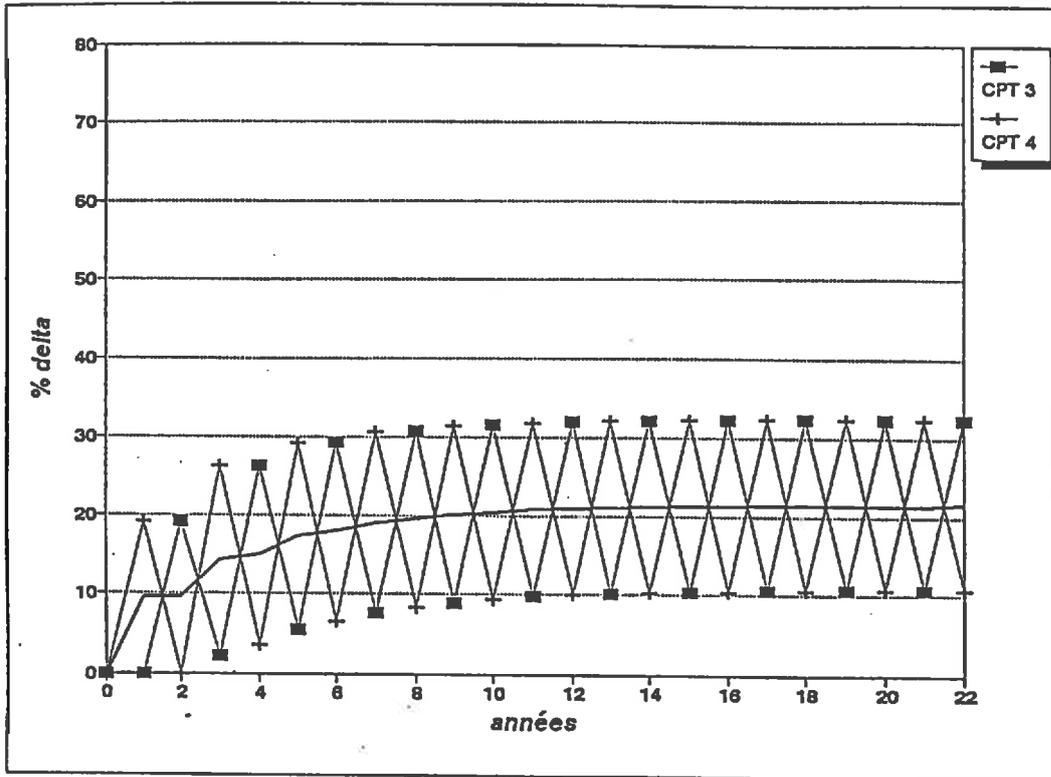


Figure II-11a: Evolution de la teneur en Δ au cours du temps, dans la parcelle 1 (compartiments de H5)

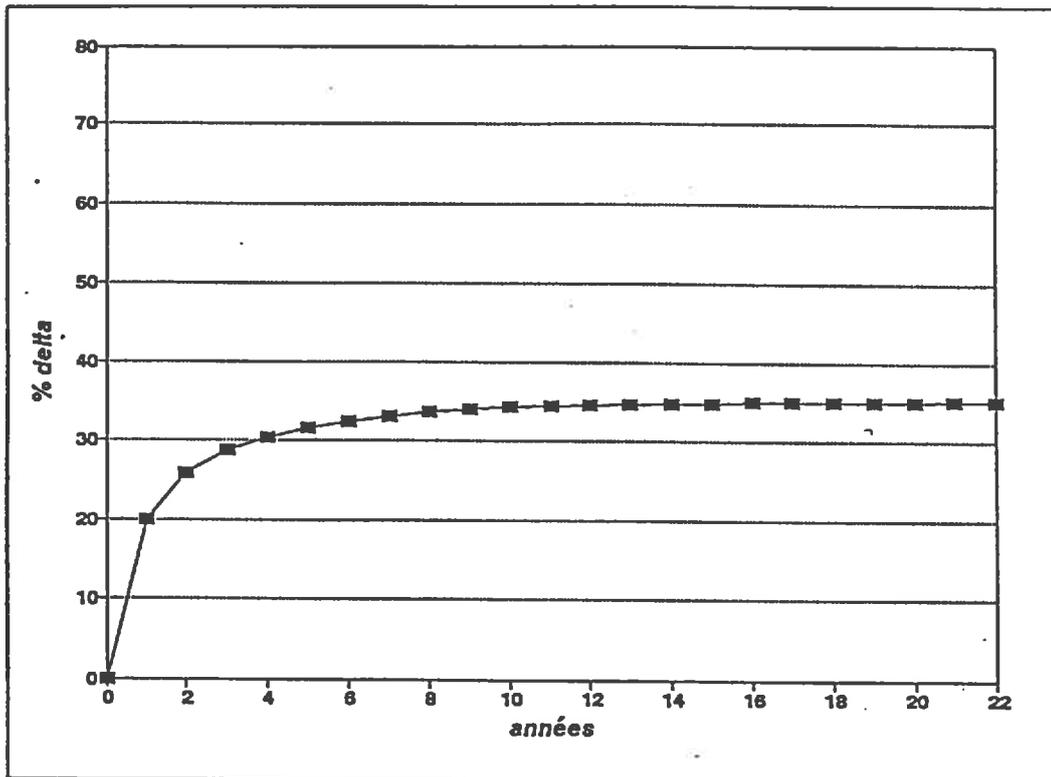


Figure II-11b : Evolution de la teneur en Δ au cours du temps, dans la parcelle 1 (moyenne L3)

On constate que les teneurs simulées de chacun des compartiments (2 à 5) oscillent autour d'une valeur moyenne atteinte au bout de 8 années environ. On remarque, par ailleurs, qu'il existe une forte symétrie entre les compartiments 2 et 5 d'une part, 3 et 4 d'autre part. Ceci résulte de l'alternance entre labour droite et labour gauche, d'une année sur l'autre.

Cette symétrie engendre une évolution de la valeur moyenne (Figure II-11b) ne présentant pas d'oscillations : **Le système apparaît en état d'équilibre statique (Pavé, 1994).**

Cet état est entièrement décrit par deux valeurs :

- la moyenne des concentrations des compartiments 2 et 5 (compartiments latéraux),
- et la moyenne des concentrations des compartiments 3 et 4 (compartiments centraux).

En régime stationnaire, la concentration d'un compartiment donné oscille autour de l'une ou l'autre de ces valeurs, et ce en symétrie avec son correspondant, central ou latéral.

La valeur moyenne pour l'ensemble de la position L3 (35.03%) est très proche de la valeur mesurée dans la parcelle 1 (33,4%). Outre l'analogie entre ces valeurs moyennes, on peut également tenter de comparer la structure de la variabilité des teneurs des différents compartiments du modèle à celle mesurée sur le terrain, perpendiculairement au sens de labour.

Pour ce faire, on a mis en correspondance sur la figure II-12 les valeurs moyennes obtenues par carottage à celles prédites par le modèle dans chacun des compartiments de L3.

Notons cependant que la structure d'échantillonnage (6 carottes au sein de H5-L3) se prêtait mal à une comparaison directe avec le modèle ; pour constituer l'histogramme, nous avons établi les correspondances suivantes à partir de la position des bandes de prélèvement par rapport au compartimentage du profil (tableau II-6). Les compartiments 2 et 5 correspondent respectivement aux carottes 1 et 6 ; les valeurs des compartiments 3 et 4 ont été assimilées aux moyennes des carottes 2 et 3 d'une part, 4 et 5 d'autre part. Le labour ayant versé vers la droite l'année d'observation, nous avons retenu pour les valeurs prédites des compartiments, les valeurs d'équilibre correspondant à ce sens de versement.

N° de la carotte de prélèvement	Zone de prélèvement (en cm depuis le bord de L1)	Compartiment correspondant	
		Cote	N°
1	20-37.5	0-35	2
2	37.5-55	35-70	3
3	55-72.5		
4	72.5-90	70-105	4
5	90-107.5		
6	107.5-125	105-140	5

Tableau II-6 : Correspondance entre les compartiments du modèle et les numéros des carottes de prélèvement

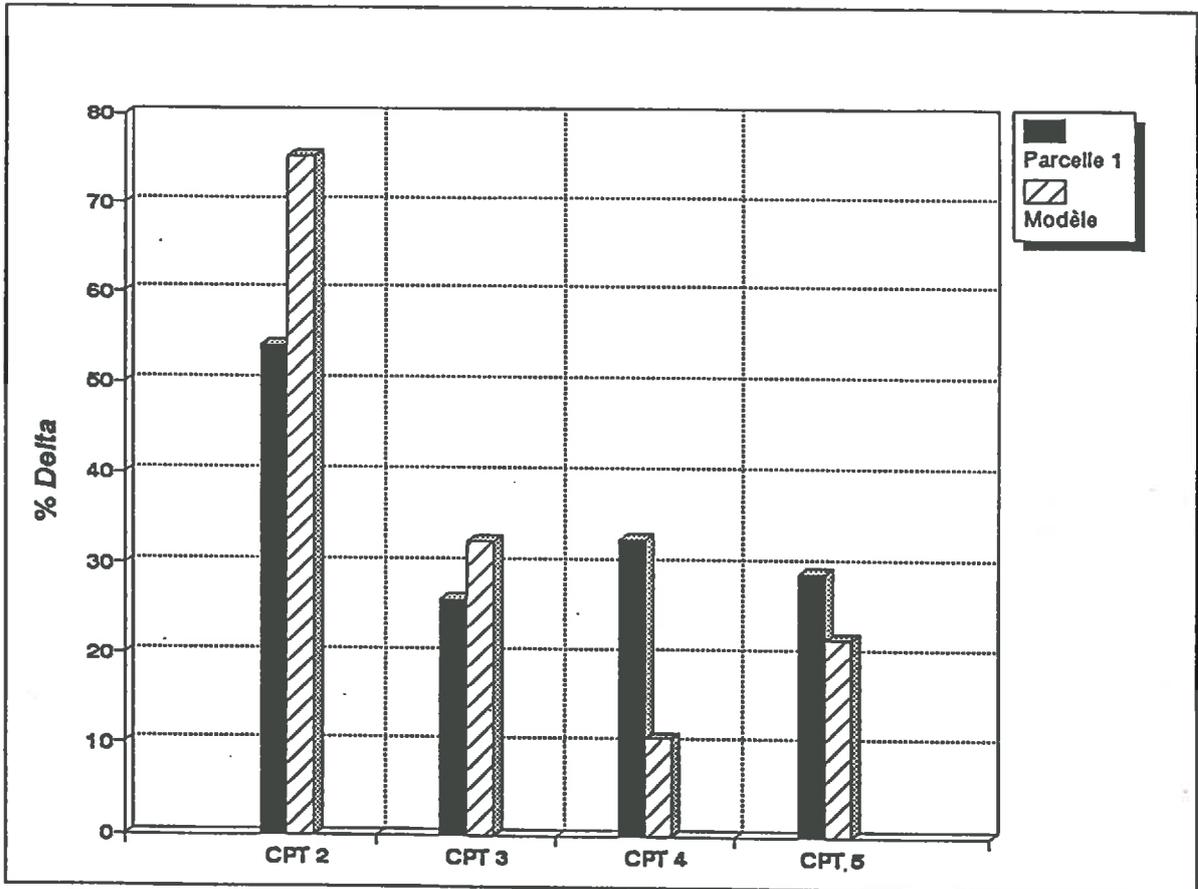
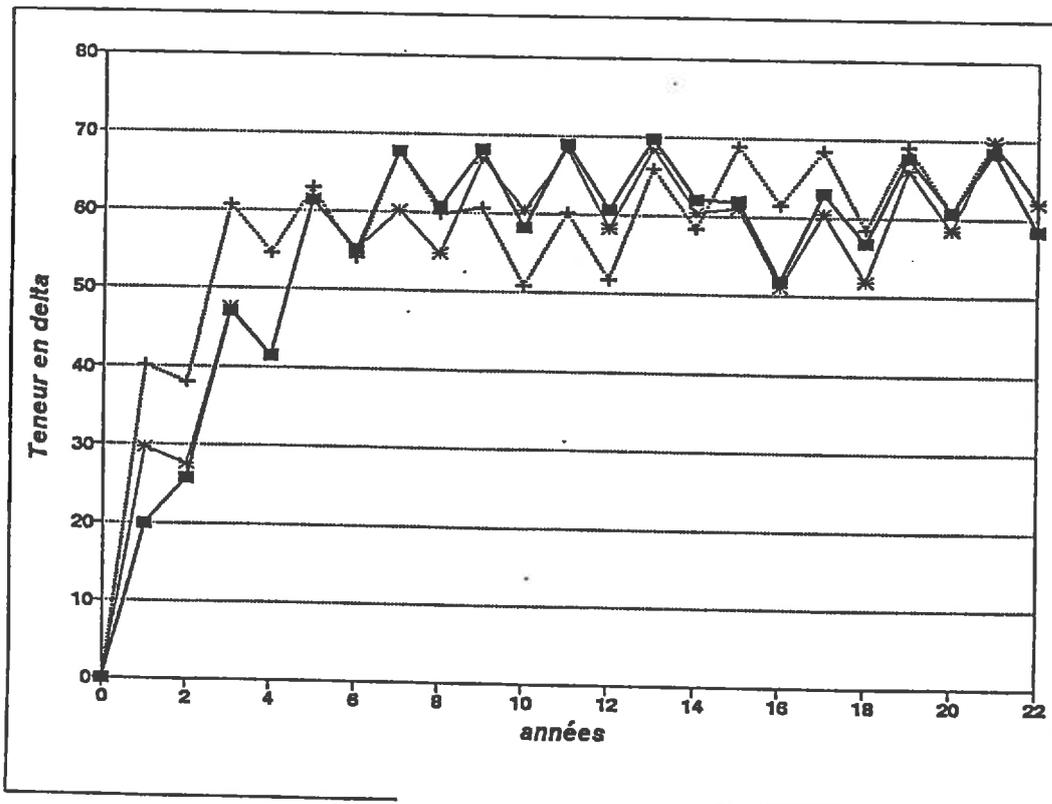


Figure II-12 : Correspondance entre valeurs mesurées et calculées (Cf. Tab. II-6).
Cas de la parcelle 1

On observe une bonne adéquation pour les compartiments 3 et 5, mais l'écart est plus important entre valeurs simulées et calculées pour les compartiments 2 et 4. Notons toutefois que l'allure générale de la répartition du Δ au sein de L3 est semblable dans les deux cas, avec en particulier un compartiment 2 dont la teneur est nettement supérieure à celle de ses voisins ; cela valide l'hypothèse de l'existence d'un transfert latéral lors du labour (qui verse ici vers la droite, par convention). Mais, si le modèle apparaît performant dans la prédiction de la valeur moyenne à l'équilibre, il prévoit mal la répartition de Δ entre compartiments de L3. Nous aurons donc à revenir sur les causes de cet écart, qui met très probablement en cause la manière dont on modélise ce transfert entre compartiments dû au déport latéral de terre par la charrue.

b. Parcelle N°3

Les observations visuelles menées au champ permettent d'évaluer la proportion de surface directement affectée par les pneumatiques lors des chantiers de récolte de maïs à environ 1 quart de la surface totale de L3. Pour cette parcelle, on introduit donc un tassement supplémentaire une année sur deux en forçant un compartiment de L3 à 100% de delta pour simuler l'effet dégradant de la récolte du maïs. Le numéro du compartiment affecté par ce tassement supplémentaire est tiré au hasard chaque année correspondant à une culture de maïs.



Note : Un compartiment de H5-L3 est compacté tous les deux ans, son numéro est tiré au sort. On présente ici trois exemples de tirages aléatoires

Figure II-13 : Simulation numérique. Cas de la parcelle 3

La courbe décrivant l'évolution de la teneur moyenne en L3, dont on a présenté trois exemples à la figure II-13, correspondant à trois séries de tirages aléatoires, présente une allure générale semblable à celle décrivant l'évolution de l'indicateur dans la parcelle 1, mais :

- la teneur atteinte est plus élevée,
- le temps d'atteinte de l'équilibre est différent entre les trois tirages,
- on observe une oscillation des valeurs moyennes autour de la moyenne générale après huit années environ de pratique du système de culture.

Dans cette situation, le système atteint, en huit ans environ, un *état d'équilibre dynamique*, oscillant plus ou moins régulièrement autour d'une valeur moyenne.

Les mesures ayant été effectuées sur le terrain l'année culturale suivant la récolte du maïs, il faut tenir compte des valeurs simulées aux mêmes dates pour effectuer la comparaison entre le modèle et les données expérimentales (lors des années paires dans notre modèle). La moyenne des valeurs atteintes les années paires, est, lorsque le système est en régime stationnaire (à partir de la huitième année), de 66,7%, à rapprocher des 68,3% mesurés sur la parcelle 3 (figure II-14).

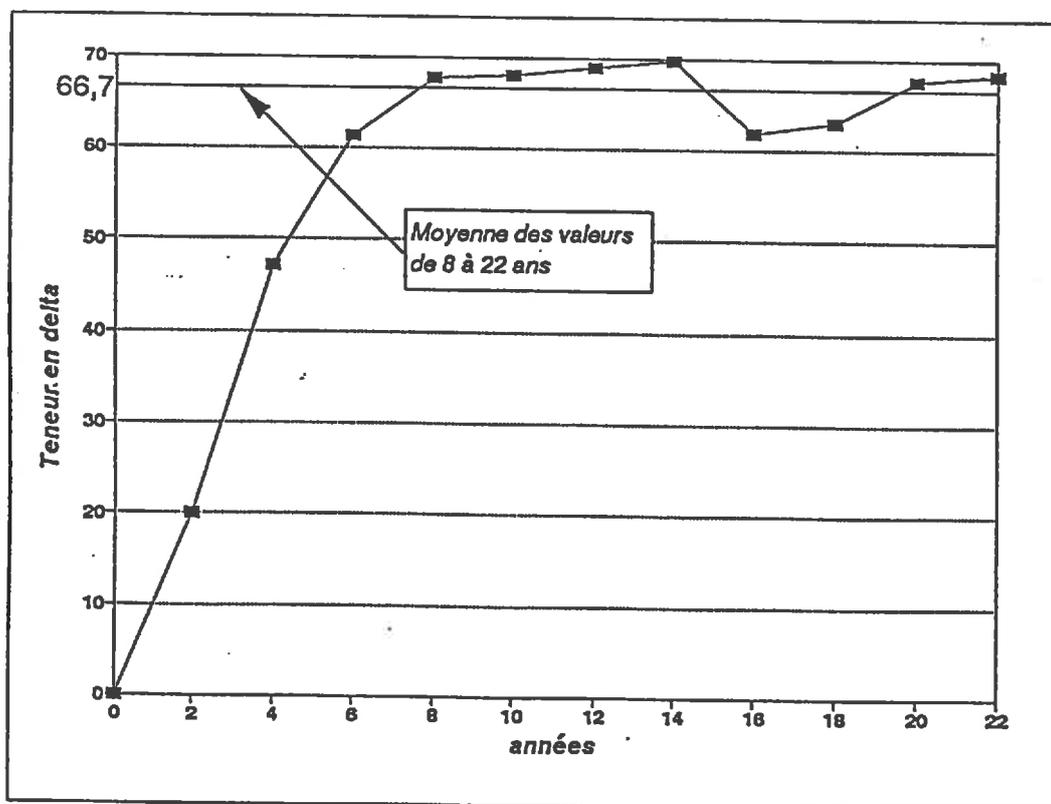


Figure II-14 : Evolution de la teneur moyenne en Δ pour une succession blé/maïs (mêmes règles de fonctionnement que dans le cas de la figure précédente)

Enfin on a porté, sur la figure II-15, l'histogramme des valeurs obtenues pour chacun des compartiments et celui des valeurs mesurées transversalement sur la parcelle 3 (même règle de correspondance entre carottes de prélèvement et compartiments que dans le cas de la parcelle 1). Sur l'histogramme des valeurs simulées, on constate que les écarts entre compartiments sont moindres que dans le cas précédent. Cette observation est à rapprocher de l'aspect des cartes structurales effectuées (Cf. *supra*, figure II-2) sur lesquelles la répartition des zones Δ apparaît plus homogène au sein de H5-L3 que dans le cas de la parcelle 1.

Concernant la correspondance entre les deux histogrammes, on note que l'adéquation n'est pas parfaite, particulièrement pour les compartiments 3 et 5. Il faut donc ici faire la même observation que pour la parcelle 1 et mettre en cause également la manière de modéliser les transferts entre compartiments, tout en notant qu'ici les valeurs présentées correspondent à une modalité particulière de tirage aléatoire des positions du compartiment compacté dans le modèle, ce qui accroît l'incertitude. Plusieurs simulations effectuées montrent que l'allure générale de la distribution reste la même, avec en particulier une moindre variabilité des teneurs entre compartiments que dans le cas de la parcelle 1, mais que la correspondance entre valeurs simulées et valeurs mesurées au sein des compartiments est très fluctuante, alors que la moyenne, tous compartiments confondus, est bien prédite.

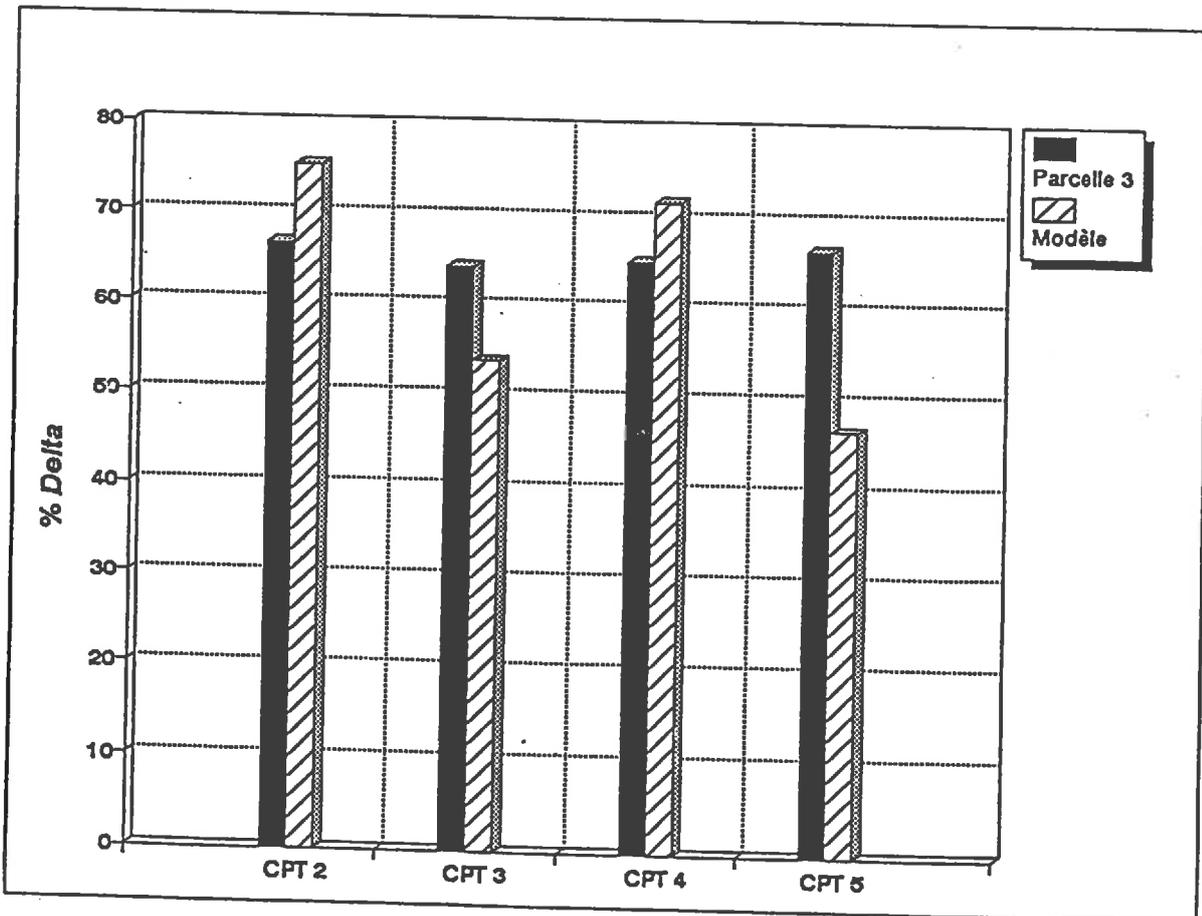


Figure II-15 : Correspondance entre valeurs mesurées et calculées. Parcelle 3 (Cf. Tab. II-5)

c. Parcelle N°2

Dans cette situation, le système de culture pratiqué est comparable à celui de la parcelle 1 (du point de vue de la fréquence des cultures d'été), à l'exception de la présence d'une culture de maïs huit ans avant la date d'observation. Pour la simulation, on introduit donc un compactage supplémentaire sur l'un des compartiments de L3, lors de la troisième année de pratique du système de culture (c'est-à-dire huit ans avant la date d'observation). La courbe de l'évolution de la teneur moyenne en fonction du temps est présentée à la figure II-16, sur laquelle figure également celle de la parcelle 1.

On observe une brusque augmentation la troisième année, due au compactage supplémentaire simulant la récolte du maïs, puis la teneur tend vers la valeur obtenue dans les conditions de la parcelle 1. L'année d'observation est proche du moment où les deux courbes se rejoignent, ce qui concorde avec la similitude des valeurs mesurées sur ces deux situations. On note par ailleurs que cinq à six années sans compactage supplémentaire sont nécessaires pour retrouver, après une récolte dégradante, une valeur proche de l'équilibre (pour "rattraper" la situation dégradée). Le comportement du modèle confirme ici les résultats de l'analyse mathématique, ayant montré l'atteinte d'un état d'équilibre asymptotiquement stable⁽⁶⁾.

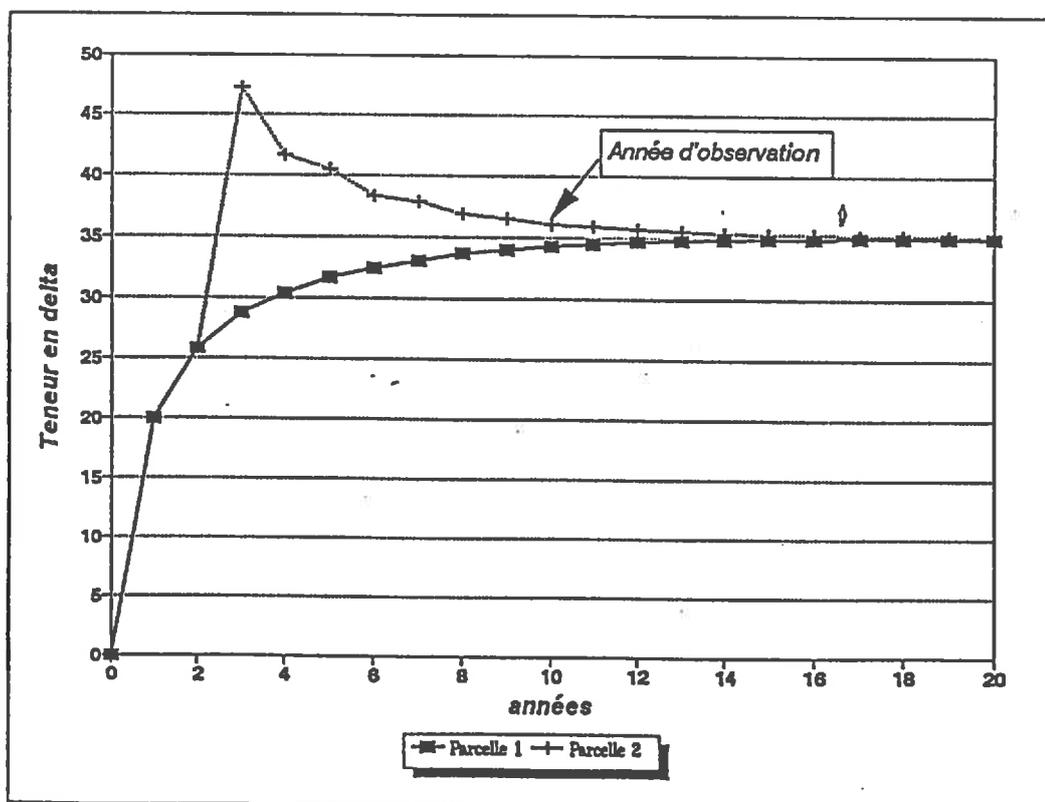


Figure II-16 : Simulation de l'évolution de la teneur en Δ . Parcelles 1 et 2

6. On pourrait également parler ici de résilience, même si ce terme apparaît un peu fort, dans la mesure où il s'applique plutôt à des dynamiques présentant plusieurs points d'équilibre auxquels le système retourne après perturbation (Pavé, 1994).

d. Parcelle N°4

Sur cette parcelle, le système de culture pratiqué a été pendant dix ans celui de la parcelle 2, avant que l'on n'introduise un compactage juste avant le labour de l'année d'observation. Pour simuler cette situation, on force à 100% de Δ les compartiments de H5-L3, après avoir atteint l'équilibre correspondant à la situation de la parcelle N°2.

En tenant compte de la date de l'observation, on peut comparer les valeurs moyennes prédites et mesurées (figure II-17) : respectivement 80% et 66,2%. L'écart est ici plus important que dans les cas précédents. Ceci est à mettre en relation avec le fait qu'il est, en pratique, très difficile d'obtenir sur le terrain, en une seule opération, un tassement expérimental parfaitement homogène et maximal sur l'ensemble de l'horizon Ap.

Si l'on poursuit la simulation, on constate que, comme précédemment, la valeur prédite, après une brutale augmentation due au compactage, retourne à l'équilibre lorsque l'on reprend les conditions antérieures du système de culture pratiqué.

Ce résultat comme celui obtenu pour la parcelle 2, est conforme aux conclusions de l'analyse mathématique du modèle montrant l'atteinte d'un état d'équilibre stable.

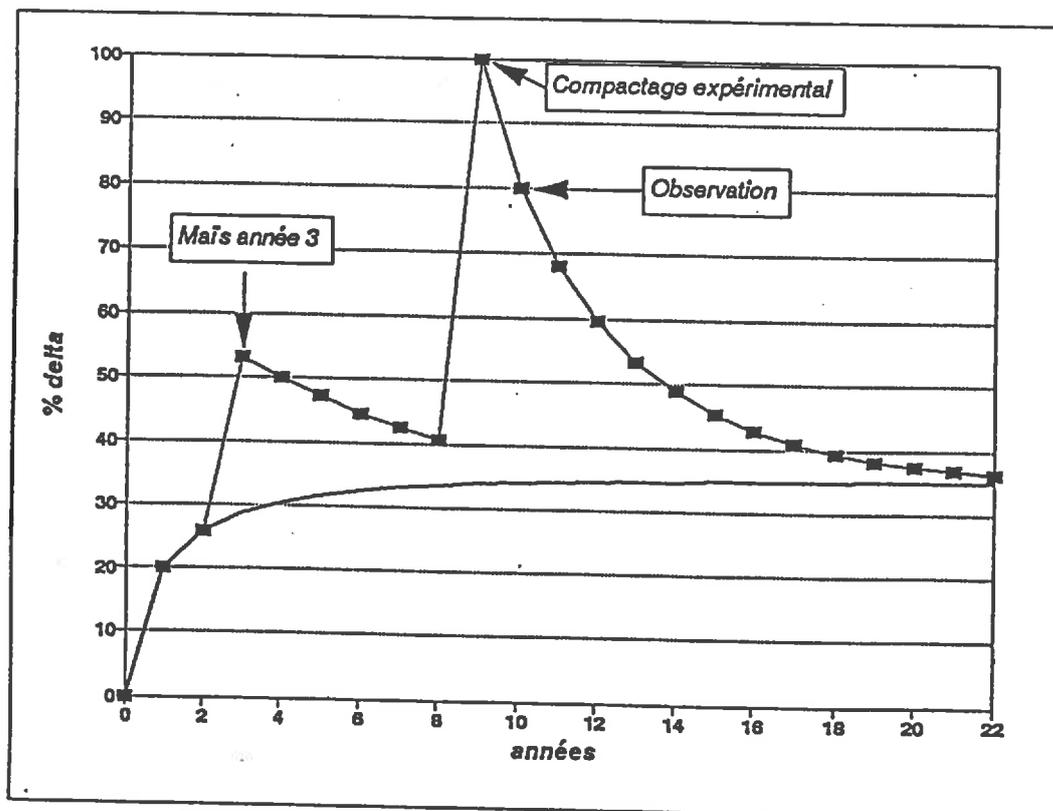


Figure II-17 : Effet d'un compactage accidentel sur l'évolution de la teneur en Δ . Parcelle 4

3.2. Conclusion

Sur les quatre situations, les simulations réalisées donnent, en régime stationnaire, des valeurs moyennes très proches de celles mesurées sur le terrain en H5-L3. Mais ce modèle présente également l'intérêt de proposer une cinétique d'évolution de la teneur en Δ de la couche labourée et des différents compartiments qui la composent.

Avec le jeu de paramètres retenu, et pour la teneur moyenne, cette cinétique se caractérise par une phase de démarrage où l'évolution est d'allure exponentielle, puis l'atteinte, après huit années environ, d'un régime stationnaire caractérisé par une valeur d'équilibre, qui dépend du système de culture pratiqué :

- quand les règles de fonctionnement introduites dans le modèle sont constantes d'une année sur l'autre, la valeur simulée tend vers cette valeur d'équilibre (parcelle 1) ; en régime stationnaire, le système est en équilibre statique.

- lorsque l'on introduit des fluctuations aléatoires dans la localisation des compactages, la valeur oscille autour d'une valeur moyenne (parcelle 3) ; l'équilibre apparaît dans ce cas dynamique ;

- enfin, si une perturbation dans le système est introduite, en phase de démarrage (parcelle 2) ou en régime stationnaire (parcelle 4), la valeur simulée s'écarte de la trajectoire initiale avant de tendre à nouveau vers l'équilibre correspondant aux situations non perturbées. La comparaison de ces deux courbes confirme d'autre part que l'équilibre étant atteint, son niveau est indépendant de l'état initial. L'état d'équilibre est stable.

Le modèle proposé permet en outre de simuler la structure de la variabilité des valeurs entre compartiments au sein de L3 : celle-ci est plus forte dans le cas de la parcelle 1 que dans celui de la parcelle 3 et, pour ces deux parcelles, la structure de cette variabilité ressemble à ce que l'on observe sur le terrain, après un labour versant vers la droite (Cf. *supra* les cartographies réalisées). Cela résulte du transfert latéral lors du labour. Cependant, les modalités de ce transfert (les règles de fonctionnement "*internes*" au système), devront être discutées, pour comprendre les raisons des écarts observés entre prédiction et mesure concernant les valeurs individuelles des compartiments de L3.

Au delà des convergences numériques sur les moyennes qui, en elles-mêmes, ne doivent pas impressionner, on obtient deux groupes de parcelles parfaitement distincts, ce qui conforte l'idée que l'indicateur proposé répond bien aux objectifs que nous avons fixés. Par ailleurs, l'homogénéité des valeurs moyennes en L3 au sein de chacun des groupes, malgré la nature différente des successions pratiquées, renforce l'idée énoncée dans la première partie du travail et qui sous-tend cette modélisation : *c'est bien l'interaction entre les conditions de milieu et les caractéristiques des interventions culturales (géométrie, réglages, localisation des passages) qui est déterminante dans l'évolution de l'état structural du profil.*

4. CONCLUSION ET PREMIERES SIMULATIONS

Nous avons donc, à partir d'un modèle très simplifié de la réalité, rendu compte de manière satisfaisante des résultats expérimentaux obtenus à Grignon, grâce à un jeu d'hypothèses concernant l'influence des caractéristiques de l'itinéraire technique (géométrie des outils, réglages, localisation des passages) en interaction avec les conditions de milieu au moment des interventions, sur l'évolution de l'état structural.

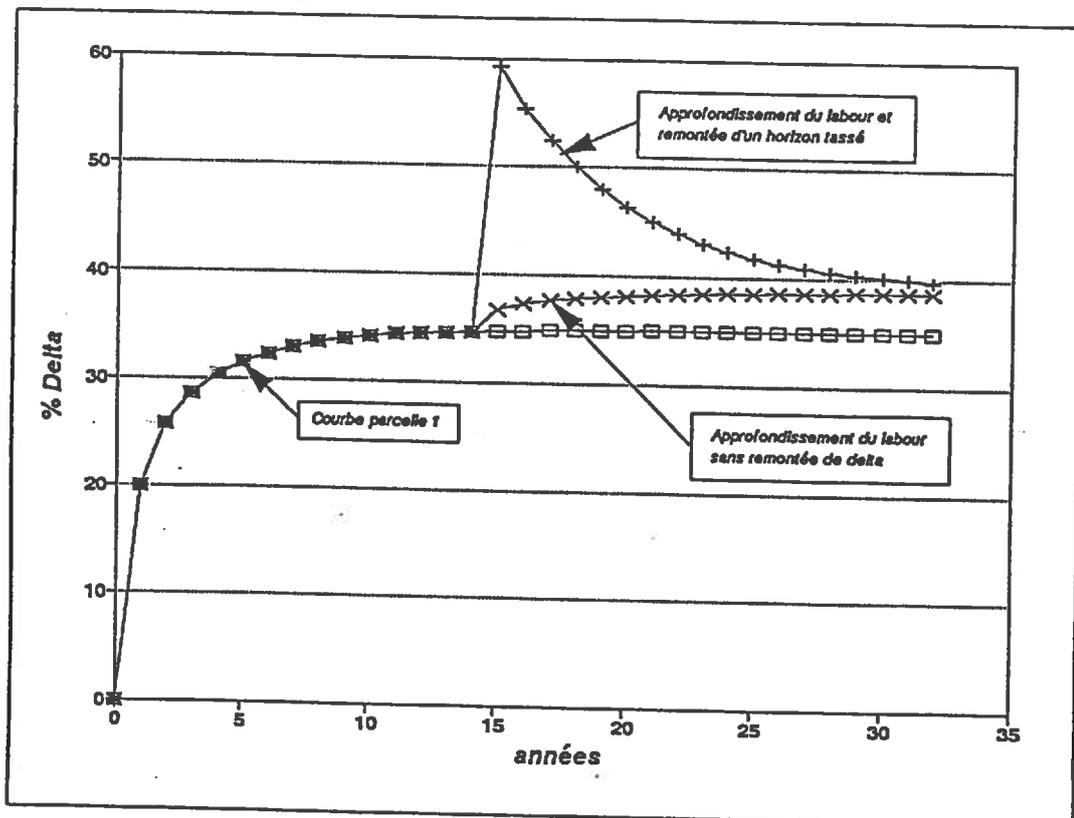
Il est possible, à ce stade de notre travail, d'utiliser les simulations pour tester l'effet sur les teneurs moyennes en L3 à l'équilibre de modifications correspondant à des changements techniques simples, mais réalistes. Nous nous proposons ici d'agir d'une part sur les caractéristiques géométriques du système étudié, et d'autre part sur l'intensité du compactage dans la positions L1. Nous ne testerons pas l'effet de compactages supplémentaires à la récolte, en L3, dont le résultat sur la valeur moyenne dans cette position est évident.

Concernant le premier point, nous envisagerons tout d'abord l'effet d'un changement de paramètres liés aux règles d'emploi des outils (profondeurs de travail, largeur de prise de raie de la charrue,...). Par simplification, nous conserverons l'hypothèse d'une largeur de pneumatique égale à la largeur de travail d'un corps de la charrue. Nous testerons ensuite l'effet d'une modification du rapport des largeurs des positions L1 et L3 qui constituent le motif se répétant dans la parcelle (modification du rapport t/l, cf. première partie, chapitre 2). S'agissant du second point, nous testerons par simulation l'influence de dispositifs permettant de diminuer l'importance du tassement, en introduisant de nouvelles règles de forçage de la concentration du compartiment 1.

4.1. Modification des caractéristiques géométriques à t/l constant

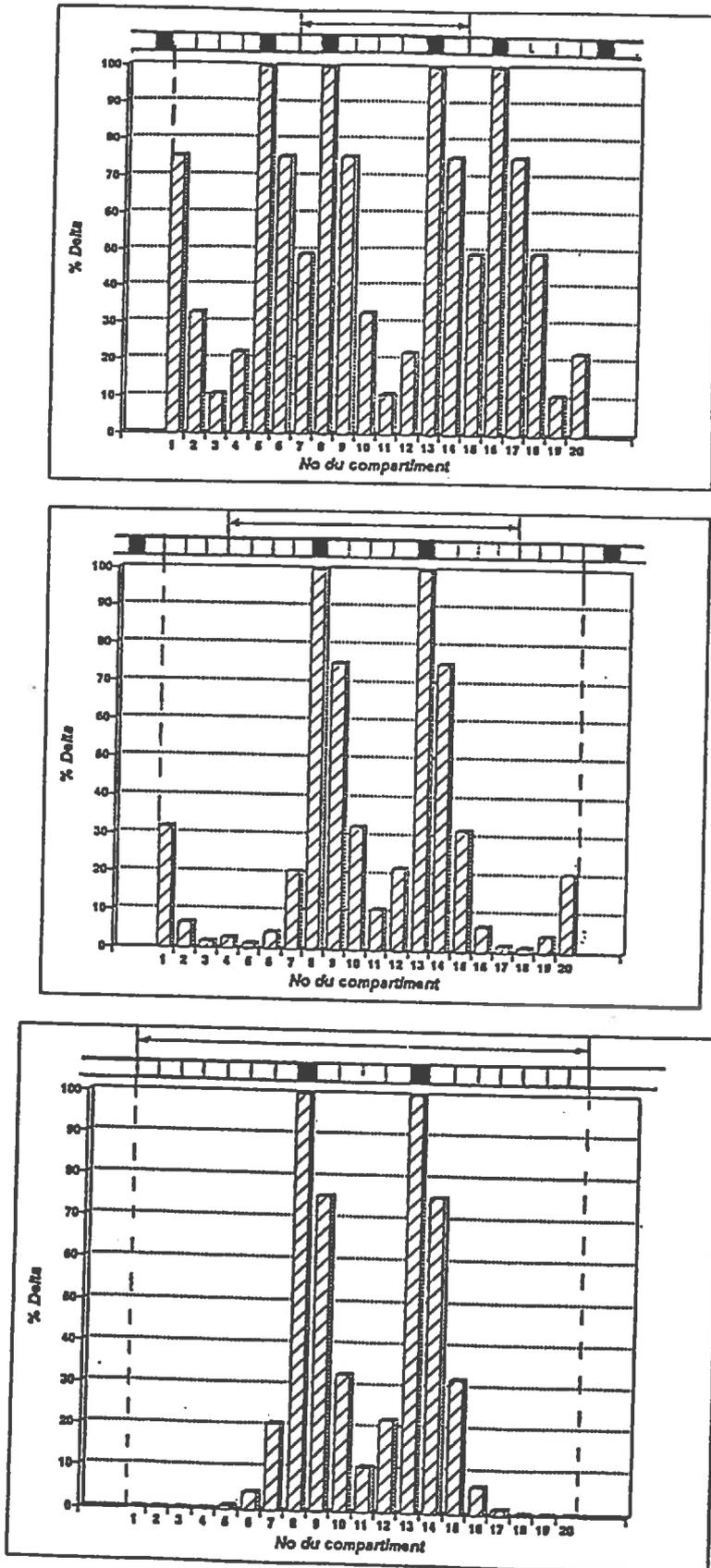
On peut envisager d'augmenter la largeur de travail des corps de charrue tout en gardant la même profondeur. Ceci revient à découper le profil en compartiments plus larges que précédemment, tout en gardant par ailleurs le même rapport t/l. On fait aussi l'hypothèse que la largeur des pneumatiques croît de la même façon, ce qui est admissible : lors du labour, une roue du tracteur circule en fond de raie, et l'on adapte sa largeur à celle de la raie. Dans ces conditions, la modification ne porte que sur le paramètre "c", qui, pour une profondeur de 0,25 m, passe de 24,4 à 27,7 % lorsque la largeur de travail évolue de 14 à 20 pouces (cf. tableau II-5). Les conséquences sur la valeur de l'indicateur sont alors minimes. On peut également changer, en même temps que la largeur des corps de charrue et celle des pneumatiques, la profondeur de labour, ce qui est, dans la pratique, le cas le plus fréquent. Ce faisant, il nous faut également adapter la valeur du taux de disparition de Δ . En effet si l'on considère que ce taux est égal au rapport des épaisseurs des horizons H1 et H5, et si l'on suppose que l'épaisseur de H1 ne change pas (même profondeur de reprise), alors l'augmentation de celle de H5 modifie le taux de disparition. Ainsi, pour une profondeur de 0,35 m et une profondeur de reprise de 0,05 m, la valeur de "r" devient $0,05/0,35 = 14,3 \%$.

Faisons tout d'abord l'hypothèse que cet approfondissement du labour n'entraîne pas de modification du flux d'entrée de Δ dans le système, c'est à dire que l'horizon situé avant approfondissement sous le fond de labour n'est pas tassé. La lecture du tableau II-5 donne la nouvelle valeur de "c" pour une profondeur de 0,35 m et une largeur de 16 pouces : 18,1 %, le labour est plus dressé. On a porté sur la figure II-18 la courbe d'évolution de l'indicateur obtenue en adoptant ce nouveau paramétrage la quatorzième année de simulation dans les conditions de la parcelle 1, lorsque le système est en régime stationnaire. On constate que l'indicateur évolue vers une nouvelle valeur d'équilibre, légèrement inférieure à 40 %, et peu différente de celle atteinte avec le jeu de paramètres initialement choisi pour la parcelle 1 (35,03 %). La diminution du déport latéral qu'implique l'accroissement de la profondeur et de la largeur de travail de la charrue, dont on attend une diminution de la teneur moyenne, est compensée par le plus faible taux de disparition retenu, qui a l'effet contraire sur la moyenne. *Le changement du type de labour n'a donc, sous ces hypothèses, que peu d'effet sur la teneur en Δ de L3, malgré l'importance des modifications d'équipements mis en oeuvre (changement de la charrue et du tracteur).*



Les deux changements techniques représentés sur la figure correspondent au paramétrage suivant, introduit la quinzième année de simulation : $p = 35 \text{ cm}$; $l = 16 \text{ pouces}$; $r = 14,3 \%$.

Figure II-18 : Courbes d'évolution de l'indicateur pour deux scénarios de changement technique (cas de la parcelle 1)



N.B. On a figuré, au dessus de chacun des histogrammes, les 20 compartiments (numérotés de 1 à 20), centrés sur le motif caractéristique (repéré par la flèche horizontale) dont on présente les teneurs en Δ . Les compartiments en noir correspondent aux passages de roues (positions L1)

Figure II-19 : Variabilité des teneurs des compartiments de L1 et L3 pour trois exemples de largeur du motif se répétant dans la parcelle 1

On peut également supposer que la modification concernant le labour faite ci-dessus modifie le flux d'entrée de Δ dans le système. C'est ce qui se produit souvent en pratique, lorsque l'augmentation de profondeur a pour effet d'intégrer à l'horizon labouré un horizon sous-jacent très compact (une "semelle de labour"). Ceci peut être modélisé en décidant qu'au moment de l'augmentation de la profondeur et de la largeur de travail, la teneur en Δ de chacun des compartiments est accrue d'un pourcentage correspondant à l'augmentation de volume de ces derniers. Cette augmentation est de 60 % lorsque la profondeur passe de 25 à 35 cm, la largeur augmentant par ailleurs de 5 cm (de 2 pouces). Le résultat est porté à la figure II-18.

On a démarré la simulation dans les conditions de la parcelle expérimentale N°1, puis on a changé le paramétrage pour simuler une profondeur et une largeur de labour de 35 cm et 40 cm respectivement, tout en augmentant le taux de Δ des compartiments proportionnellement à l'accroissement de leur volume. On observe une brusque augmentation de la teneur l'année du changement, puis un retour à un équilibre légèrement inférieur à 40 %, qui correspond à celui obtenu avec la simulation précédente (l'écart observé la trentième année avec le niveau d'équilibre précédent s'explique par la plus faible valeur de r).

4.2 Modification du rapport t/l

On traduit cette modification en changeant, dans le modèle, le nombre de compartiments composant la position L3 ; on modifie donc la largeur de travail, tout en conservant la même largeur d'appui au sol et la même voie (1,40 m) du tracteur. On a ainsi fait varier la taille du motif se répétant dans la parcelle de 8 à 24 compartiments, par pas de 2 compartiments, en conservant une largeur de L1 égale à 2 compartiments, et en supposant un tassement maximal de cette position tous les ans. La totalité des autres hypothèses de fonctionnement correspondant à la parcelle 1 est conservée. On a porté à la figure II-19 trois exemples parmi les 9 motifs ainsi obtenus, et présenté l'histogramme des valeurs atteintes à l'équilibre dans une portion de profil correspondant à 20 compartiments centrés sur le motif de base de la parcelle (toujours dans l'hypothèse d'un labour versant vers la droite). On constate que si les teneurs des 4 compartiments de L3 compris entre les deux roues du tracteur (numérotés 9 à 12), ne varient pas entre situations, les teneurs des autres compartiments sont, par contre, très sensibles à la modification de la largeur de L3. En fait, la "diffusion" du delta vers les extrémités du motif a d'autant plus de mal à se faire que celui-ci est large, avec les hypothèses de fonctionnement retenues. En diminuant la proportion des zones compactées dans la parcelle, on augmente donc la variabilité des états structuraux, même si, globalement, on diminue la teneur en delta en L3. C'est ce que l'on peut vérifier sur la figure II-20, où l'on a présenté les valeurs à l'équilibre obtenues avec les différentes largeurs de L3 testées (la valeur portée en abscisse est l'inverse du rapport t/l ; avec la règle de circulation des tracteurs adoptée sur les parcelles expérimentales, prévoyant des passages roue dans roue et non pas contigus, le rapport l/t est égal, sur le Centre de Grignon à $5 : 1 = 5$ compartiments et $t = 1$ compartiment seulement, puisqu'une

roue du tracteur repasse dans la trace du passage précédent). On constate que le niveau atteint décroît lorsque la taille de la position L3 augmente.

Les conséquences culturales de la variabilité spatiale des teneurs pouvant ne pas être négligeables (difficulté de préparer un lit de semence homogène, irrégularité des conditions de croissance entre pieds au sein du peuplement,...), ceci incite les agriculteurs adoptant des outils de grande largeur à chercher à limiter le tassement occasionné par les pneumatiques, et/ou à répartir plus régulièrement les compactages. Des équipements comme les roues arrières jumelées ou des rouleaux tasseurs placés à l'avant du tracteur entre les roues correspondent à ces objectifs. Le modèle permet d'envisager les conséquences sur la teneur en Δ de l'adoption de tels équipements.

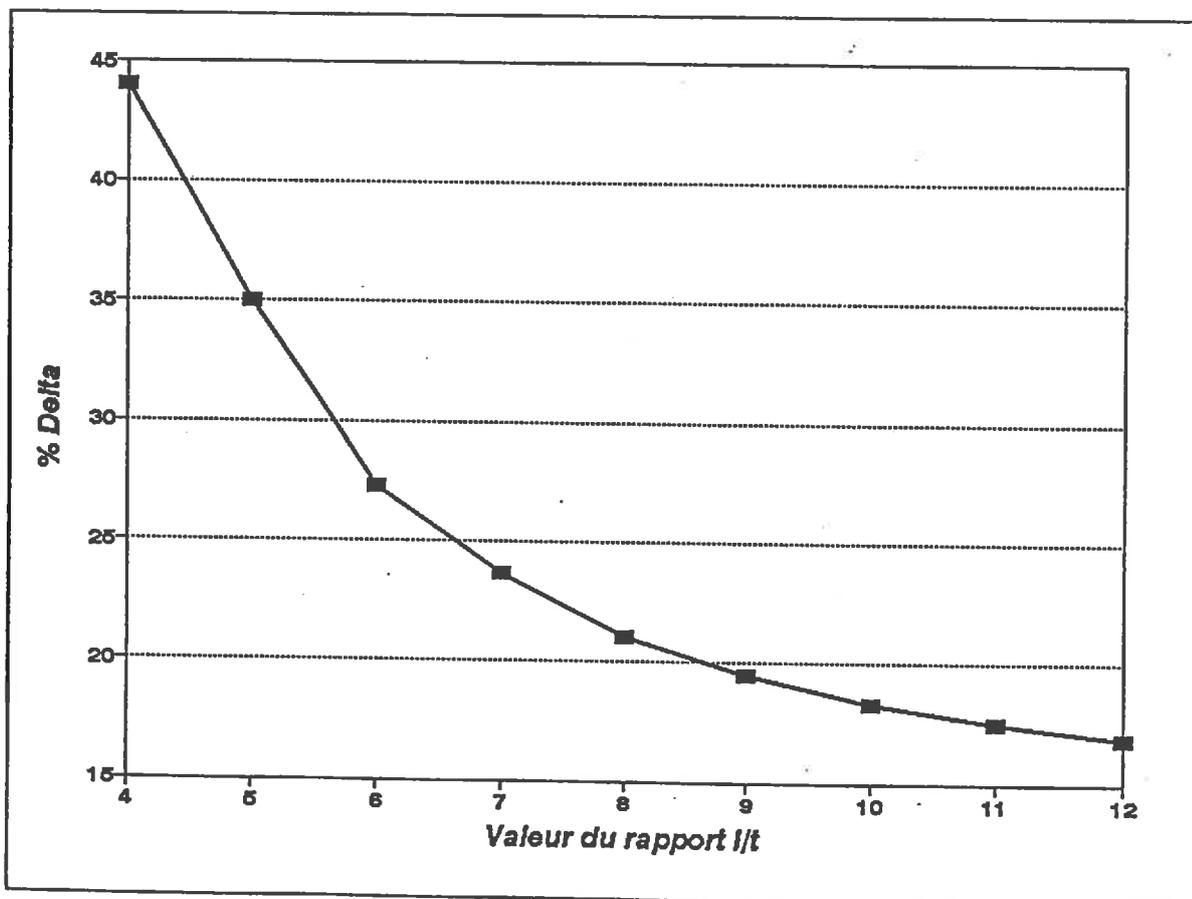


Figure II-20 : Valeurs à l'équilibre en fonction de la largeur de la position L3

4.3 Limitation du tassement dans la position L1

Afin de tester de manière simple l'effet de l'adoption de roues jumelées à l'arrière du tracteur, nous continuerons à nous situer dans les conditions de la parcelle 1. Nous serons cependant amené à changer le motif caractéristique, en considérant la position L1 constituée de deux compartiments, la position L3 gardant la même taille. Le motif comprend donc 6 compartiments et le rapport l/t passe de 5/1 à 6/2 (on suppose toujours une circulation roue dans roue des engins lors des opérations postérieures au labour). Sur ce motif, nous proposons de tester plusieurs effets possibles de l'adoption de roues jumelées sur la création de Δ dans les compartiments de L1, modifications qui seront, comme précédemment, introduites à partir de la quinzième année, lorsque le système est en régime stationnaire.

Dans un premier temps, nous supposerons que l'on n'a plus de création de delta dans les positions L1, l'équipement permettant d'éliminer tout tassement lors des opérations de reprise du labour. Dans ces conditions, les éléments d'état interne Δ présents dans la couche travaillée au moment où l'on introduit la modification ne sont plus soumis qu'aux transferts lors du labour, et disparaissent progressivement par fragmentation. Cette simulation nous permettra d'évaluer, pour cette configuration, le temps nécessaire à leur disparition complète, et donc de revenir sur l'hypothèse faite dans le modèle sur la "durée de vie" du Δ dans le système.

Dans un second temps, nous supposerons que le changement technique ne fait que *limiter* le tassement. Nous n'admettrons plus l'hypothèse d'un forçage des compartiments de la position L1 à 100 % de Δ mais supposerons que la teneur dans cette position résulte de deux opérations successives :

- le déport latéral durant le labour, qui entraîne l'apparition de Δ en L1 en provenance des compartiments de L3,
- des roulages postérieurs au labour, qui n'affectent que les 2 compartiments de la position L1. Nous ferons l'hypothèse que ce tassement ne concerne qu'une fraction, dont la teneur en Δ est portée à 100 %, de ces compartiments.

Ainsi la teneur appliquée en fin de campagne aux 2 compartiments de L1 est $x_1 = (p*100 + (1 - p)*t_1)$, où t_1 est la teneur du compartiment après le labour avant tassement, et p la fraction de compartiment forcée à 100 % de Δ lors des reprises et au semis. Nous testerons deux valeurs de p : 50 % (la moitié des compartiments sous roues est tassée à 100 %) et 20 % (un cinquième seulement des compartiments de L1 est affecté).

Enfin, nous envisagerons le cas où les roues jumelées ne limitent pas le tassement, en supposant que, chaque année, les deux compartiments de L1 sont tassés et voient leur teneur portée à 100%. Ce scénario correspond à un mauvais réglage de l'équipement (pressions de gonflage trop élevées), ou à des travaux en conditions humides, que l'on observe parfois sur le terrain (en particulier lors de l'enquête effectuée dans le Thymerais (Cf. *infra*, 3ème partie, chapitre II).

Les courbes d'évolution de la teneur moyenne en Δ de la position L3 ainsi obtenues sont présentées à la figure II-21.

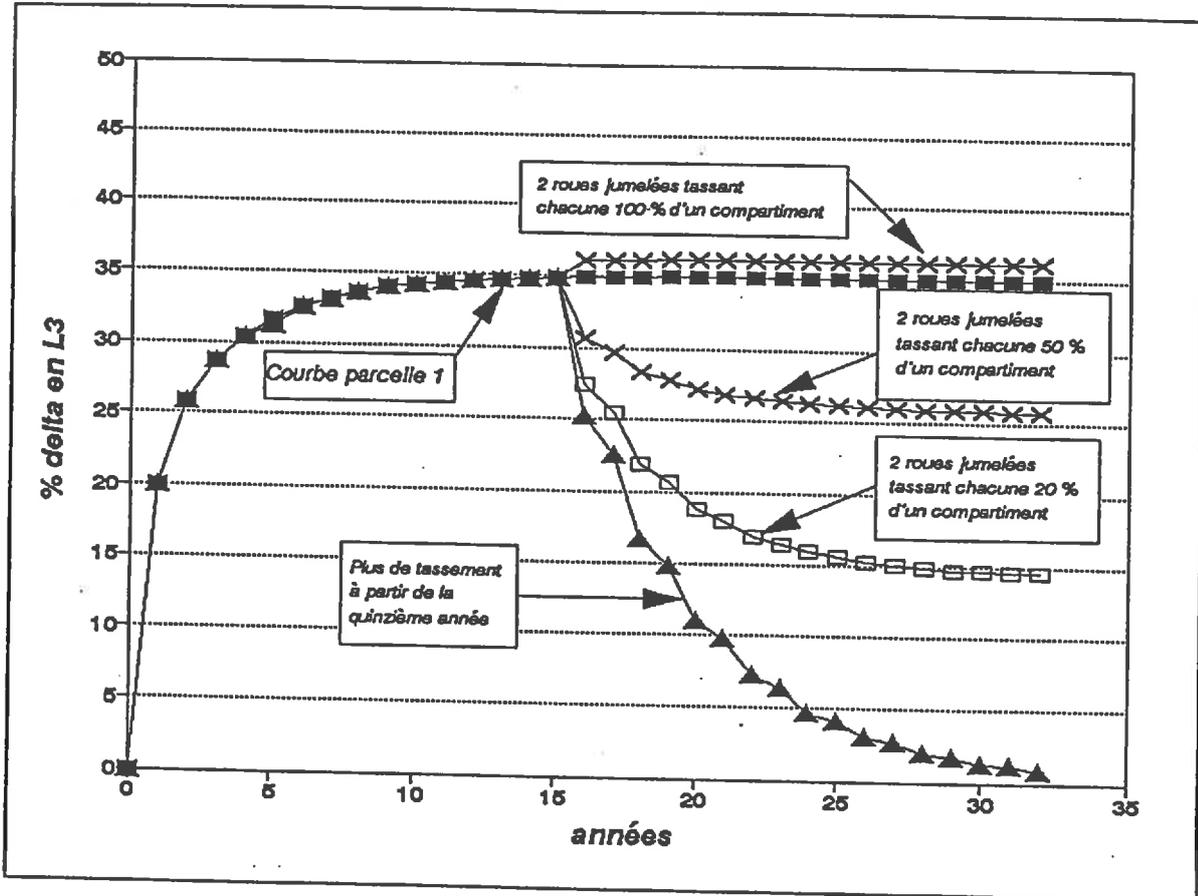


Figure II-21 : Comparaison de trois scénarios de réduction du tassement de la position L1 sur l'évolution de l'indicateur teneur en Δ de L3

Lorsque le tassement est interrompu la quinzième année, on constate que la teneur moyenne en Δ décroît exponentiellement. La sixième année après le changement, la teneur est inférieure à 10 %, il faut 9 ans pour passer sous le seuil des 5 %. Cette durée de vie apparaît longue, même si l'on manque de références précises sur la persistance des éléments d'état interne Δ dans le profil. On peut penser toutefois que les conditions de simulation (en particulier la répartition homogène du Δ au sein des compartiments) ne sont pas très appropriées au test de l'hypothèse, et maximisent cette durée de vie. Nous reviendrons donc sur ce point dans la troisième partie, en utilisant un mode de simulation qui tienne compte de la répartition du Δ au sein de la couche labourée.

Lorsque les roues du tracteur ne tassent que 20 % du volume total des compartiments de L1, la valeur à l'équilibre diminue fortement, passant de 35,03 à 14,57 %.

Le résultat obtenu avec la troisième hypothèse de limitation du tassement est intéressant à considérer dans la mesure où l'on observe qu'en maintenant constante la quantité de Δ globalement créée dans le profil, tout en modifiant la répartition entre compartiments, on diminue sensiblement la valeur d'équilibre mesurée dans la position L3, qui passe de 35,03 à 25,85 %.

Avec le dernier scénario envisagé (roues jumelées mal réglées), la valeur à l'équilibre en L3 est très peu modifiée : les deux compartiments tassés étant contigus, une partie de transferts s'effectue entre eux, au sein de la position L1, et seul un compartiment de L1 (alternativement à droite et à gauche de la position, suivant le sens de versement du labour) participe à l'enrichissement de L3.

Ces observations renvoient au critère qu'il faut prendre en compte pour juger des conséquences sur la production végétale du changement technique adopté. Ce jugement doit en effet tenir compte de la teneur globale de la couche labourée. Celle-ci doit être calculée en tenant compte des proportions respectives des volumes occupés par les différents compartiments de L1 et L3 (Gautronneau & Manichon, 1987). En d'autres termes, il faut calculer les moyennes pondérées par les volumes occupés par les différents compartiments. En comparant les situations avec et sans roues jumelées telles qu'elles ont été simulées, et en tenant compte de la modification du motif qu'entraîne l'adoption de cet équipement, on obtient le tableau suivant :

	Teneur moyenne		Proportion de		Moyenne pondérée pour l'ensemble du profil
	L1	L3	L1	L3	
Sans roues jumelées	100	35,03	1/5	4/5	48,02
Avec roues jumelées					
- Cas 1	100	36,20	2/6	4/6	57,47
- Cas 2	79,20	25,85	2/6	4/6	43,63
- Cas 3	49,62	14,57	2/6	4/6	26,25

Cas 1 : 2 roues jumelées tassant chacune 100 % d'un compartiment de L1

Cas 2 : 2 roues jumelées tassant chacune 50 % d'un compartiment de L1

Cas 3 : 2 roues jumelées tassant chacune 20 % d'un compartiment de L1

Tableau II-6 : Estimation de la teneur en Δ sur l'ensemble du profil, pour les différents scénarios de limitation du tassement.

On constate qu'avec ce mode de calcul, la situation correspondant au mauvais réglage des roues jumelées (cas 1) une teneur globale sur l'ensemble du profil nettement plus élevée que les autres. Le second cas (limitation du tassement à 50 % des compartiments de L1) donne une valeur globale légèrement inférieure à la situation correspondant au tracteur sans roues jumelées. Enfin, lorsque le tassement ne concerne que 20 % des compartiments de L1, l'effet des roues jumelées est très net.

Rappelons toutefois qu'un critère uniquement basé sur la proportion d'éléments d'état interne Δ tel qu'il vient d'être calculé n'est pas à lui seul suffisant pour juger de la qualité de l'état structural vis-à-vis de la production végétale. La répartition des éléments au sein du profil, le calibre des mottes, doivent également être pris en compte.

Au-delà de ces observations sur l'intérêt et les limites de l'indicateur proposé, ces exemples montrent les possibilités d'utilisation de ce modèle très simple pour étudier l'effet de changements techniques. Ils font apparaître que, dans certains cas, l'adoption de nouvelles machines peut s'accompagner d'effets indésirables. C'est le cas de l'approfondissement du labour, lorsque l'horizon sous-jacent possède une structure dégradée ; on voit qu'il faut, pour raisonner l'opportunité d'un tel approfondissement, ajouter aux aspects souvent évoqués de dilution de la matière organique, ou de coût énergétique, celui de la modification de l'état structural et ses répercussions sur la qualité du lit de semence, l'implantation du système racinaire, la circulation des fluides dans le profil. Si cet effet s'estompe en quelques années, ce changement conduit à une situation temporairement plus défavorable, *a priori*, que le système antérieur.

L'adoption d'outils de grande largeur se traduit par une augmentation de la variabilité spatiale de l'état structural du profil. Cet élément n'est pas toujours pris en compte dans le raisonnement de l'équipement d'une exploitation, où l'on privilégie surtout les aspects économiques (réduction des temps de travaux) ou l'intérêt de semis réalisés plus précocement grâce au gain de temps réalisé. Il est vrai que ces changements sont souvent accompagnés par l'utilisation de dispositifs permettant de réduire les risques de tassement. Les simulations réalisées, pour simples qu'elles soient, indiquent que l'effet sur la teneur moyenne en Δ de la position L3 d'une limitation du tassement en L1 peut être notable, à condition bien sûr que les dispositifs adoptés (roues jumelées) soient correctement mis en oeuvre ; nous reviendrons sur ce point dans le dernier chapitre de ce travail, à partir d'enquêtes réalisées chez un groupe d'agriculteurs du Bassin Parisien.

Mais, avant d'aller plus loin et d'envisager l'utilisation du modèle dans ces conditions, plus proches de la réalité de la pratique agricole que ne le sont les parcelles expérimentales de Grignon, il nous faut revenir sur les principales simplifications faites dans cette première étape, pour en tester les effets sur les sorties du modèle. Ceci nous amènera à perfectionner certains aspects de son fonctionnement.

TROISIEME PARTIE :

**ANALYSE CRITIQUE DES HYPOTHESES DE LA MODÉLISATION,
PERFECTIONNEMENT ET TEST DU MODELE**

CHAPITRE I :
ÉTUDE DE SENSIBILITÉ ET PERFECTIONNEMENT
DU MODELE

1. INTRODUCTION

Les simulations présentées dans la partie précédente ont montré que le modèle permettait de prévoir avec précision la teneur à l'équilibre moyenne de la position L3 des parcelles expérimentales de Grignon. Ce résultat, confortant nos hypothèses sur le déterminisme de l'évolution de l'état structural de la couche travaillée de parcelles régulièrement labourées et le choix de l'indicateur de l'effet à long terme des systèmes de culture, nous autorisait à tester par simulation l'effet de changements techniques sur l'état structural observé en L3 à l'équilibre.

Cependant notre modèle permet également de calculer les teneurs dans les différents compartiments qui composent la position L3, et l'on a pu noter que ces teneurs sont, dans les conditions de simulation des parcelles 1 et 2, très variables de l'un à l'autre ; cette variabilité avait été observée sur le terrain, mais elle apparaît mal prédite dans nos simulations. Cette observation appelle une étude plus détaillée de la façon dont on a modélisé les transferts de Δ entre compartiments.

D'autre part, les calculs de l'annexe 4 montrent la forte sensibilité du modèle compartimental au taux de disparition du Δ , fixé par le paramètre "r". Cette sensibilité est probablement due au fait que l'on maximise la disparition en appliquant le taux de disparition de manière uniforme à l'ensemble du Δ de la position L3. Il nous faudra tenter de la réduire en introduisant des règles de disparition plus réalistes, tenant compte de la répartition spatiale du Δ au sein de la couche labourée.

Plus généralement, tout modèle est, par définition, une simplification de la réalité et repose sur un certain nombre d'hypothèses dont certaines sont rendues nécessaires par l'écriture même de sa forme mathématique. La structure de notre modèle nous amène à distinguer 2 groupes d'hypothèses :

- *Celles relatives aux "entrées-sorties" de Δ dans le système :*

- . création de 100% de Δ dans le compartiment de L1 et lors de la récolte du maïs, au droit des passages de roues ;
- . pas de création lorsque les récoltes ont lieu en été ;
- . pas de diminution de Δ durant le labour ;
- . disparition totale du Δ , par contre, lors des reprises de labour, dans l'horizon H1 ;

Ces hypothèses ont été discutées dans le premier chapitre. Le point principal sera, on le verra dans le deuxième chapitre de cette partie, celui de la création de Δ . Le manque de connaissances suffisamment précises sur l'effet au champ d'un roulage posera problème lorsqu'il s'agira d'adapter le modèle dans des conditions plus proches de la réalité de la

pratique agricole que celles de Grignon. Dans ce cas limite en effet, (et cela rejoint tant les données bibliographiques que toutes les observations réalisées sur ce dispositif), c'était la répétition de nombreux passages au même endroit qui nous assurait de la création de Δ tous les ans dans les positions L1.

- *Celles qui concernent les transferts de Δ entre compartiments de la couche labourée :*

. la coïncidence entre le compartimentage et le découpage des horizons effectué par la charrue ;

. le modèle de retournement lors du labour (en particulier l'hypothèse de non déformation de la bande de terre lors de son retournement) ;

. la répartition uniforme du Δ au sein de chacun des compartiments (qui entraîne l'hypothèse de transferts proportionnels à ceux des volumes de terre ainsi d'ailleurs que l'application d'un taux de disparition uniforme à l'ensemble du Δ d'un compartiment) ;

Dans ce chapitre, nous testerons la sensibilité du modèle sur ces trois derniers points. Dans un premier temps, *nous conserverons la technique de simulation sur tableur*. En effet, la prise en compte d'un décalage entre compartimentage et découpage par la charrue et le perfectionnement du modèle de retournement des bandes de terre lors du labour se traduisent, au plan mathématique, par une modification des coefficients de transfert qu'il est aisé de programmer sur tableur.

Par contre, l'étude du troisième point nous amènera à *changer de technique de simulation*. Par construction, la formalisation mathématique que nous avons jusqu'alors retenue repose sur l'hypothèse d'une *répartition homogène du Δ au sein de l'horizon A_p* . Afin de prendre en compte une disparition localisée en surface seulement, nous proposerons une technique de simulation basée sur un découpage des bandes de labour en unités élémentaires de 2 x 2 cm. Chaque unité est affectée de la modalité Δ ou non Δ selon sa situation par rapport aux volumes compactés ; son déplacement lors du labour est calculé grâce à l'application des modalités de retournement et de déformation des bandes de terre que nous avons introduites dans le modèle. Ceci nous permettra de situer la disparition de Δ au seul horizon de surface, en forçant à l'état non Δ toutes les unités élémentaires de l'horizon H1, ce qui est plus réaliste vis-à-vis des processus réels d'évolution de la structure. Nous conserverons cette technique pour étudier l'effet d'une variation aléatoire de la profondeur de reprise.

2. COINCIDENCE ENTRE LE COMPARTIMENTAGE DE L'HORIZON ET LE DECOUPAGE REALISE PAR LA CHARRUE

Il est difficile de penser qu'au champ, il puisse y avoir superposition exacte de chaque compartiment avec une bande de terre découpée par la charrue, comme nous l'avons supposé dans la partie précédente. Il nous faut donc analyser l'effet d'un décalage de la position du coutre (qui découpe verticalement la bande de terre) par rapport aux limites (verticales) entre compartiments qui, elles, sont fixes, et servent de repère.

Lorsque, partant d'une superposition stricte, on décale progressivement par rapport à ce repère la position du bord vertical des bandes de terre découpées par la charrue, on constate graphiquement (figure III-1), que l'on obtient une modification de la répartition de la terre dans les compartiments après retournement. Considérons la terre d'un compartiment "i" dont on analyse le devenir après action de la charrue. On distingue quatre types de configurations possibles, que l'on peut relier aux valeurs de décalage, mesurées par la distance OC de la figure III-1 :

* **Configuration 1** : une partie (a) de la terre du compartiment i (celle à gauche du passage du coutre) reste dans ce même compartiment ; le reste du volume retourné (partie à droite de la verticale marquant le passage du coutre) est balancé vers le compartiment adjacent (b) et le suivant (c).

* **Configuration 2** : la fraction de terre à gauche de la ligne de passage du coutre est plus importante ; si une partie de cette fraction reste, après labour, dans le compartiment d'origine (a), l'autre partie (b) est déportée par la charrue dans le compartiment "i + 1". Le reste de la terre du compartiment "i" (c) est projeté, comme précédemment, en "i + 1" et "i + 2".

* **Configuration 3** : identique au cas précédent pour ce qui concerne la partie à gauche de la ligne de passage du coutre (a) et (b), mais l'autre partie de la bande de terre (c) est, dans ce cas, projetée plus loin, en "i + 2" et "i + 3".

* **Configuration 4** : dans ce cas de figure, le déport latéral est maximal : il n'y a plus de terre du compartiment "i" restant dans ce même compartiment. Par contre la partie située à droite de la ligne de passage du coutre (c) est déportée vers les compartiments "i + 2" et "i + 3".

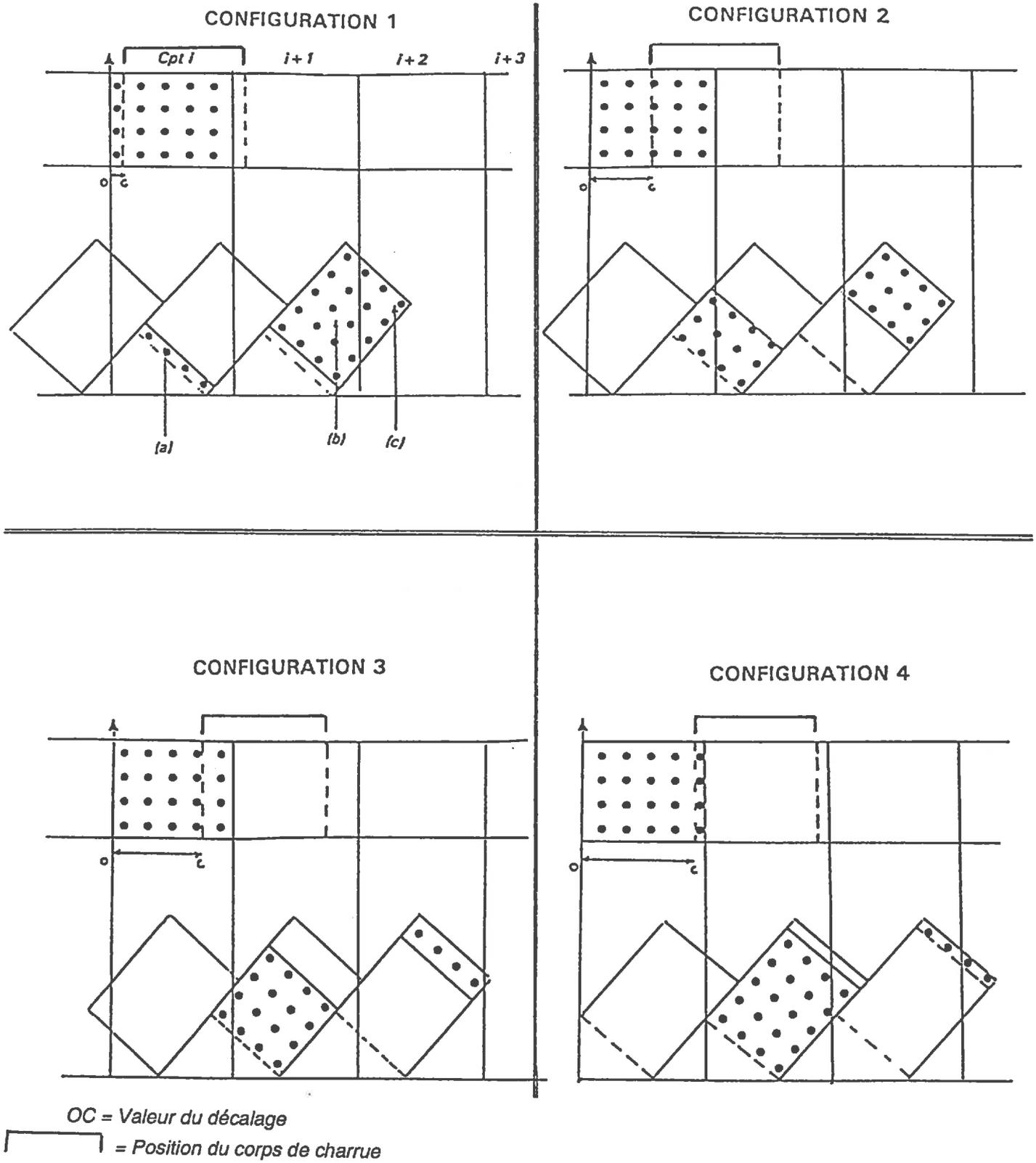


Figure III-1 : Modifications de la configuration après déport latéral par la charrue quand on décale la position de celle-ci par rapport au compartimentage

C'est donc ici la dynamique du mélange entre compartiments qui est affectée par ces décalages progressifs. Il nous faut en rendre compte dans le modèle en considérant que : a% d'un compartiment y reste après labour, que b% est déporté dans le compartiment adjacent, que c% passe en "i + 2", et que d% [d = 1-(a+b+c)], est projeté en "i + 3". Par rapport au modèle de déport utilisé jusqu'ici, la prise en compte du décalage amène donc à considérer deux coefficients de transfert supplémentaires : "a" et "d".

Les valeurs de ces coefficients ont été calculées en fonction du décalage, en procédant à une analyse géométrique des différentes configurations présentées à la figure III-1. On a ainsi estimé les valeurs de chaque quadruplet (a, b, c, d,) pour 21 valeurs de décalage (de 0 à 33,3 cm, par pas de 1,7 cm). Les résultats obtenus ont été portés à la figure III-2, et quelques valeurs caractéristiques correspondant aux quatre configurations présentées ont été reportées au tableau III-1. On constate que la valeur de d reste toujours très faible : nulle de 0 à 22,5 cm, inférieure à 10% pour les décalages supérieurs. La fraction de la bande restant dans le compartiment d'origine (a), par contre, est plus importante (excédant 20% pour un décalage de 12 cm environ).

Quant aux valeurs de "b" et "c", elles varient beaucoup avec le décalage, mais en sens inverse : on peut donc s'attendre à ce que ces variations se compensent lorsque l'on prend en compte l'ensemble des compartiments de la couche travaillée.

Etudions tout d'abord la sensibilité du modèle à ces modifications des paramètres de transfert en supposant que le décalage introduit est constant d'une année sur l'autre et en nous plaçant dans des conditions de simulation correspondant au système de culture de la parcelle 1.

Au plan mathématique, cela revient à modifier les coefficients de la matrice de transfert de l'équation d'état, qui s'écrit, en se plaçant dans les conditions de la configuration 4 (en considérant que la concentration d'un compartiment dépend de la sienne propre et de celle de ses trois voisins), pour un labour droite :

$$X_{t+1} = (1-r) * \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & a & 0 & d & c \\ c & b & a & 0 & d \\ d & c & b & a & 0 \\ 0 & d & c & b & a \end{vmatrix} * X_t + \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Et pour un labour gauche :

$$X_t = (1-r) * \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & b & c & d \\ d & 0 & a & b & c \\ c & d & 0 & a & b \\ b & c & d & 0 & a \end{vmatrix} * X_{t-1} + \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

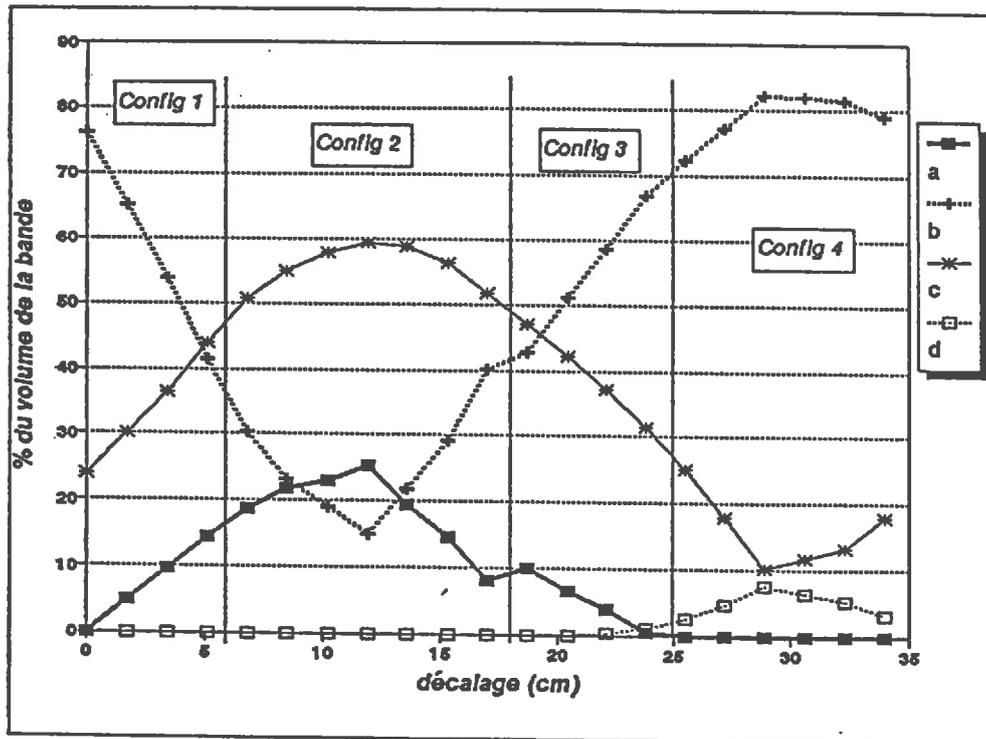


Figure III-2 : Valeurs de "a", "b", "c" et "d" quand le décalage varie (labour droite)

Décalage (cm)	Configuration	a %	b %	c %	d %
0	-	0	24	76	0
1,7	1	5	65	30	0
6,8	2	19	30	51	0
11,9	2	25	16	59	0
17	2	8	40	52	0
23,8	3	0,5	67	31	1,5
28,9	4	0	82	10	8
33,3	4	0	79	18	3

Tableau III-1 : Fractions du compartiment "i" projetées dans les compartiments adjacents pour les différentes configurations obtenues quand on décale la ligne du passage du coutre et le bord du compartiment (labour droite)

En programmant ces équations d'état sur un tableur, il est possible d'étudier les variations des valeurs à l'équilibre de chacun des compartiments de L3 en fonction du décalage (figure III-3). On constate, en comparant cette figure à la précédente, que les teneurs à l'équilibre de ces compartiments varient dans le même sens que les différents coefficients de transfert. Ce sont les teneurs des compartiments 2 et 3, les plus proches de L1 qui varient le plus (les valeurs sont présentées après un labour versant vers la droite), et en sens opposé. Les compartiments 4 et 5 présentent par contre des amplitudes de variation de teneur plus faible, ce qui est lié à leur plus grand éloignement de la "source" d'injection de Δ dans la position L3.

Globalement enfin, par le jeu combiné de ces variations, la teneur moyenne en L3, qui varie entre 35 et 42 %, est assez peu sensible aux variations du décalage(1).

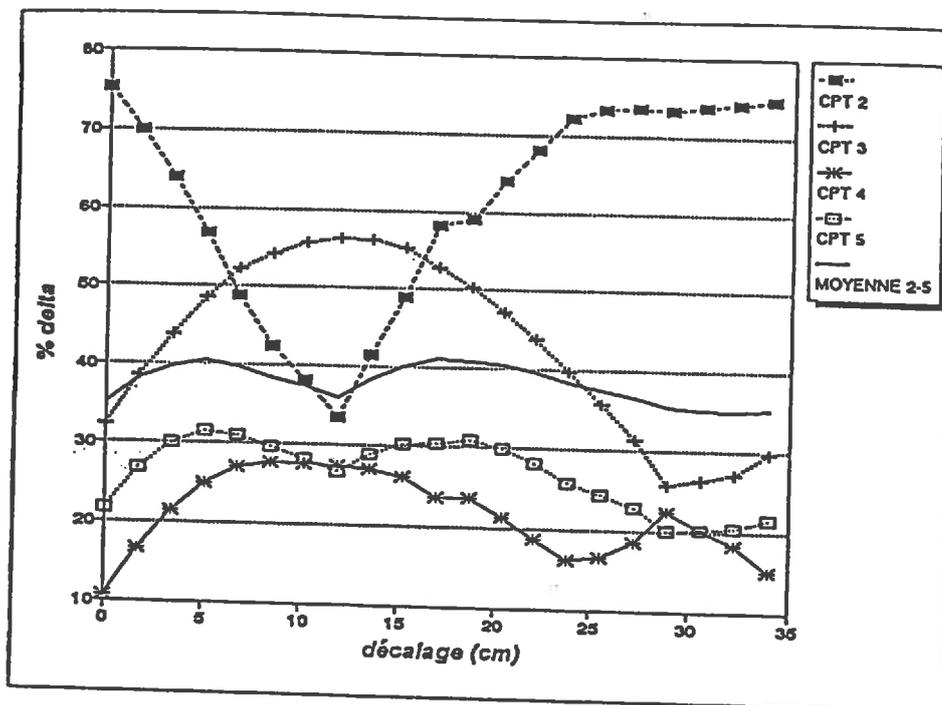


Figure III-3 : Valeurs à l'équilibre des quatre compartiments de L3 en fonction du décalage entre le compartimentage et le découpage par la charrue (même décalage appliqué tous les ans, valeur la 22ème année, après un labour droite)
La valeur de décalage indiquée en abscisse correspond à la distance OC de la figure III-1

1. Cette variation indique que l'on ne peut faire ici l'hypothèse d'une conservation du Δ lors des transferts au sein de L3 ; chaque année en effet, une partie du Δ de L3 est balancée par le labour dans le compartiment 1, avant que la teneur de ce dernier ne soit forcée à 100 %.

Si, dans une seconde étape, l'on fait, pour se rapprocher de conditions plus réalistes de fonctionnement, varier le décalage de manière aléatoire (en tirant au sort, tous les ans, un jeu de paramètres (a, b, c, d), on obtient les courbes d'évolution portées à la figure III-4, pour six exemples de tirages aléatoires. On observe une évolution moins régulière de l'indicateur, mais l'allure générale des courbes reste la même. La valeur d'équilibre, quand à elle, fluctue dans la même gamme que précédemment.

La structure de la répartition du Δ entre compartiments de L3 est par contre très sensible au décalage entre le passage de la charrue et les limites entre compartiments de L3. On a porté à la figure III-4b les valeurs simulées dans chacun des compartiments de L3, la 22ème année, après un labour versant vers la droite, pour six tirages aléatoires. On constate que, comme dans le cas précédent, les valeurs atteintes dans les compartiments 2 et 3 sont très variables, que celle obtenue dans le compartiment 3 peut dépasser la teneur du compartiment 2 (tirages 2 et 6). C'est la valeur observée dans le compartiment 5 qui apparaît la moins variable.

Ces résultats montrent que, si la valeur moyenne de la position L3 apparaît peu sensible à l'hypothèse d'une coïncidence entre le compartimentage et le découpage des bandes de terre par la charrue, la répartition du Δ entre compartiments dépend par contre beaucoup de ce découpage. Cela explique l'échec de la mise en correspondance de la distribution du Δ entre compartiments de L3 dans les parcelles du Centre expérimental de Grignon avec celle observée sur le terrain. Cette dernière résulte d'une modalité particulière de successions de découpages au fil du temps qu'il est impossible de reconstituer.

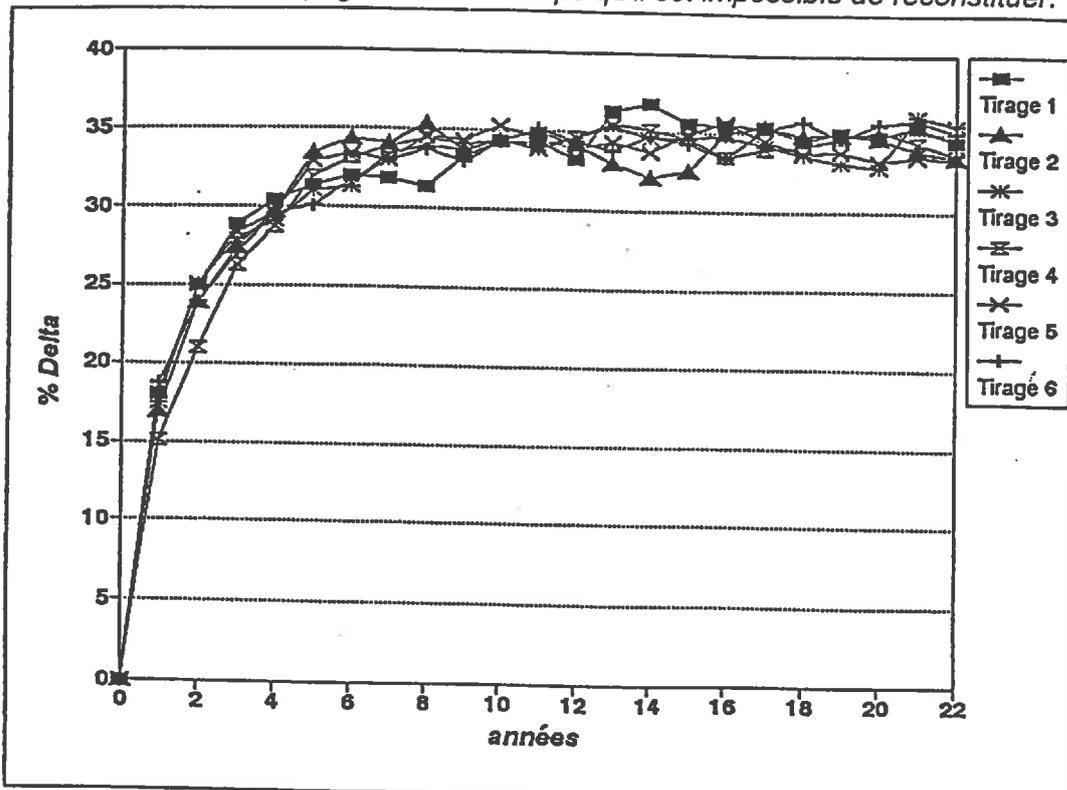
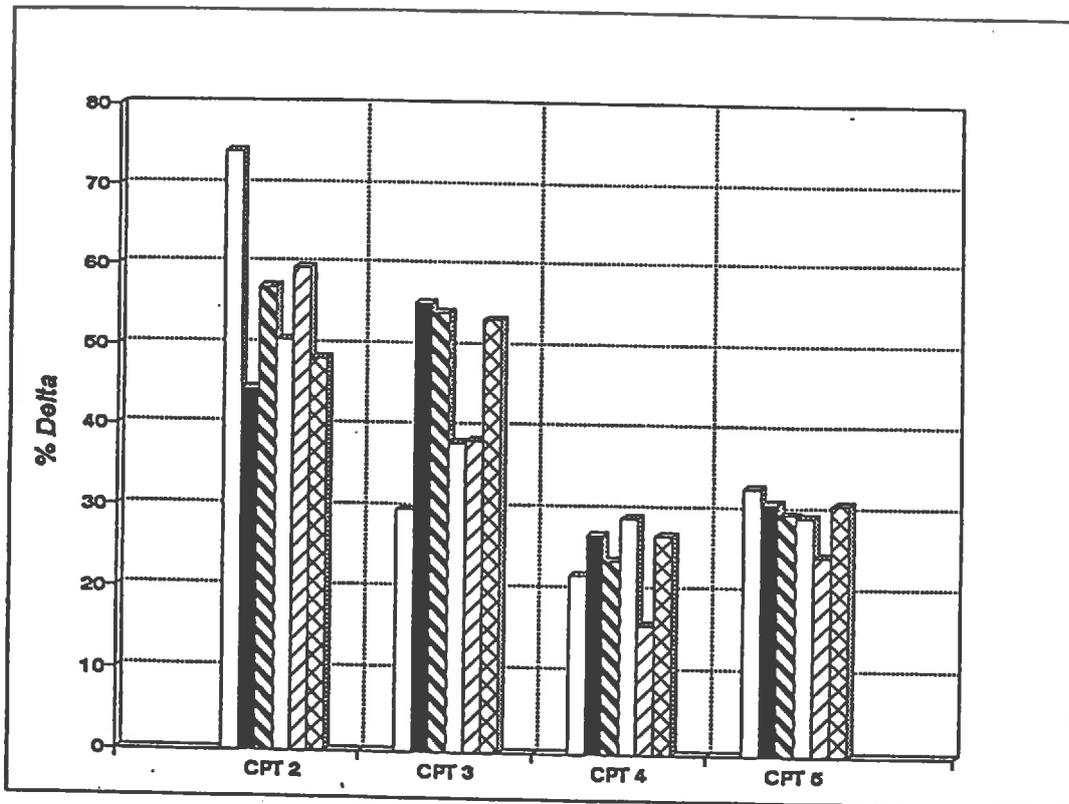


Figure III-4a : Evolution de la teneur moyenne en L3 pour six tirages aléatoires des valeurs de "a", "b" "c" et "d"



*Figure III-4b : Valeurs à l'équilibre des quatre compartiments de L3
(décalage tiré au sort tous les ans ; valeur la 22ème année, après un labour droite)*

3. ANALYSE CRITIQUE DU COMPORTEMENT DE LA BANDE DE TERRE LORS DU LABOUR ET PROPOSITION D'UNE NOUVELLE REPRESENTATION

Nous avons présenté plus haut (2ème partie, chapitre 2, § 2) le modèle utilisé pour rendre compte du mouvement de la bande de terre lors de son retournement par la charrue.

En fait, la critique majeure, que l'on peut faire à ce modèle, est qu'il suppose que la bande de terre est rigide et ne se déforme pas au cours de son retournement. Ce n'est, à l'évidence, pas le cas dans la réalité.

Ce modèle permet de calculer, pour une profondeur et une largeur de travail données, l'importance du déport latéral, mais aussi les positions du barycentre et du point de jetée maximale de la bande retournée. Il prévoit, en outre, la valeur de l'angle de la bande de terre avec l'horizontale après retournement. Nous nous proposons de **confronter ces valeurs prédites par le modèle à des valeurs observées sur le terrain** lors d'une expérimentation menée à Grignon dans le cadre d'un travail sur le labour (Coulomb, 1991).

Cette confrontation a pour premier objectif de mieux caractériser les modalités de la déformation de la bande de labour, afin de préciser la nature de la simplification que l'on fait en retenant le modèle classique, sans déformation.

Dans un second temps, nous utiliserons ces observations pour proposer un modèle de retournement qui prenne en compte une déformation de la bande de terre au cours de son trajet.

3.1. Présentation de l'expérimentation

Le site retenu pour cette expérimentation est une parcelle du domaine expérimental de Grignon présentant une texture de surface proche de celle des parcelles 1 à 4 étudiées précédemment (A = 26% ; L = 58% ; S = 16%). Le dispositif est décrit en détail dans la thèse de Coulomb (1991), nous n'en reprenons ici que les points essentiels.

L'objectif poursuivi était de créer une gamme de variation de l'état structural avant labour, puis de comparer les modifications de la structure obtenues par des passages d'une même charrue (bisoc 14 pouces), à différentes vitesses.

Les observations réalisées comprenaient une description morphologique de l'état structural avant et après labour, incluant une cartographie des bandes de labour pour chacun des traitements réalisés. Ce sont ces cartographies que nous utilisons pour évaluer *in situ* les variables caractérisant la géométrie des bandes de labour.

On a également mesuré sur le terrain, pour 10 passages de charrue (soit 10 couples de bandes de labour), la profondeur réelle de travail (p), et la largeur effectivement prise par la charrue bisoc (l). Ces valeurs de " p " et de " l " seront utilisées pour paramétrer le modèle de retournement. On a porté au tableau III-2 leur répartition selon les traitements expérimentaux mis en place.

<i>Etat initial avant labour</i>	Vitesse d'avancement du tracteur (km/h)		
	Lente >2.4 et <3.1	Moyenne >4 et <5.5	Rapide >6.5 et <7.7
<i>Non tassé (NT)</i>	2	4	4
<i>Tassé (T)</i>	4	2	4

Tableau III-2 : Répartition des 20 bandes de labour analysées au sein des traitement effectués à Grignon (I. Coulomb, 1991)

Enfin, chaque carte de profil correspondant à un passage de charrue a soigneusement été repérée par rapport à une règle graduée placée horizontalement au-dessus du sol. Cette mire a servi à définir une ligne horizontale de référence, le facteur d'échelle sur les photographies, ainsi que les distances relatives entre les différents points de la carte.

3.2. Méthode de caractérisation de la morphologie des bandes de labour (Caneill et al., 1992)

a. Préparation de la face d'observation

Sur une face verticale la plus plane possible, après avoir dégagé le fond de travail de la charrue, on a délimité les bandes de labour. Pour que cette opération soit la plus précise possible, de petits cubes de PVC colorés avaient été disposés à la surface du sol avant le passage de la charrue; se trouvant répartis, après le labour, dans les inter-bandes, ces cubes ont permis de matérialiser, sur la face d'observation, le contour des bandes par des fils de laine blanche facilement reconnaissables sur les photos. Par ailleurs, en cours de travail, on a également disposé des petits cubes d'une autre couleur en fond de raie, lorsque celle-ci était dégagée, afin de matérialiser le fond du labour.

Après préparation des faces d'observation au couteau et au soufflet faisant ressortir les éléments structuraux et les cavités, une procédure photographique a été mise en oeuvre produisant une image du profil qui a servi de support à un traitement informatique. L'ensemble des profils a été observé dans les deux semaines qui ont suivi le labour.

b. Procédure photographique

Afin de réaliser une copie aussi fidèle que possible de la face d'observation, le choix du matériel et des réglages a porté sur un objectif peu déformant de focale 50 mm, adapté à un appareil Reflex OLYMPUS OM1, et un réglage fixe de la profondeur de champ et de la vitesse. Les photos ont été prises tous les 6,5 cm, suffisamment rapprochées pour pouvoir n'en exploiter que le centre afin de limiter les déformations en bordure d'image. Enfin, on a veillé à respecter le parallélisme entre les plans de la pellicule et du profil.

c. Analyse des photos au laboratoire

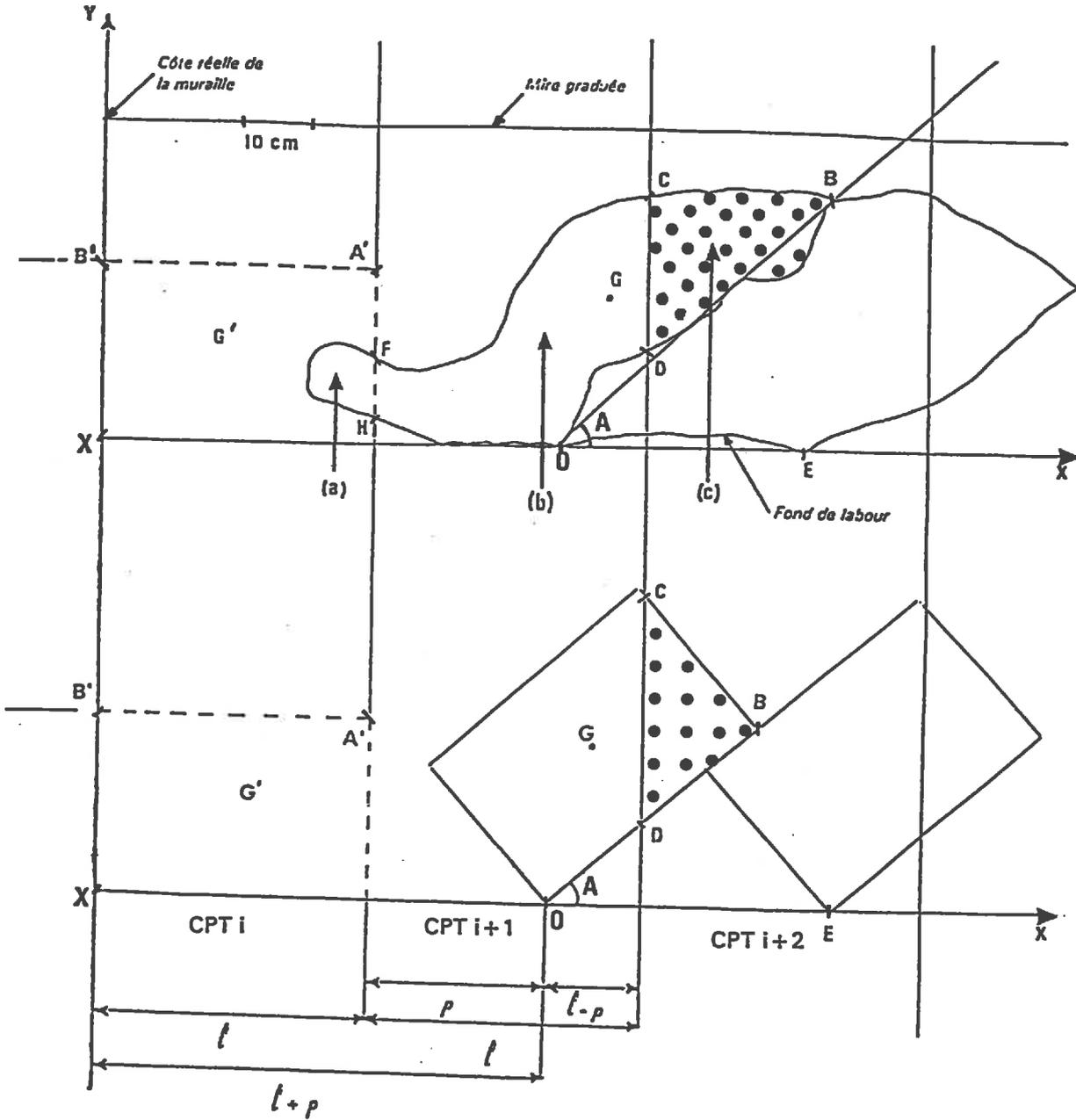
Les photos ne sont pas analysées directement par traitement informatique de l'image, mais décalquées sur un transparent, après observation stéréoscopique de leur partie centrale ; les contours figurant sur le transparent et l'échelle ont ensuite été recopiés en noir sur une feuille blanche à l'aide d'une pointe tubulaire d'épaisseur (0,7 mm) choisie de manière à avoir une largeur des traits constante après acquisition vidéo.

L'image est acquise à l'aide d'une caméra vidéo CCD, générant un signal de tension analogique numérisé en une image 512 X 512 pixels et 256 niveaux de gris. En collaboration avec J. Caneill et I. Coulomb, nous avons mis au point une procédure de traitement de ces images, à l'aide du logiciel PC-SCOPE, décrite en détail dans Coulomb (1991).

Les calculs d'erreur effectués donnent aux valeurs mesurées une précision de l'ordre de 5%.

Chaque image traitée correspond à un passage de charrue, soit deux bandes de labour. Pour chacune d'elles, ce traitement permet d'évaluer :

- sa surface,
- la position du barycentre et du point de jetée maximale,
- l'angle de l'interbande avec l'horizontale.



Légende :

O = Point de pivotement ; B = Point de jetée maximale ; G = Barycentre de la bande.
 O', B', G' = Positions de O, B et G avant retournement
 l = Largeur de travail ; p = Profondeur de travail
 CPT = Compartiment

Figure III-5 : Schéma du principe de l'analyse des bandes de labour

3.3. Procédure d'évaluation de ces paramètres sur les images de profils réalisées au champ

Sur le schéma de la figure III-5, sont présentés les différents points qui permettent de réaliser ces mesures, pour une image correspondant à l'un des traitements de l'expérimentation et pour le modèle.

L'évaluation de la surface de la section la bande suppose que soit défini correctement le contour de la bande de terre. Pour ce qui est du positionnement de l'interbande et du fond de labour, les cubes de PVC disposés avant le passage de la charrue (Cf. *supra*) permettent une bonne définition de leurs contours. Par contre, pour définir la surface au contact de l'atmosphère, le positionnement de la limite est plus délicat, la surface après labour étant particulièrement irrégulière. Nous avons adopté une règle conventionnelle qui consiste à définir cette limite par le tracé successif des tangentes aux éléments structuraux (mottes et terre fine) situés au contact de l'air extérieur.

Le contour une fois défini, on évalue, à l'aide du logiciel de traitement d'image, la surface totale de la bande ainsi que les aires a, b et c correspondant respectivement aux fractions de la bande restant dans le compartiment d'origine (i), projetée en "i + 1" et projeté en "i + 2".

On peut également évaluer les positions du barycentre et du point de jetée maximale. Les coordonnées de ces deux points sont déterminées au sein d'un repère constitué par la droite verticale passant au niveau de la muraille et la droite horizontale passant sur le fond de labour ; pour ce dernier axe, le fait que le fond de labour réel ne soit pas rigoureusement horizontal pose un problème de tracé ; nous avons adopté la convention de le tracer parallèlement à la mire et passant par le point le plus bas du fond de labour dessiné.

Enfin, l'angle de la bande avec l'horizontale est mesuré à partir de l'angle des droites XE et OB. En effet, et ce problème est similaire à celui rencontré pour le tracé de l'axe horizontal, nous sommes obligé de prendre une convention : elle consiste à tracer une droite entre le point de jetée maximale et le point O, telle que $XO = l + p$ (O est le point théorique de pivotement).

3.4. Valeurs calculées

Ces mêmes paramètres sont calculés sur le dessin correspondant au modèle classique de retournement. Celui-ci est dessiné à la même échelle que l'image du profil, en utilisant les mesures faites sur le terrain de la profondeur et de la largeur de travail (valeurs de "p" et de "l"), ainsi que de la cote de la muraille.

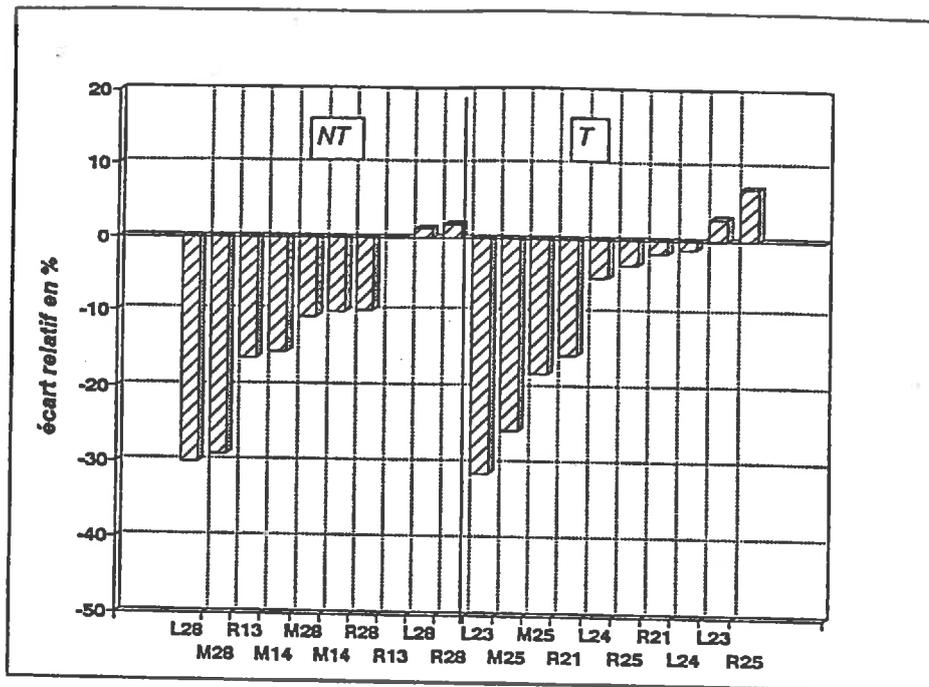


Figure III-6 : Ecart relatif entre modèle et image. Surface totale de la bande
(Classement par écarts croissants)

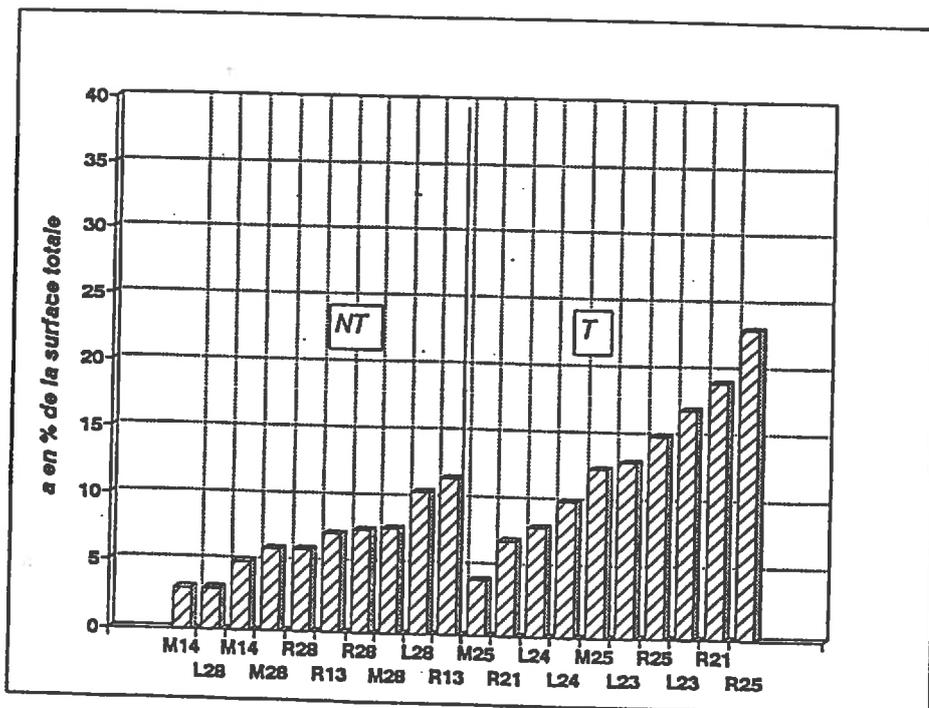


Figure III-7 : Valeurs de "a" mesurées
(Classement par écarts croissants)
Les lettres L, M et R désignent respectivement
les vitesses Lente, Moyenne et Rapide des traitements (Cf. Tableau III-3)

3.5. Résultats et discussion

a. Section des bandes de labour

On a porté à la figure III-6 l'histogramme des écarts entre modèle et image pour la surface de la section de la bande de terre. La valeur théorique est le produit de la profondeur par la largeur de travail. Les écarts avec les valeurs mesurées sur les images sont exprimés en valeur relative (valeur théorique - valeur mesurée)/valeur théorique. On constate que les écarts sont pratiquement tous négatifs : la bande de labour se déforme dans le sens d'une augmentation de son volume global, il y a **foisonnement**. Cette augmentation de volume peut atteindre 30%, elle est de 10% en moyenne, sur les 20 bandes étudiées. On ne note pas sur cet échantillon de différence entre les traitements tassés et non tassés.

Coulomb (1991) montre que l'on doit attribuer ce foisonnement :

- à une augmentation de l'espace poral macroscopique (vides de plus de 1 cm) dans les traitements tassés,
- à une augmentation de la porosité des éléments structuraux d'état interne gamma et des assemblages de terre fine dans les traitements non tassés.

Ce résultat nous incite à comparer par la suite, non pas les valeurs absolues (en cm^2), mais les proportions de surface projetées dans les différents compartiments exprimées en pourcentage du volume total de la bande.

Pour se conformer aux notations utilisées dans le modèle mathématique, nous noterons :

- "a" le pourcentage de la surface totale qui reste dans le compartiment d'origine,
 - "b" la proportion de la surface projetée dans le compartiment voisin "i + 1",
 - "c" la valeur correspondant à la fraction projetée en "i + 2".
- la valeur de "d" (fraction projetée en "i + 3") est toujours nulle dans les images étudiées.

b. Fraction de la bande restant dans le compartiment d'origine (compartiment "i")

Cette fraction correspond à la terre qui est, soit retombée en fond de raie, soit passée par dessus le bord du versoir au cours du labour. Le modèle ne prenant pas en compte la déformation de la bande, la valeur prédite de "a" est nulle.

Ces retombées concernent de 3 à 12 % de la section de la bande en NT, de 3 à 25% en T (figure III-7) ; on ne note pas d'effet de la vitesse d'avancement. On remarque également une plus forte dispersion des valeurs dans les situations tassées.

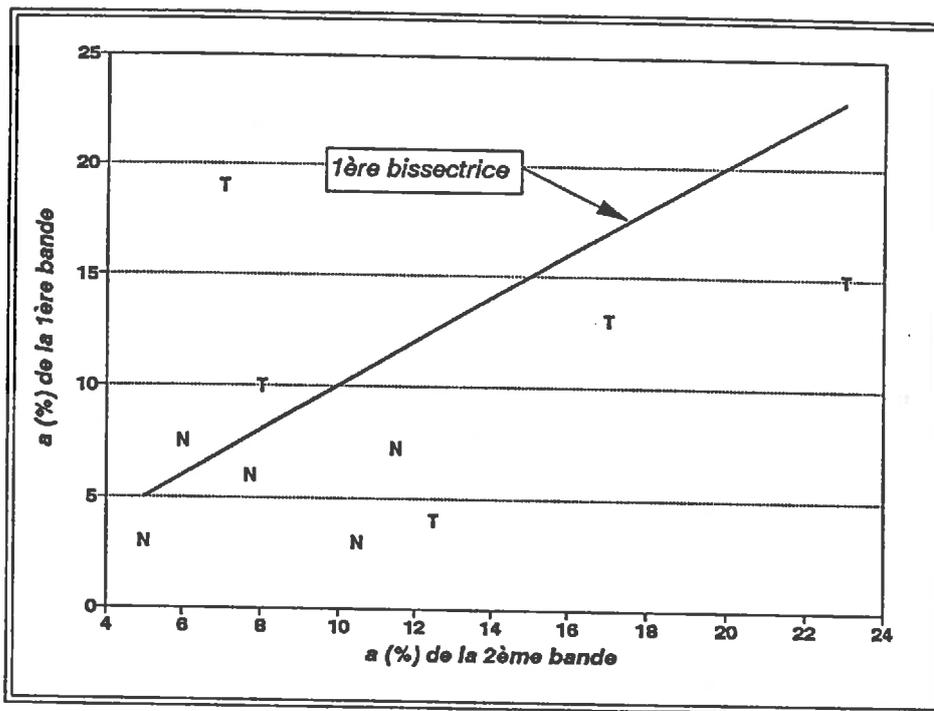


Figure III-8 : Valeurs de "a" - Comparaison des bandes 1 et 2

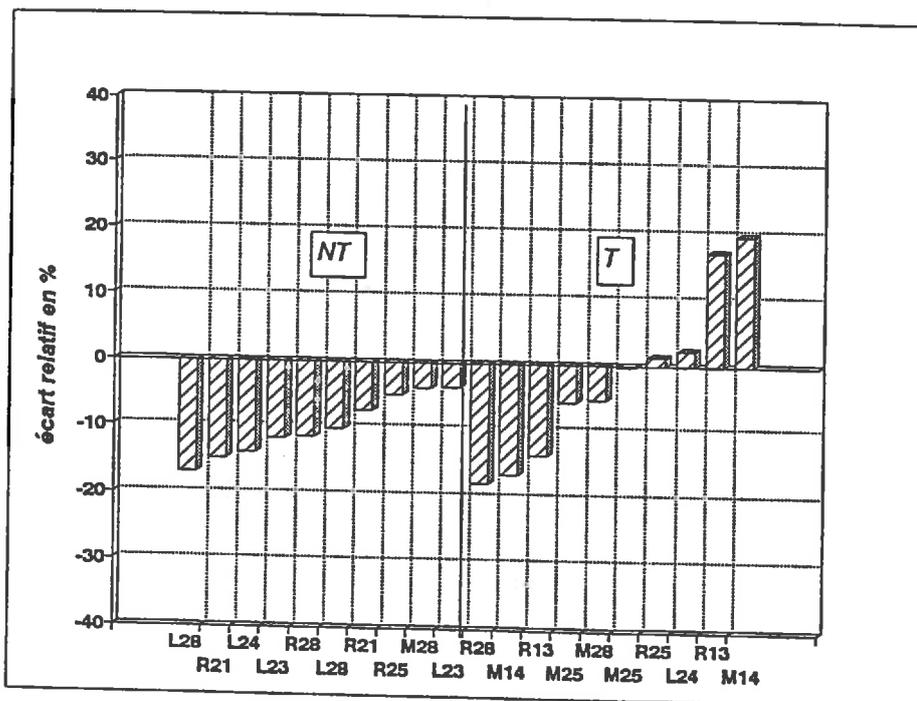


Figure III-9 : Ecart relatif entre modèle et image. Valeurs de "b"

La moyenne des valeurs observées sur les 20 bandes analysées est de 9,8% de la surface totale de la bande pour l'ensemble des situations étudiées ; elle est de 6,7% seulement en non tassé, et de 12,8% dans les traitements tassés.

Pour analyser le phénomène de retombée de la terre en fond de raie au cours du labour, il convient de remarquer que les deux bandes de terre retournées par la charrue bisoc ne sont pas de même nature :

- l'une d'elles repose sur la terre retournée lors du passage précédent et a très vite été recouverte par la bande suivante lors du passage de la charrue. Elle correspond au premier corps de la charrue (bande de droite sur la figure III-5).

- l'autre est située au contact de la roue de raie ; elle présente un flanc libre, et correspond au second corps de la charrue (bande de gauche sur la figure III-5).

Ceci n'est pas sans conséquences sur les déformations de la bande lors du retournement et après passage de la charrue :

- la présence d'un flanc libre sur la seconde bande facilite les retombées de terre en fond de raie, entre deux passages successifs de la charrue,

- la roue de raie du tracteur peut mordre sur cette bande lors du passage suivant, et peut également écraser la terre tombée en fond de raie.

On s'attend donc à ce que la valeur de "a" soit plus importante pour la seconde bande que pour la première. On le constate en effet dans 7 des 10 couples de bandes étudiés (figure III-8), la valeur de a n'étant nettement supérieure sur la première bande qu'une seule fois.

c. Fraction de la bande projetée dans le compartiment voisin ("i+1")

On a porté sur l'histogramme de la figure III-9 les écarts relatifs⁽¹⁾ entre le modèle et les images analysées. Les écarts au modèle sont :

- dans les situations **non tassées** : négatifs dans tous les cas, et compris entre -3 et -19%,

- dans les situations **tassées** : positifs 4 fois sur 10, mais beaucoup plus variables (de -20 à +21%).

Le modèle sous-estime les valeurs de "b" en situations Non Tassées, la prédiction n'est pas bonne en situations Tassées.

1. Comme précédemment, on calcule la valeur (modèle - image)/modèle.

d. Fraction de la bande projetée dans le compartiment jouxtant le compartiment voisin de celui d'origine (compartiment "i + 2")

Les écarts relatifs entre modèle et image sont présentés à la figure III-10. Il apparaît :

- en **Non Tassé**, une surestimation systématique de la valeur de c par le modèle, de +23 à +63%, en valeur relative.

- en **Tassé**, un écart positif 9 fois sur 10, par ailleurs beaucoup plus important qu'en non tassé, atteignant même 100% dans deux situations pour lesquelles le déport latéral est tel que l'on n'observe pas de projection au-delà du compartiment adjacent à celui d'origine. Les écarts relatifs varient ici de -67 à +100%.

La moyenne des valeurs de "c" observées est de 9,9% en Non Tassé, et de 11% dans les situations Tassées (en pourcentage du volume total de la bande de terre). Le modèle proposait, dans ces situations, 19,6%.

Pour le paramètre "c", on observe une sur-estimation de la valeur prédite par le modèle. Dans ce cas également, la prédiction par ce dernier est moins bonne dans les situations Tassées.

e. Position du barycentre

Sur la figure III-11, on a porté en abscisse et ordonnée les valeurs mesurées sur l'image (**I**) et estimées par le modèle (**M**) (plusieurs points notés M sont confondus car, pour un même couple (profondeur/largeur de travail), le modèle prévoit une même position du barycentre).

On constate que le modèle surestime nettement l'abscisse et l'ordonnée du barycentre. Il n'existe pas, par ailleurs, d'effet systématique de la vitesse ou de l'état initial sur cet écart.

Sur les bandes de terre analysées, le barycentre occupait une position *plus basse* que ne le laissait prévoir le modèle.

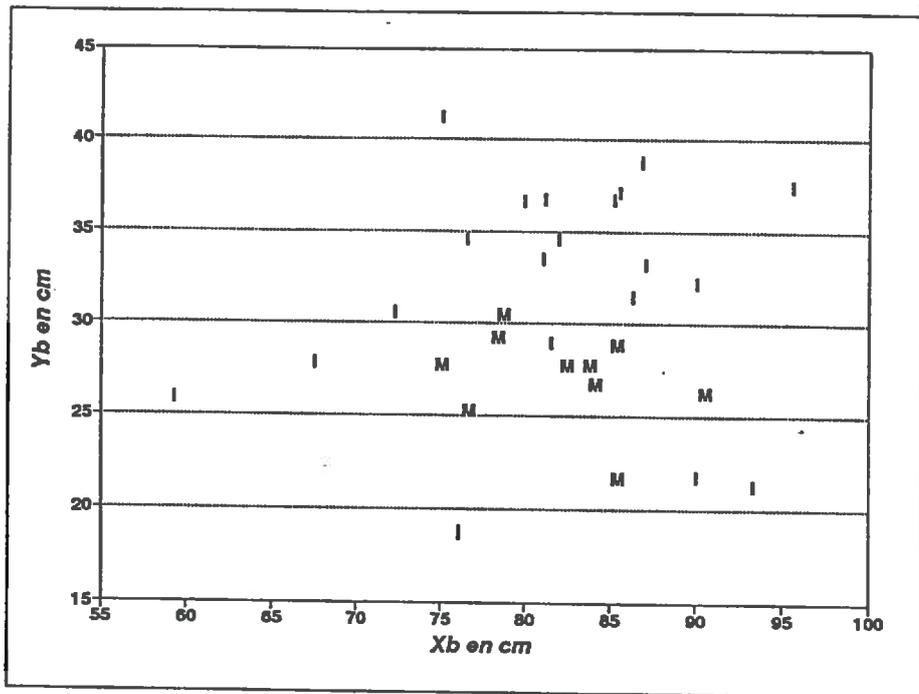


Figure III-12 : Ecart entre modèle et image. Position du point de jetée maximale
 I = Positions mesurées sur les bandes étudiées ; M = Valeurs prévues par le modèle

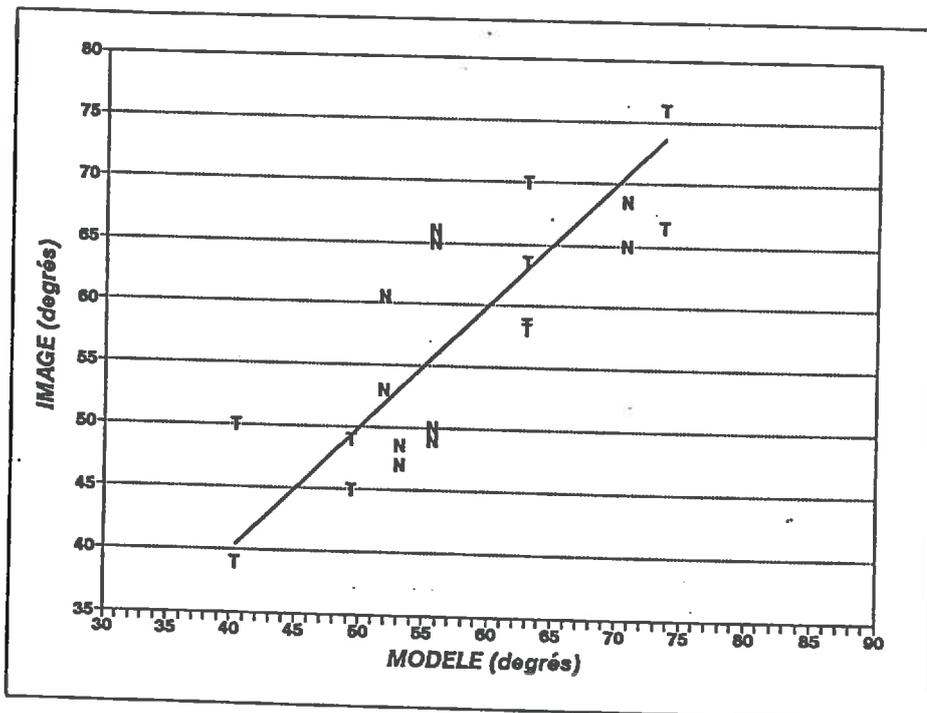


Figure III-12 bis : Ecart entre modèle et image. valeur de l'angle A

f. Position du point de jetée maximale

Par contre la prédiction par le modèle de la position du point de jetée maximale (PJM) ne laisse pas apparaître de sur-estimation systématique (figure. III-12), même si la dispersion des points est importante. Ici également, ni la vitesse ni l'état initial ne jouent de façon systématique sur l'écart au modèle.

g. Angle de la bande avec l'horizontale

Les résultats sont présentés à la figure III-12 bis, où l'on constate que la prédiction de la valeur de cet angle est correcte, en situations Tassées et Non Tassées.

h. Conclusion

Le tableau III-4 résume les performances du modèle utilisé pour prédire le déplacement de la bande de terre au cours du labour.

Variable mesurée sur la bande de labour	Prédiction par le modèle quand l'état initial est :	
	Non tassé	Tassé
a	sous-estimée	sous-estimée
b	sous-estimée	mauvaise
c	sur-estimée	mauvaise
Position du barycentre	sur-estimée	sur-estimée
Position du PJM (1)	assez bonne	assez bonne
Angle A	bonne	bonne

Tableau III-3 : Performances du modèle de retournement de la terre au cours du labour ne prenant pas en compte la déformation de la bande de terre

(1) : PJM = Point de jetée maximale (voir définition à la figure III-5)

Il ressort de cette analyse :

- Que le déport latéral est fortement dépendant de l'état initial avant labour :

Lorsque l'état initial est tassé, il est très difficile de prévoir "a", "b" et "c", les valeurs observées étant très variables ; dans ces situations, le travail de la charrue se traduit par une forte réduction du calibre des mottes et une importante réorganisation de leur arrangement au cours du labour (Coulomb, 1991). Ceci entraîne des déformations de la bande de terre, très variables d'un passage de charrue à l'autre.

Lorsque l'état avant labour est non tassé, le travail de fragmentation est moins important ainsi que le réarrangement des mottes entre elles. La déformation de la bande de terre est plus homogène entre les passages de charrue et la variabilité des valeurs observées moins grande.

- Que dans les situations non tassées, les performances du modèle sont meilleures ; il a cependant tendance à surestimer la valeur de "c" et la hauteur du barycentre, et il ne prend pas en compte la fraction restant dans le compartiment d'origine (valeur de "a").

Ceci est dû à la déformation de la bande de terre au cours du retournement par la charrue, qui se traduit par :

- l'accroissement du volume de la bande de labour, dû à l'augmentation des vides macroscopiques et de la part occupée par les mottes d'état interne gamma et la terre fine (Coulomb, 1991),

- et son allongement, une partie de la terre retombant en fond de raie. La fraction de la bande projetée à deux compartiments de distance est plus faible que prévu et l'on observe qu'une partie de la terre reste dans le compartiment d'origine ; d'autre part, le barycentre de la bande est tiré vers le bas. Par contre, cette déformation ne modifie pas trop la position du point de jetée maximale et l'inclinaison de la bande sur l'horizontale.

On notera que les conditions d'humidité, la texture du matériau, la charrue utilisée et la gamme des vitesses d'avancement ont été telles que le travail s'est déroulé dans des conditions très proches de celles qui règnent habituellement lors des labours sur le centre expérimental de Grignon.

Cependant, les conditions expérimentales comportent un tassement homogène de la couche de terre labourée dans les traitements T, alors que dans les situations N, la charrue travaille dans un horizon Ap ne comportant pas de volume tassé avant labour. Ces conditions sont différentes de celles des parcelles expérimentales, dont la couche labourée est constituée de volumes fortement tassés (positions L1), alternant avec des zones qui le sont moins, en L3. **Nous n'utiliserons donc pas les valeurs mesurées pour proposer un nouveau paramétrage de notre modèle.**

Mais cette analyse permet d'orienter le choix des modifications à introduire dans le modèle de retournement : nous prendrons en compte l'effondrement de la bande en fond de raie, sans changer la valeur de l'angle de retournement, ni la position du point de jetée maximale.

3.6. Modification du modèle de retournement de la bande de terre au cours du labour

Avant de proposer un modèle prenant en compte la déformation de la bande de terre, nous décrivons dans un premier temps plus en détail le mouvement de cette dernière lors du labour.

a. Déplacement et déformation de la bande de terre au cours du labour : étude bibliographique

Nichols & Reed (1934), ont proposé les premiers une théorie de la déformation de la bande labourée au cours de son trajet le long du corps de charrue. Ils décomposent ce mouvement en plusieurs phases :

La bande de terre se soulève, sous l'action du soc qui agit comme un plan incliné travaillant en oblique par rapport à la direction d'avancement de la charrue. Au cours de ce soulèvement, la bande subit un effort de flexion qui aboutit, soit à une déformation plastique, soit à une première rupture dans un plan à peu près vertical (formation de plans de cisaillement primaires) si la bande est dans un état de consistance friable.

La bande de terre se retourne ensuite, du fait de son glissement le long des surfaces gauches du versoir. Au cours de ce trajet, apparaissent des contraintes engendrant d'autres plans de rupture. En effet, au cours de la rotation, la vitesse linéaire des points constituant la bande est d'autant plus élevée que ces points sont éloignés du centre de rotation ; or la cohésion d'ensemble de la bande tend à faire se déplacer les différents points à la même vitesse : il en résulte des contraintes qui amènent, lorsque la cohésion est suffisamment faible ou la vitesse assez élevée, une rupture de la bande de terre. Simultanément, le volume de terre pris par la charrue avance avec celle-ci (Kouwenhoven & Terpstra, 1972). Rappelons que nous ne tiendrons pas compte de ce déport longitudinal dans notre réflexion : nous ne modélisons, en fait, *que la projection du mouvement dans un plan vertical, perpendiculaire à la direction d'avancement.*

Enfin, la bande se sépare du versoir, ce qui entraîne un changement brusque dans le mouvement du matériau et occasionne de nouvelles ruptures.

Pour une texture donnée, l'intensité de la fragmentation et l'importance de la déformation de la bande dépendent de son état initial, de son humidité et des caractéristiques de la charrue (forme du versoir, vitesse d'avancement).

Concernant la déformation de la bande - c'est le point qui nous intéresse le plus ici - plusieurs auteurs ont tenté d'en préciser les modalités ; le point commun de leurs observations est la mise en évidence d'un allongement de la section de la bande de terre :

Ashby (1934), plaçant des marqueurs en divers points de la bande de terre avant le passage de la charrue, observe ensuite leur position après retournement (figure. III-13). On constate qu'une partie des points est retombée en fond de raie, et que la bande s'est allongée.

Söhne (1959), étudiant le comportement de la bande de terre lors de labours à grande vitesse note un allongement de celle-ci.

Hénin *et al.* (1969), publient dans "le Profil Cultural" un tableau dans lequel ils comparent les dimensions de la bande de terre avant et après retournement. Ils constatent que la bande garde à peu près la même épaisseur et se déforme surtout dans le sens de la longueur.

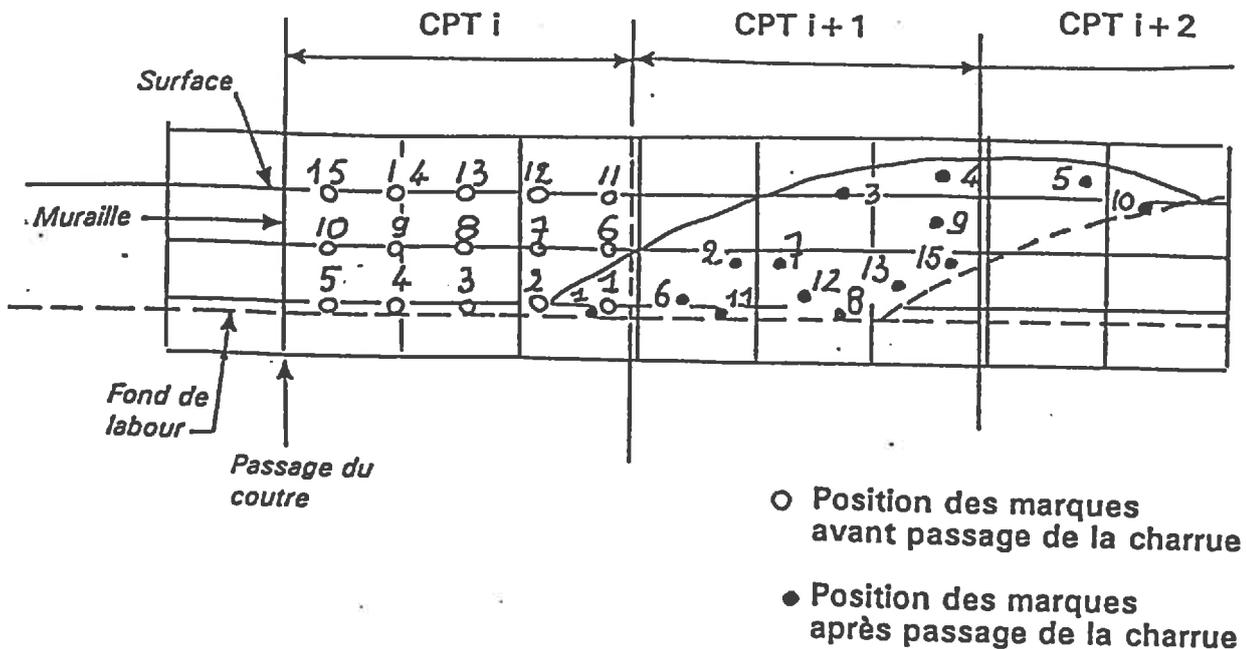


Figure III-13 : Figure de Ashby *et al.*, citée dans Nichols & Reed (1934), sur laquelle nous avons positionné notre compartimentage

Kouwenhoven & Terpstra (1972) ont également placé des marqueurs dans la bande de terre avant son retournement : ceux-ci sont constitués de bâtonnets de craie, enfoncés à la base de la bande avant le passage de la charrue. Le soc les coupe en deux, la moitié supérieure étant entraînée avec la bande de terre, la moitié inférieure restant en fond de raie (figure III-14). On peut ainsi mesurer le déplacement des points de la base de la bande de terre - vers l'avant (**fw**), en hauteur (**uw**) et latéral (**sw**). Ces différentes composantes du mouvement sont exprimées en fonction de la distance à la muraille (**dfw**).

On constate, en comparant leurs observations avec les prédictions du modèle, que celui-ci surestime à la fois le déport latéral (**sw**) et le déplacement en hauteur (**uw**) (figure III-15).

Les valeurs mesurées par ces auteurs indiquent, comme prévu, que plus les points sont près du point de pivotement, moins le déport latéral est important ; les valeurs négatives obtenues indiquent que les points les plus proches du centre de rotation sont retombés en fond de raie, en deçà de leur position initiale. Pour ce qui est du déplacement en hauteur, il est également d'autant plus important que les points sont loin du centre de rotation, et l'on observe également une surestimation par le modèle.

Ces résultats sont cohérents avec une hypothèse de déformation de la bande par allongement et retombée de la terre en fond de raie.

Tous ces auteurs considèrent donc que le modèle de retournement est mis en défaut puisqu'il ne prend pas en compte la déformation de la bande au cours de son trajet le long du versoir. Sauf dans des cas extrêmes de comportement mécanique, soit parce qu'elle est très plastique, soit parce qu'elle est très rigide (conditions sèches ou résistance renforcée par un chevelu racinaire abondant lors de retournement de prairie par exemple) la bande de terre se déforme en se fragmentant et en s'allongeant. Ceci entraîne une augmentation de son volume global (foisonnement), ne modifie pas trop l'angle de retournement et la position du point de jetée maximale, mais joue sur la position du barycentre et sur la valeur du déport latéral.

Mais, si tous ces auteurs constatent les limites du modèle classique, bien peu proposent un modèle plus performant.

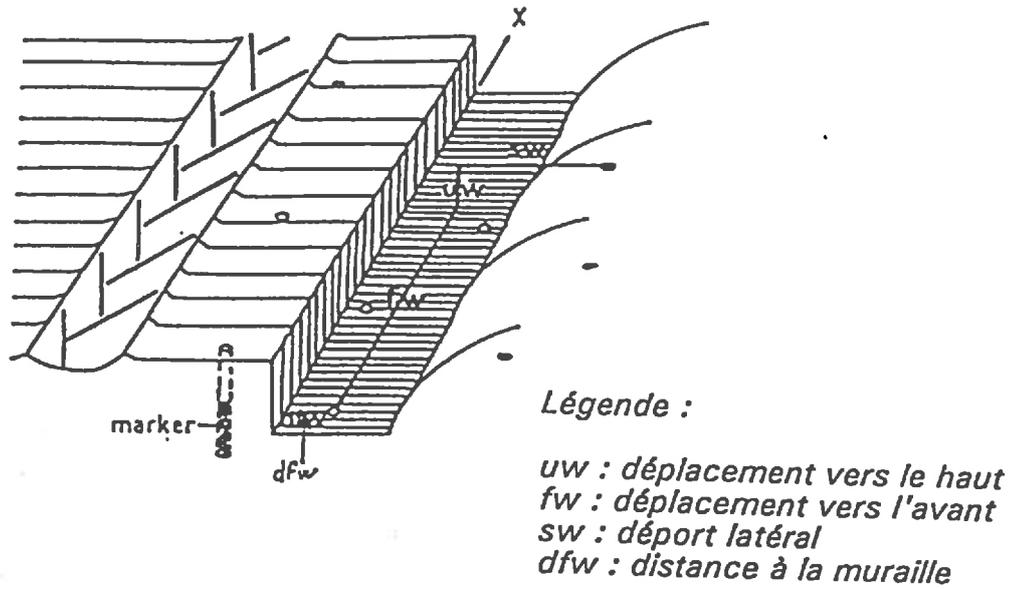
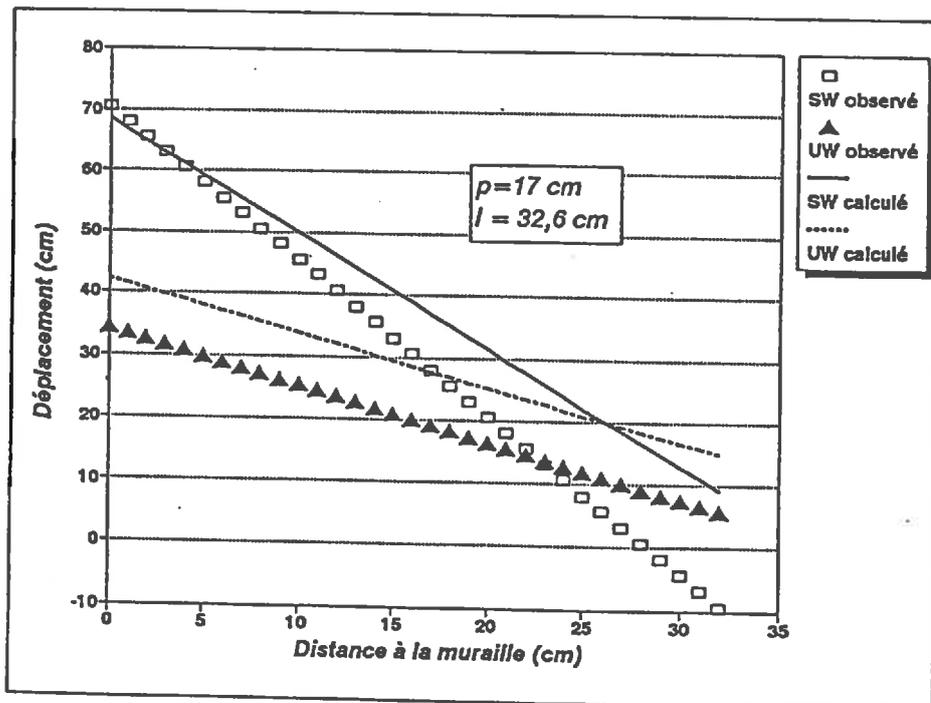


Figure III-14 : Schéma de principe des mesures effectuées par Kouwenhoven & Terpsta (1972)



N.B. Les droites correspondant aux points observés sont les régressions calculées par Kouwenhoven et Terpsta sur les nuages de points expérimentaux.

Figure III-15 : Comparaison des valeurs de SW et UW (Cf. Fig. III-14) calculées par le modèle, avec celles mesurées par Kouwenhoven & Terpsta (1972)

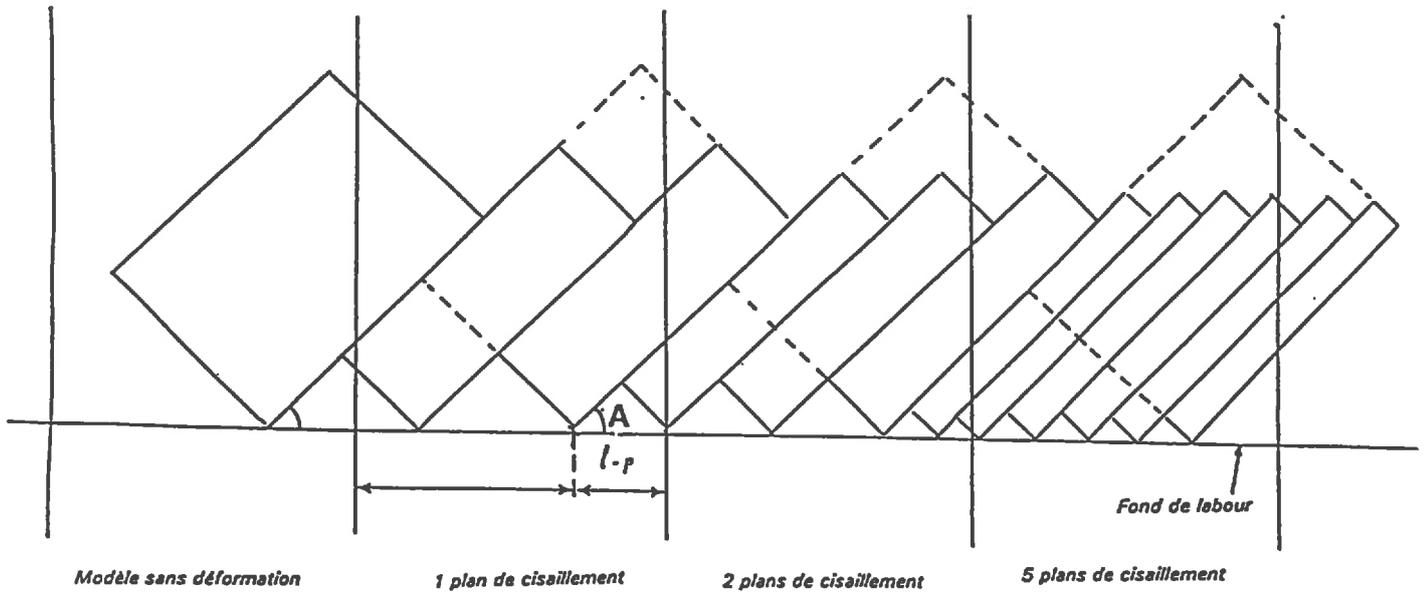


Figure III-16 : Principe de la modélisation du glissement de la terre en fond de rale

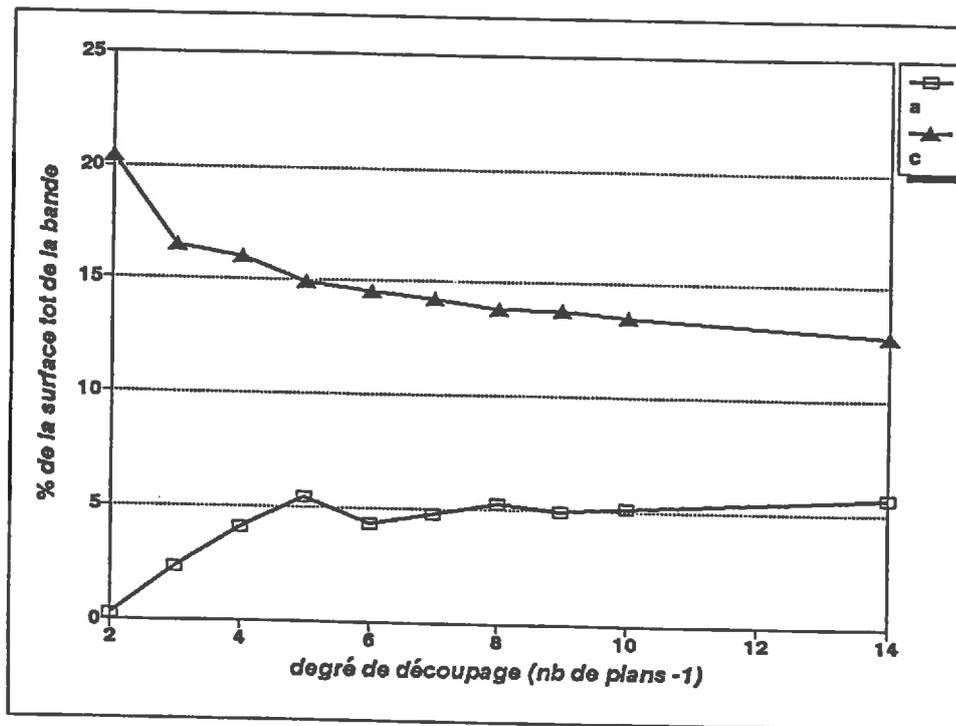


Figure III-17 : Valeurs de "a" et "c" en fonction du degré de découpage

b. Modifications du modèle de retournement de la bande de terre au labour

Seuls deux auteurs ont, à notre connaissance, proposé des modifications du modèle de retournement : Söhne (1959) et Coulomb (1990, 1991).

Le premier, étudiant le comportement de la bande de terre lors de labours à grande vitesse (supérieure à 8 km/h), observe que le modèle de retournement présenté plus haut sous-estime dans ces situations le déport latéral. Il propose donc une modification qui consiste à éloigner latéralement le second point de pivotement (point A de la figure III-5) de la muraille. Cette modification ne peut nous satisfaire ici, dans la mesure où les vitesses de labour mises en jeu, tant dans nos parcelles expérimentales que dans l'étude du déport qui vient d'être menée, sont inférieures au seuil avancé par Söhne de 8 km/h, et où l'on observe plutôt une surestimation du déport latéral par le modèle.

Le second auteur propose une modification du modèle qui conserve la position du second point de pivotement, mais qui prend en compte une largeur de bande différente de la largeur de travail nominative de la charrue. Il observe en effet, sur le terrain, des largeurs de travail réelles différentes de la largeur théorique. Mais cette modification ne prend pas en compte les retombées de terre en fond de raie. D'ailleurs, cet auteur, comparant les positions du barycentre et du point de jetée maximale prédites *par son modèle* à celles mesurées sur le terrain, constate des écarts similaires à ceux que nous avons observés.

Nous sommes donc conduit à proposer un autre type de modification du modèle.

Nous proposons de simuler l'effondrement de la terre en fond de raie au cours du labour par un glissement le long de plans de cisaillement perpendiculaires au plan de la section de la bande et faisant avec l'horizontale un angle A tel que $\sin A = P/L$ (figure III-16). Chaque bande de terre est ainsi découpée par une série de plans de cisaillement et le mouvement d'une particule de terre au sein de la bande se décompose en :

- un **double pivotement**, avec les mêmes règles que précédemment;
- une **translation le long des plans de cisaillement**, vers le bas.

Cette modification du modèle n'affecte pas l'angle de retournement de la bande ni la position du point de jetée maximale ; elle entraîne par contre une modification :

- de la position du barycentre de la bande après retournement, plus basse que précédemment,
- des valeurs de "a", "b" et "c", les différentes parties de la bande projetées dans les compartiments voisins.

Les valeurs de ces paramètres dépendent du nombre de plans de cisaillement découpant la bande ; ils tendent vers une limite lorsque ce nombre tend vers l'infini. Les calculs de ces différentes valeurs sont fournis à l'annexe 7. On a porté à la figure III-17, l'évolution des valeurs de a et c en fonction du degré de découpage, pour un labour à 25 cm de profondeur et une largeur de travail de 35,6 cm (14 pouces). On constate que l'on s'approche assez vite de la valeur limite.

Si l'on reprend la comparaison entre les valeurs prédites par le modèle comprenant un découpage de la bande en trois blocs (modèle avec glissement le long de deux plans de cisaillement, figure III-17), et les valeurs mesurées sur les 20 bandes de labour étudiées plus haut, on observe, **pour les situations d'état initial non tassé avant labour** (nous avons noté plus haut la difficulté à modéliser les déformations en situations tassées) :

- que l'on continue à sous-estimer la valeur de " a " ; si celle-ci n'est plus nulle, la valeur prédite reste cependant faible (Figure III-18) ;

- que la prédiction de la valeur de " c " est meilleure (Figure III-19) : le glissement introduit dans le modèle entraîne une diminution de la valeur de ce paramètre, qui était auparavant surestimé ;

- que la valeur de " b ", sous-estimée dans le modèle sans déformation de la bande, est mieux prédite lorsque l'on prend en compte le glissement (Figure III-20) ;

- que l'on prédit correctement l'abscisse du barycentre de la bande, mais que son ordonnée est sous-estimée de 3 centimètre environ (Figure III-21).

Ces résultats restent valables lorsque le nombre de plans de découpage tend vers l'infini.

Cette modification apportée au modèle de déplacement du sol par la charrue, améliore les performances du modèle classique pour la prédiction des valeurs mesurées sur les 20 bandes de labour étudiées.

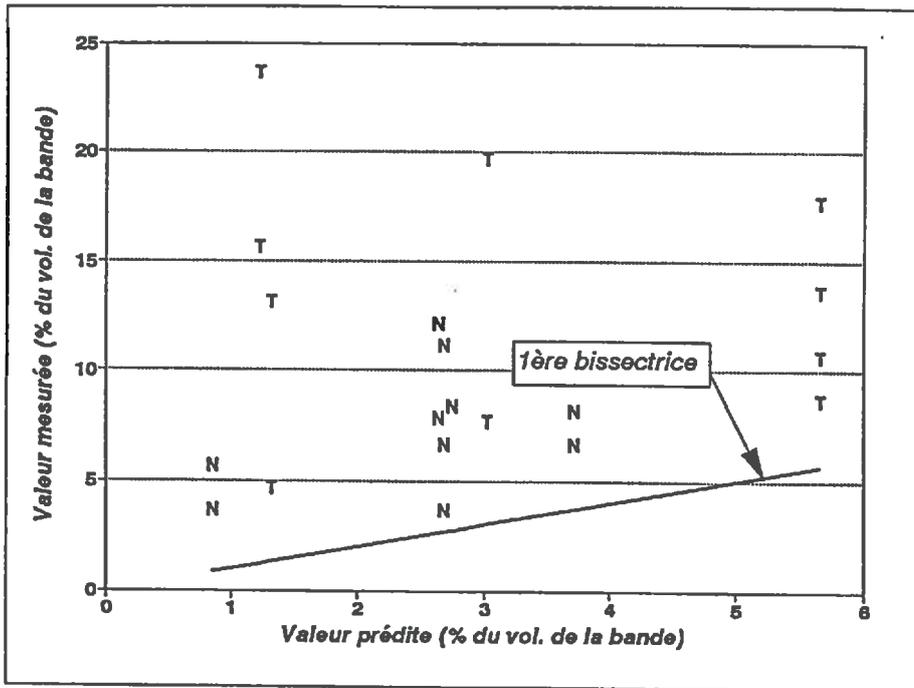


Figure III-18 : Comparaison des valeurs prédites par le modèle avec glissement et des valeurs observées. Valeurs de "a"

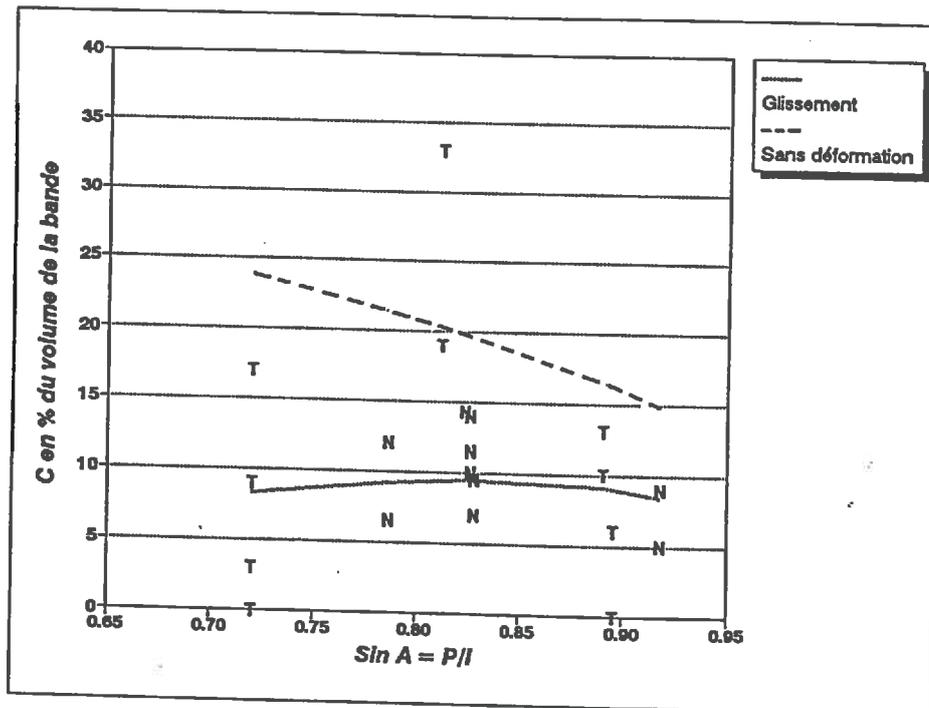


Figure III-19 : Comparaison des valeurs prédites par le modèle avec glissement et des valeurs observées. Valeurs de "c"

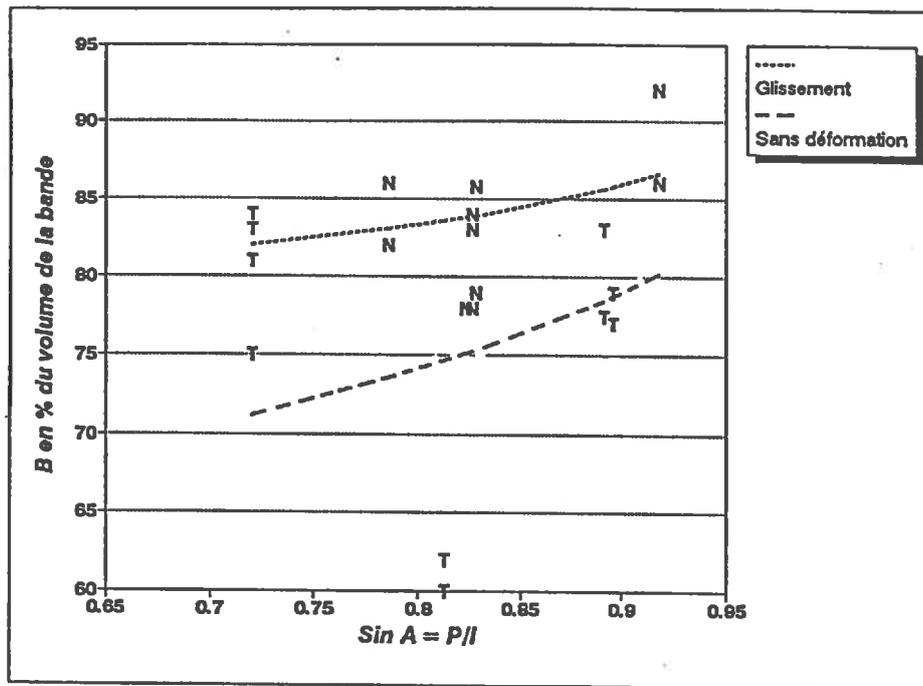


Figure III-20 : Comparaison des valeurs prédites par le modèle avec glissement et des valeurs observées. Valeurs de "b"

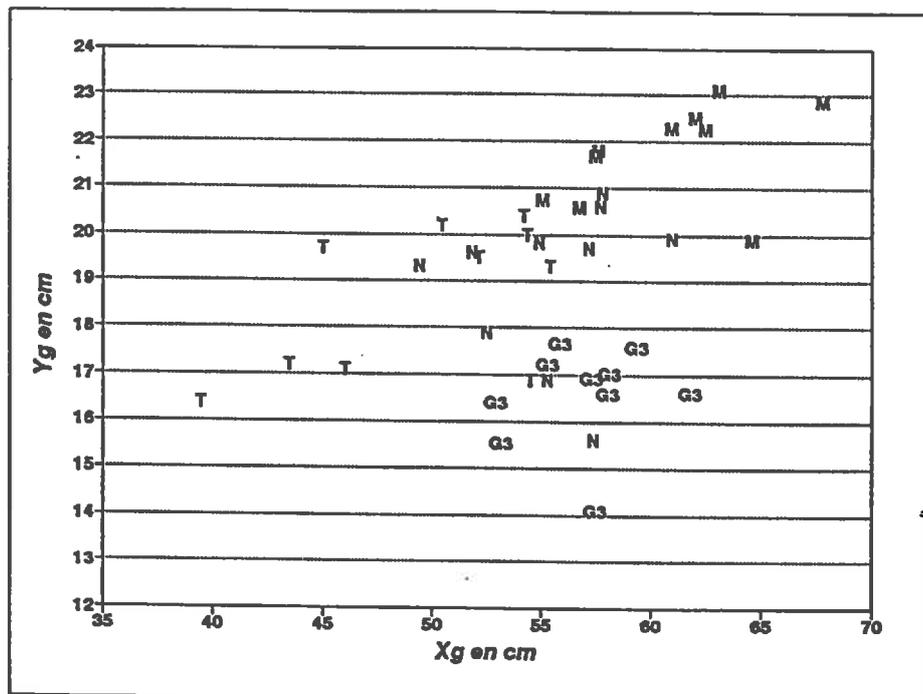


Figure III-21 : Comparaison des valeurs prédites par le modèle avec glissement et des valeurs observées. Position du barycentre
 N et T = Positions mesurées sur les bandes étudiées (Tassé et Non Tassé)
 M = Valeurs prévues par le modèle sans déformation
 G3 = Valeurs prévues par le modèle avec glissement (2 plans de cisaillement)

c. Résultats de la simulation avec le nouveau mode de retournement

La prise en compte de cette amélioration dans le modèle compartimental se traduit par l'introduction d'une valeur non nulle de "a" dans la matrice de transfert, d'une diminution de la valeur de "c", et d'une augmentation de la valeur de "b" (tableau III-4).

	Modèle sans déformation	Modèle avec glissement	
		Nombre de plans de cisaillement 3	infini
a	0	2.1	5.8
b	76	82.0	81.5
c	24	15.9	12.7

Valeurs en % du volume total de la bande de terre, après retournement.

Tableau III-4 : Comparaison des valeurs de "a", "b" et "c" :

modèle de retournement avec et sans déformation.

La première conséquence de l'introduction de ce nouveau paramétrage est une modification de la répartition du Δ entre les différents compartiments composant la position L3, comme nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre. On s'attend par ailleurs à ce que l'évolution de la teneur moyenne en L3 soit à l'inverse peu sensible à ce nouveau paramétrage. C'est ce que l'on peut constater sur la figure III-22, où l'on a représenté les trois courbes d'évolution obtenues avec les trois jeux de paramètres du tableau III-4, dans les conditions de la parcelle 1. La valeur moyenne en L3 est plus faible qu'en considérant un modèle de retournement sans déformation de la bande, car, en introduisant le glissement, une proportion plus forte de Δ reste dans le compartiment 1 après labour.

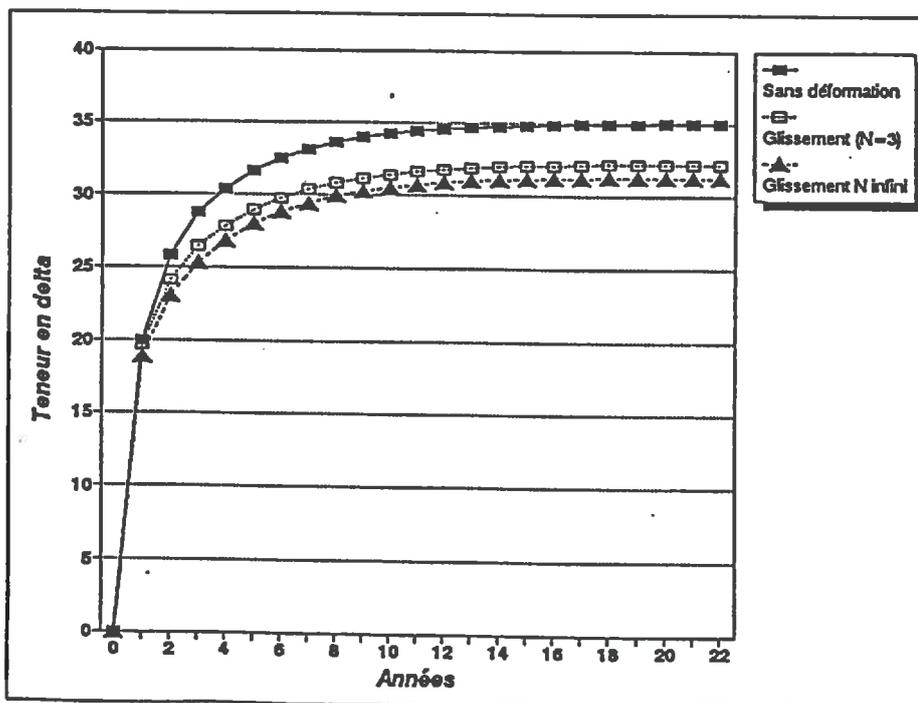


Figure III-22 : Evolution de la teneur moyenne en delta de L3. Comparaison des différents modèles de retournement de la bande lors du labour

Nous sommes donc fondés à conserver ce nouveau mode de fonctionnement de la bande de terre au cours du labour dans notre simulation, et ce d'autant plus que la modification introduite ramène, lorsque le découpage est maximal, *le niveau supérieur de la couche labourée à son niveau d'origine* : la terre, lorsqu'elle glisse le long des plans de cisaillement, occupe l'espace libre à la base des bandes retournées (Figure III-16, page 120), et, lorsque le découpage est maximal, tout cet espace est occupé. C'est ce que l'on observe dans la réalité, où le foisonnement observé juste après le labour tend à disparaître au cours du temps.

Nous supposons dans cette modélisation que les volumes des compartiments dans lesquels nous calculons les teneurs en Δ sont identiques et constants entre années ; nous prenons par ailleurs en compte le fonctionnement de la couche labourée sur une durée qui dépasse celle de l'année de culture ; ces deux raisons imposent de *pouvoir considérer que la couche labourée revient, en fin de campagne, à son volume initial*.

Nous conserverons donc ce mode de représentation du retournement des bandes de terre dans la suite de notre travail.

Nous allons maintenant poursuivre l'étude de sensibilité en prenant en compte la répartition spatiale des éléments d'état interne delta au sein de la couche labourée, et son évolution au cours du temps. Cela va nous amener à proposer une nouvelle technique de simulation dont le préalable est également de pouvoir considérer que le niveau supérieur de la couche labourée retrouve son niveau d'origine en fin de campagne. Notons toutefois que les observations de terrain indiquaient l'influence de l'état structural initial sur le *résultat* du retournement. Le mode de représentation retenu ne nous permet pas, en l'état, d'introduire l'effet de ce facteur dans notre modèle.

4. HYPOTHESE SUR LA RÉPARTITION DU Δ AU SEIN DE Ap

Le principe du modèle compartimental que nous avons proposé suppose une répartition homogène du Δ au sein de chacun des compartiments qui constituent l'horizon labouré. Cette hypothèse est très simplificatrice par rapport au phénomène décrit ; en effet :

- la disparition d'éléments structuraux d'état interne Δ , étant due à l'action du climat ou à celle des outils de reprise, elle ne s'exerce que dans la partie supérieure du profil ;
- les transferts de Δ d'un compartiment à l'autre, résultent des trajectoires suivies par les différents éléments structuraux qui composent l'horizon lors du labour ; celles-ci sont différentes selon la position des éléments par rapport aux points de pivotement de la bande de terre (cf supra).

Il est donc nécessaire de tester le comportement du modèle en prenant en compte la répartition spatiale des éléments structuraux d'état interne Δ au sein des compartiments.

Pour cela, nous avons conçu un programme de simulation "point à point".

4.1. Principe du programme de simulation

Nous considérons chaque compartiment comme un ensemble de points, régulièrement répartis, qui sont définis par :

- leurs coordonnées en x et y, en prenant comme origine l'angle inférieur gauche du premier compartiment;
- un état interne, "*delta*" ou "*non delta*".

On calcule alors le déplacement de chaque point lors des labours successifs. Conformément à ce qui a été dit plus haut, le mode de retournement retenu comprend un glissement le long de plans de cisaillement parallèles. La disparition d'éléments d'état interne Δ est simulée en forçant à l'état interne "*non delta*" les points de la partie supérieure du profil. Les tassements sont à l'inverse simulés en forçant à "*delta*" les points appartenant aux compartiments compactés.

Dans chaque compartiment, la teneur en éléments d'état interne Δ est calculée en faisant le rapport du nombre de points d'état interne Δ sur le nombre total de points qui constituent le compartiment.

On ne modifie ici que la technique de simulation : jusqu'à présent, on avait programmé l'équation d'état du modèle compartimental sur tableur ; la technique de simulation point à point s'affranchit du formalisme mathématique développé dans les chapitres précédents. **Le modèle d'évolution de l'indicateur et les hypothèses qui lui**

sont associées restent cependant strictement les mêmes que précédemment. Cependant cette technique impose quelques contraintes pour le choix des paramètres de la modélisation :

Le logiciel de programmation utilisé (TURBO-PASCAL, version 4.0), impose une taille maximale aux variables qu'il traite. En raison de cette contrainte, nous avons dû limiter le nombre total de points décrivant le profil, et retenu une maille carrée de 2 cm de côté. Ce niveau de définition, imposé par le logiciel, est toutefois cohérent avec le seuil de calibre retenu lors de l'évaluation de la teneur en Δ des parcelles du Centre Expérimental. De plus Tardieu (communication personnelle) n'estime pas nécessaire de retenir un niveau plus fin de description de l'état structural pour étudier l'effet de ce dernier sur le fonctionnement des systèmes racinaires. Un tel seuil est par contre insuffisant pour caractériser un lit de semence en vue d'y étudier les transferts d'eau, d'oxygène ou de chaleur ; mais notre travail n'a pas cet objectif.

Chaque compartiment comprend $12 \times 17 = 204$ points répartis sur une grille régulière, à maille carrée de 2 cm de côté. On simule donc une couche labourée dont l'épaisseur est de $12 \times 2 \text{ cm} = 24 \text{ cm}$ et cinq compartiments dont chacun a une largeur de $17 \times 2 \text{ cm} = 34 \text{ cm}$. Avec un pas de 2 cm, ce sont en effet ces valeurs qui donnent la représentation la plus proche du motif défini précédemment (25 cm de profondeur de labour et 35 cm de largeur des compartiments). D'autre part, pour simuler l'effet des reprises, nous forcerons à l'état interne "*non delta*" les points de la partie supérieure du profil. En procédant de la sorte, nous ne pouvons faire varier la profondeur de reprise que par pas de 2 cm.

Après avoir présenté brièvement la structure du programme, nous comparerons les résultats de la simulation avec ceux obtenus à l'aide du calcul sur tableur. Pour ce faire, nous adapterons le paramétrage sur tableur aux contraintes inhérentes au fonctionnement du programme informatique (valeurs de p, l, r) ; de même, les valeurs des coefficients a, b, c utilisés sur la feuille de calcul correspondront à celles du modèle de retournement de la bande de terre avec déformation (*nombre de plans de cisaillement infini*).

4.2. Structure et fonctionnement du programme

L'organigramme général est représenté à la figure III-23.

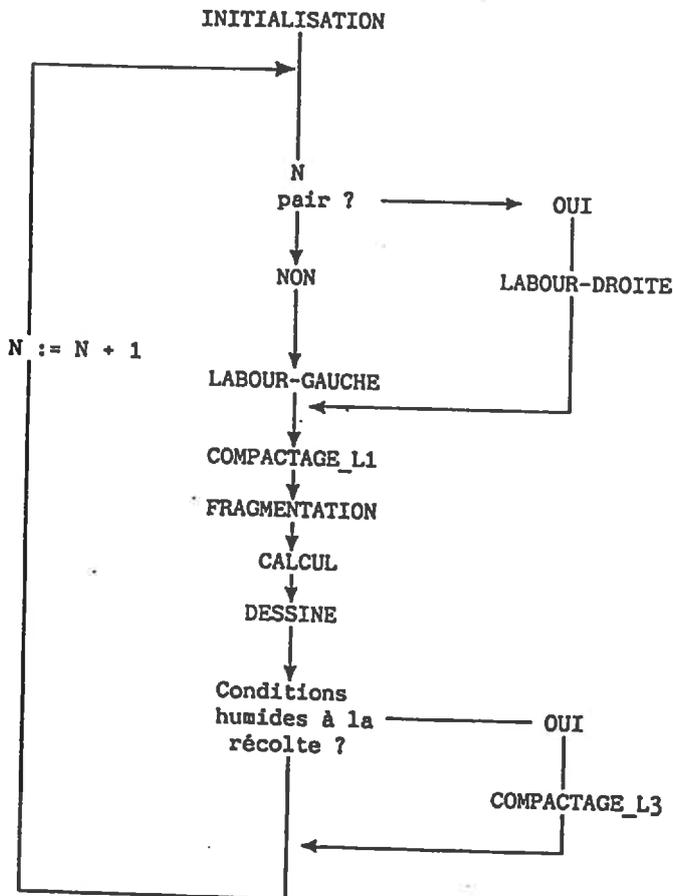


Figure III-23 : Organigramme du programme de calcul point à point

a. Structure des données

Le programme utilise un tableau de données à trois dimensions : un élément $P_{i,j,k}$ correspond à un point appartenant au compartiment "k" et situé à l'intersection de la ième ligne et de la jème colonne de la maille de ce dernier. Chaque point est un *enregistrement* (au sens que donne à ce terme le langage PASCAL) comprenant : son abscisse et son ordonnée (en cm) ainsi que son état interne ("*delta*" ou "*non delta*").

b. Algorithme

Après initialisation du tableau (avec l'hypothèse d'état initial prise jusqu'à présent, les points du compartiment 1 ont un état interne "*delta*" et tous ceux de la position L3 un état interne "*non delta*"), le programme décrit une série de boucles, qui correspondent chacune à une année de culture.

A l'entrée dans la boucle, le tableau de points est transmis successivement à plusieurs sous-programmes (procédures en langage PASCAL), correspondant aux différentes actions subies par le profil au cours d'une année culturale :

- SOUS-PROGRAMME LABOUR-DROITE OU LABOUR-GAUCHE

On calcule point à point la position après retournement et glissement (voir l'annexe 8 pour le détail de ces calculs). Chaque point est alors replacé dans le tableau en fonction de ses nouvelles coordonnées, tout en conservant son état interne.

Le programme utilise alternativement LABOUR-DROITE et LABOUR-GAUCHE, en commençant par LABOUR-GAUCHE la première année, pour se conformer aux conventions prises précédemment.

- SOUS-PROGRAMME COMPACTAGE-L1

Les points de la position L1 sont forcés à l'état interne "*delta*", conformément à nos hypothèses de fonctionnement de la couche labourée des parcelles expérimentales.

- SOUS-PROGRAMME FRAGMENTATION

Les points situés dans la partie supérieure du profil jusqu'à une profondeur que l'on peut paramétrer, sont forcés à l'état interne "*non delta*".

- SOUS-PROGRAMMES CALCUL ET DESSIN

Après calcul de la teneur en Δ de chaque compartiment dans H5, le programme affiche sur l'écran (ou l'imprimante) une image du profil permettant de visualiser les points "*delta*" et "*non delta*", et les limites des différents compartiments.

- SOUS-PROGRAMME COMPACTAGE-L3

Si les conditions d'humidité lors de la récolte le justifient, une partie des points situés dans les compartiments 2 à 5 est forcée à l'état interne "*delta*", pour simuler l'effet d'un passage de roue en conditions dégradantes. Le paramètre qui est passé à ce sous-programme lors de son appel, est le numéro du (ou des) compartiment(s) affecté(s) par les roues lors de la récolte. Pour la simulation de la parcelle 3, on a fait l'hypothèse, comme précédemment, d'un tassement tous les deux ans (lors de la récolte de maïs) d'un compartiment de L3, dont le numéro est tiré au sort par le programme.

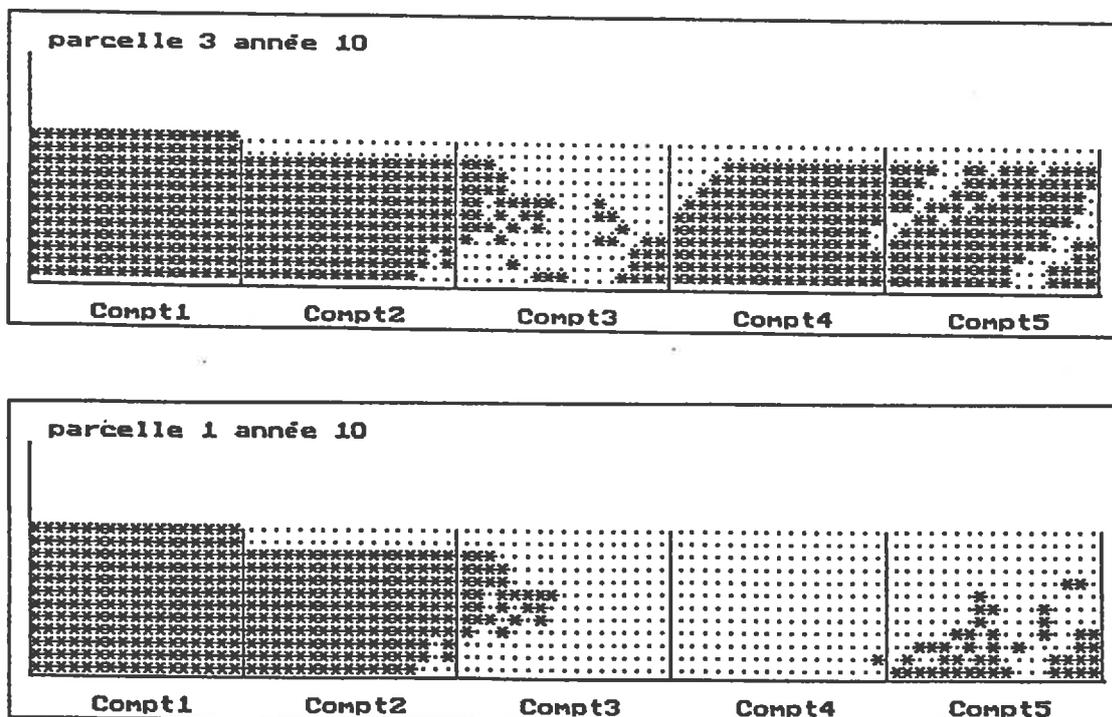
4.3. Résultats de la simulation

Après avoir présenté les sorties graphiques correspondant aux parcelles 1 et 3, nous confronterons les résultats obtenus avec le programme informatique point à point à ceux établis sur tableur. Cette confrontation portera sur les valeurs moyennes à l'équilibre, puis sur la répartition du Δ entre compartiments. Nous effectuerons cette comparaison toutes choses égales par ailleurs, en utilisant les situations des parcelles 1 et 3, dont nous reprendrons les hypothèses de fonctionnement. Afin de ne pas compliquer la comparaison,

nous conserverons la simplification d'une coïncidence parfaite, tous les ans, entre le découpage des bandes par la charrue et le compartimentage. Nous étudierons ensuite la sensibilité du modèle à la répartition du Δ au sein de la couche labourée.

a. Sorties graphiques

Elles sont présentées à la figure III-24. Les traits dominants de ces cartes sont la nette différence de teneur en Δ dans la position L3 entre les deux parcelles, et la répartition plus homogène entre compartiments dans la parcelle 3, même si le compartiment N°3 de cette dernière apparaît relativement plus pauvre en éléments d'état interne Δ que ses voisins. Nous comparerons plus loin les valeurs de répartition obtenues avec le tableur, sous les mêmes hypothèses de fonctionnement, en particulier avec coïncidence tous les ans entre le compartimentage et le découpage par la charrue. Nous avons souligné plus haut qu'il était illusoire de rapprocher la distribution entre compartiments ainsi obtenue de celle observée sur le terrain, à Grignon, dans la mesure où on ne connaît pas le découpage réellement opéré par la charrue sur le motif géométrique au cours des années successives. *A fortiori*, on ne peut rapprocher ces cartes de celles de la figure II-2, dans la mesure où ces dernières ne représentent que qualitativement les zones où domine l'état interne Δ .



Note : Les "*" représentent les points d'état interne Δ
Parcelle 1 : monoculture de blé
Parcelle 2 : succession blé/maïs (récolte de maïs l'année 9)
Labour versant vers la droite l'année 10.

Figure III-24 : Deux exemples de sorties graphiques du programme point à point

b. Valeurs moyennes à l'équilibre

. Parcelle N°1

On rappelle que dans cette situation, on considère que les opérations de récolte n'affectent pas l'état interne. On n'utilise donc pas la procédure RECOLTE du programme. La profondeur de reprise retenue est de 4 cm (2 lignes de points en surface). On constate (figure III-25) que l'allure générale de l'évolution est la même et que les valeurs atteintes à l'équilibre sont relativement proches (31 % contre 38 %).

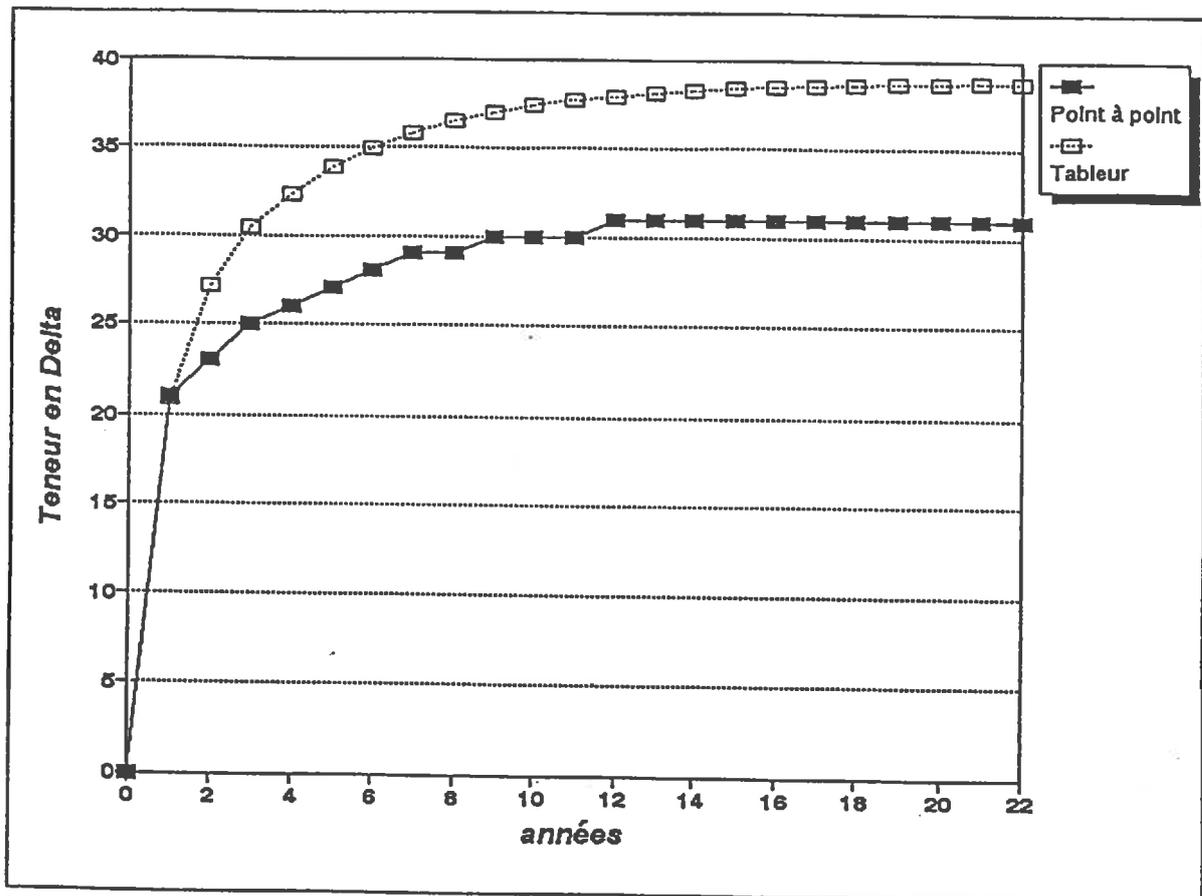


Figure III-25 : Comparaison des deux méthodes de simulation.
Evolution de la teneur en delta en L3 (Parcelle 1)

La valeur moyenne prédite par le programme point à point apparaît légèrement plus faible que celle calculée par le tableur. La proportion de points dont l'état interne passe de Δ à non Δ est donc un peu supérieure dans ce cas au taux de disparition utilisé pour le calcul sur tableur (égal au rapport des volumes des horizons H1 et H5).

. Parcelle N°3

Pour cette parcelle, la succession est, depuis 10 ans, Maïs-Blé. La simulation de l'évolution de l'état du profil tient compte de l'effet dégradant des passages de roues lors de la récolte du maïs. Le sous-programme RECOLTE est ici appelé. La valeur du numéro de compartiment affecté lors de la récolte est tirée au sort, une année sur deux. Nous utilisons le même tirage au sort avec les deux techniques de simulation.

L'allure générale de l'évolution de la teneur moyenne en L3 est la même que celle obtenue par simulation sur tableur (figure III-26) : elle oscille plus ou moins régulièrement autour d'une valeur moyenne légèrement inférieure à celle obtenue par le calcul sur tableur dans les mêmes conditions. Comme précédemment, la proportion de points passant de Δ à non Δ est légèrement inférieure au taux de disparition utilisé avec le tableur.

Notons que l'on retrouve bien une valeur moyenne nettement plus élevée que pour la parcelle 1.

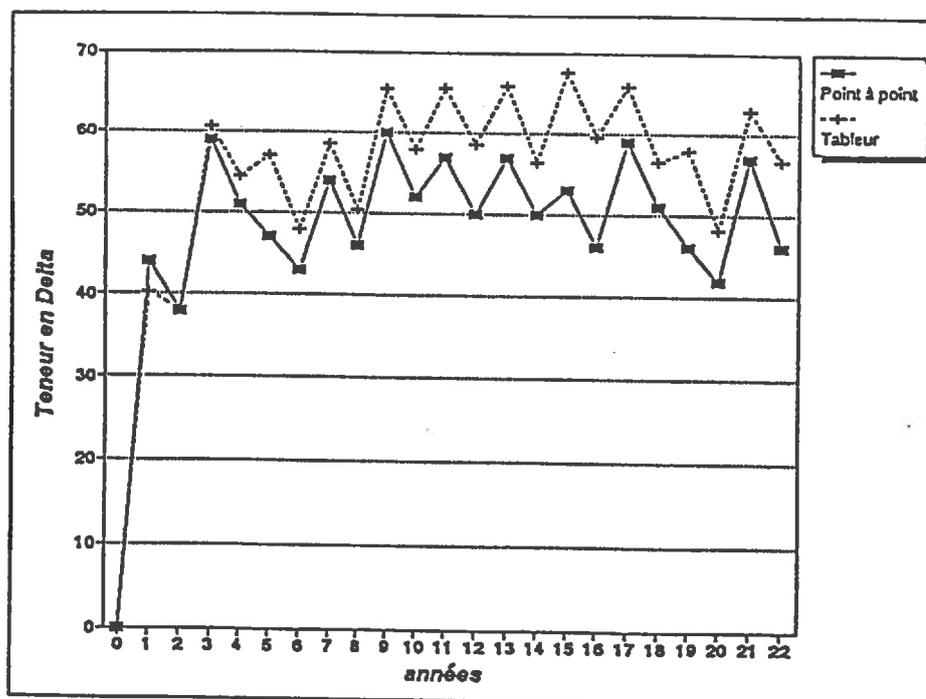
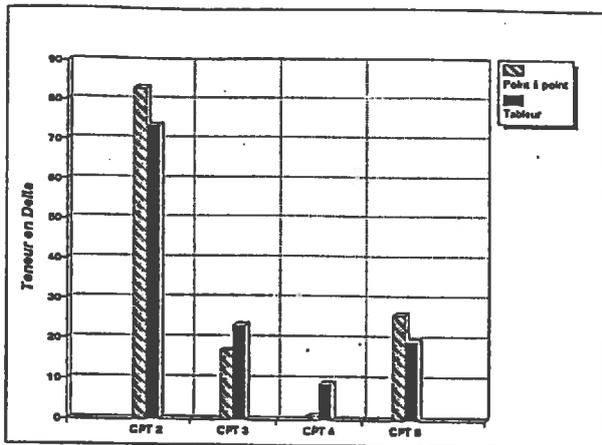


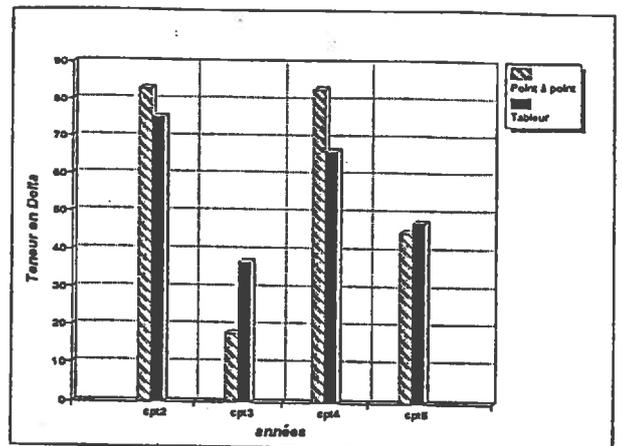
Figure III-26 : Comparaison des deux méthodes de calcul. Evolution de la teneur moyenne en delta de L3 (Parcelle 3)

c. Répartition entre compartiments

On a présenté à la figure III-27 les histogrammes des teneurs dans chacun des compartiments obtenus avec les deux méthodes de simulation. On observe une allure générale des histogramme assez semblable entre les deux méthodes. Dans la parcelle 1, avec une configuration où le labour verse vers la droite, la teneur du compartiment 2 est nettement plus élevée que les trois autres. Cependant, le programme point à point fournit une valeur plus élevée que le tableur pour le compartiment 2, plus faible dans les compartiments plus proches du centre de la position L3. Pour ce qui concerne la parcelle 3, le programme point à point sous-estime par rapport au tableur les valeurs des compartiments 3 et 5, mais donne une valeur plus élevée pour les deux autres compartiments, ce qui fait que la moyenne en L3 est proche de celle obtenue avec le tableur.



Parcelle 1



Parcelle 3

Figure III-27 : Comparaison des distributions de Δ entre compartiments

Ainsi, la prise en compte de la répartition spatiale du delta avec la nouvelle technique de simulation n'entraîne pas de différence sur la valeur moyenne à l'équilibre au sein de L3, mais modifie la structure de la variabilité de la teneur en Δ au sein de cette position, même si les allures générales des répartitions à l'équilibre au sein de L3 restent très voisines. On vérifie donc, par ces comparaisons, que la technique de simulation point à point n'introduit pas de dérive grave dans la représentation du fonctionnement de la couche labourée des parcelles du Centre Expérimental de Grignon.

Ceci nous autorise à utiliser cet outil de simulation pour étudier, de manière plus réaliste qu'avec le modèle compartimental, la sensibilité du modèle à la valeur du taux de disparition du Δ (paramètre "r"). En effet, l'étude de sensibilité de ce dernier à la valeur de "r" (figure A4-2 de l'annexe 4) montre qu'il est très sensible. Nous nous proposons d'étudier dans quelle mesure la prise en compte de la répartition spatiale du Δ au sein de l'horizon Ap peut jouer sur la sensibilité du modèle à la valeur de "r".

5. SENSIBILITE A LA VALEUR DU TAUX DE DISPARITION DU Δ

Dans la simulation, la disparition de Δ est localisée dans le profil, et, dans le programme, les points d'état interne Δ qui disparaissent sont situés à la surface sur une épaisseur de sol que l'on peut paramétrer, par pas de 2 cm. Avec le tableur, le taux de disparition était appliqué de manière uniforme à l'ensemble du Δ de la couche labourée.

Les résultats obtenus en faisant varier la valeur de "r" (exprimée en cm) de 4 à 16 cm, ont été portés à la figure III-28. On a représenté les valeurs atteintes à l'équilibre en fonction de la profondeur de reprise simulée ; on compare sur cette figure les deux méthodes de simulation (tableur et point à point), afin d'étudier l'effet de la prise en compte de la répartition spatiale du Δ au sein de Ap sur la sensibilité de ces valeurs à la profondeur de reprise. Les conditions de la simulation sont celles de la parcelle 1.

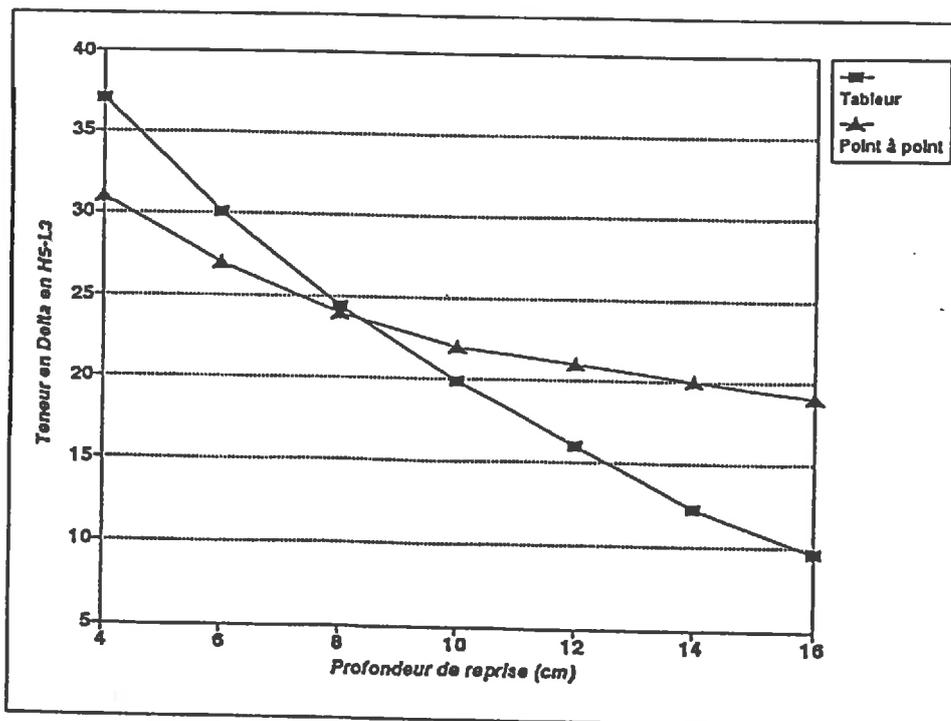


Figure III-28 : Sensibilité des valeurs à l'équilibre aux variations du paramètre "r".
Comparaison des deux méthodes de calcul

On constate une diminution de la valeur d'équilibre lorsque le taux de disparition augmente, mais on observe également que la sensibilité est moins forte lorsque l'on prend en compte la répartition spatiale du Δ (technique point à point). Ainsi, avec la méthode de calcul sur tableur, la valeur à l'équilibre est pratiquement divisée par 3 lorsque la profondeur de reprise passe de 4 cm à 16 cm ; avec le tableur, la valeur à l'équilibre de la parcelle 1 est ramenée de 31 à 20 % pour la même variation de profondeur de reprise. En prenant en compte la position des éléments d'état interne Δ dans l'horizon, on diminue donc la sensibilité au paramètre "r", car les points d'état interne Δ situés près du fond de labour sont protégés de l'action qui, chaque année en surface, simule celle des outils de reprise et du climat.

Une autre hypothèse concernant le paramètre "r" est celle de la stabilité de la profondeur de reprise d'une année sur l'autre. Comme il semble difficile d'admettre que le réglage de la profondeur des outils de reprise ait, dans la pratique, une telle constance, il nous a paru judicieux de faire varier cette valeur de façon aléatoire entre deux bornes raisonnables. C'est ce que nous avons fait en tirant au sort, à chaque année de la simulation, une profondeur de reprise de 4, 6 et 8 cm.

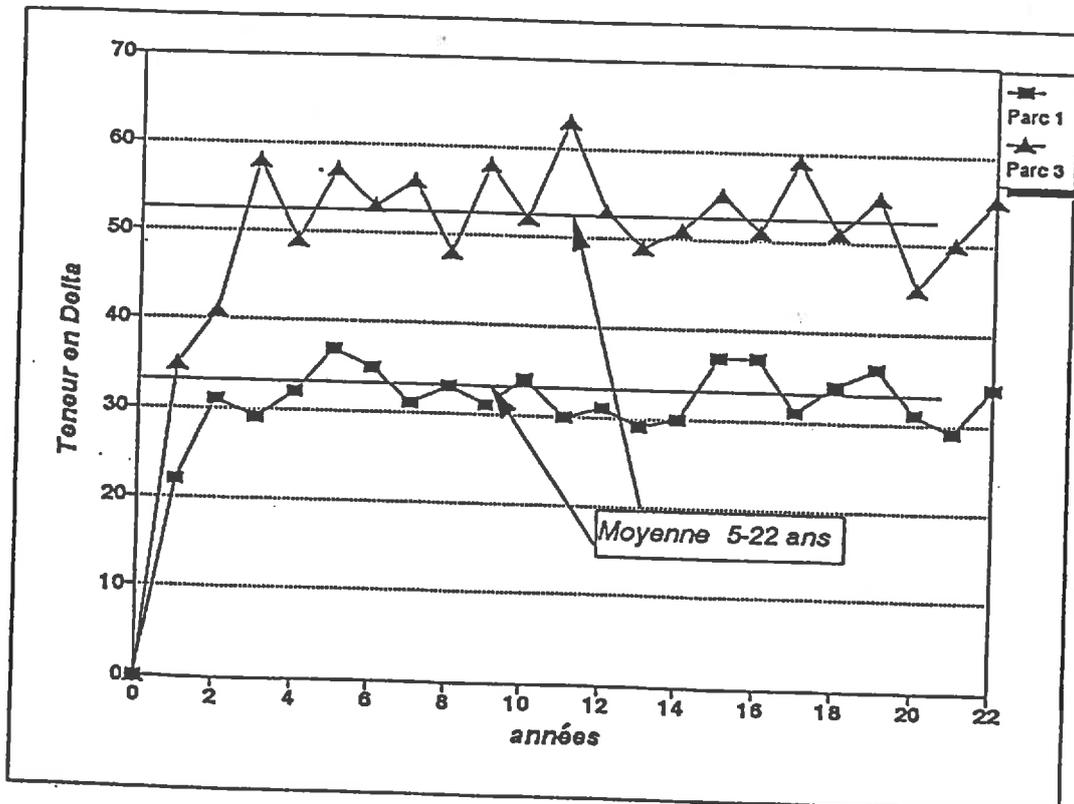


Figure III-29 : Simulation de l'évolution des teneurs moyennes en delta pour les parcelles 1 et 3

Tirage aléatoire tous les ans de la valeur de "r" et de la position du compartiment compacté lors des récoltes de maïs dans la parcelle 3.

Les résultats sont présentés à la figure III-29, où l'on a mis en comparaison l'évolution de la teneur en Δ des parcelles 1 et 3. On constate que l'indicateur fluctue autour d'une valeur moyenne nettement distincte pour les deux situations. Cette valeur moyenne est par ailleurs très proche de la valeur à l'équilibre obtenue en prenant un taux de disparition constant entre années, correspondant à une profondeur de reprise de 4 cm.

La sensibilité à la valeur de "r" apparaît donc fortement diminuée par l'introduction dans la simulation de conditions plus réalistes de disparition des éléments d'état interne Δ .

L'outil de simulation point à point permet également de revenir, pour terminer ce chapitre, sur l'hypothèse concernant la "durée de vie" du Δ . Nous avons vu en programmant sur tableur les équations du modèle compartimental, qu'après arrêt de tout tassement une fois atteint le régime stationnaire, une fraction du Δ (5 %) était encore présente en L3 une dizaine d'année plus tard (figure II-21). En adaptant le programme point à point à ces conditions de fonctionnement (en supprimant tout tassement une fois atteint le régime stationnaire, toujours dans les conditions de la parcelle 1), la proportion de Δ en H5-L3 passe sous le seuil des 10 % en 3 ans, et n'est plus que de 3,8 % 5 ans après l'arrêt du tassement en L1.

Mais la technique de simulation point à point permet de mieux rendre compte encore de la dynamique réelle de création et de disparition du Δ dans la couche labourée : outre qu'elle traduit la répartition spatiale du Δ dans cette couche, elle intègre également le fait que certains points d'état interne Δ sont, en étant déplacés de la position L3 vers la position L1 lors du labour, compactés à nouveau ("rajeunis" en quelque sorte), ce qui est le cas en situation réelle.

Nous avons adapté notre programme informatique en enregistrant l'"âge" de chaque point d'état interne Δ (en mémorisant la date du tassement l'ayant forcé à cet état). Nous présentons à la figure III-30 la distribution des âges des éléments d'état interne Δ de L3, obtenue après dix ans de simulation dans les conditions de la parcelle 1. On observe que 55 % environ des points Δ ont été formés l'année qui précède l'observation (lors des travaux après labour), et qu'au total, 12 % des points ont 5 ans et plus. Seuls 3 % des points (situés au voisinage du centre de gravité des compartiments centraux) échappent durablement aux reprises et ont plus de 8 ans.

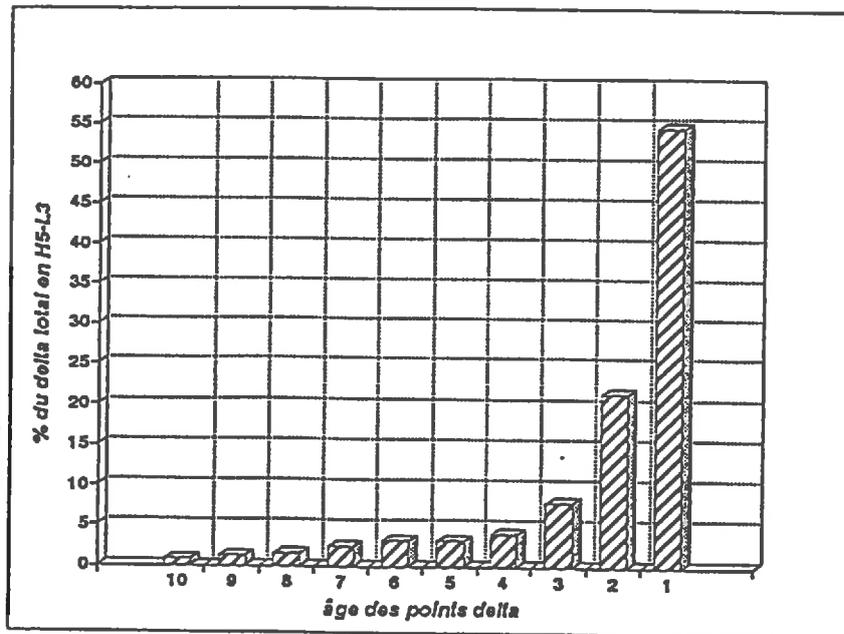


Figure III-30 : Distribution des âges des points d'état interne Δ en L3 (parcelle 1). L'"âge" correspond au nombre d'années écoulées entre le tassement et l'observation.

Notons que si l'on disposait d'éléments de connaissance des relations texture-climat permettant de fixer, dans un contexte physique donné, la durée de persistance du Δ , on pourrait en tenir compte dans notre mode de représentation du fonctionnement de la couche labourée. Cette perspective serait particulièrement intéressante pour des textures plus argileuses que celles de Grignon, dans des situations fortement marquées par le gel hivernal. Dans ce cas en effet, l'observation des profils culturaux au champ montre l'existence d'une fragmentation intense, sous l'effet des agents climatiques, des mottes d'état interne Δ qui se divisent en éléments de calibre inférieur au seuil des 2 cm considéré dans ce travail comme la limite entre motte et terre fine.

6. CONCLUSION

L'analyse critique des principales hypothèses sous-jacentes à la construction de notre modèle amène à conserver les conclusions énoncées à l'issue de la deuxième partie de ce mémoire : les simplifications par rapport aux processus réels d'évolution de l'état structural, rendues nécessaires par la formalisation du fonctionnement du système étudié, ne remettent en cause ni l'hypothèse de base de notre travail, ni la capacité de l'indicateur proposé à différencier les systèmes de culture sur la base de leurs effets cumulatifs sur l'état structural. Que ce soit la coïncidence entre compartimentage et découpage par la charrue, le mode de retournement des bandes de terre lors du labour ou la répartition spatiale du Δ , les simplifications faites ne modifient pas l'allure de l'évolution de l'indicateur et jouent peu sur ses valeurs à l'équilibre. La distribution des éléments d'état interne Δ entre compartiments de L3 est, par contre très sensible au positionnement de la charrue par rapport au compartimentage effectué sur le profil. Ce résultat renforce le choix de l'indicateur de l'effet à long terme des systèmes de culture, et plus précisément celui du niveau auquel cet indicateur doit être évalué : l'ensemble de la position L3 de l'horizon H5 du motif caractérisant le système de culture.

Cette étude critique nous a également amené à perfectionner le type de représentation du mouvement des bandes de terre lors du labour, perfectionnement qui nous a permis de proposer une technique de simulation qui autorise la prise en compte de la répartition spatiale des éléments d'état interne delta au sein du profil, et plus particulièrement de localiser leur disparition en surface. Ce nouveau mode de représentation du fonctionnement de la couche labourée, plus proche des conditions réelles d'évolution de l'état structural quoiqu'encore très simple, s'avère plus robuste que le précédent aux variations du paramètre "r", fixant le taux de disparition du Δ . De plus, il n'implique pas d'hypothèse trop contraignante sur la durée de persistance des éléments d'état interne Δ dans le profil. Enfin, il permet de dresser une cartographie de la répartition au sein de la couche labourée des éléments d'état interne Δ , cartographie qu'il est possible de rapprocher d'observations morphologiques de profils cultureux.

Pour ces trois raisons, nous conserverons l'outil de simulation point à point dans le prochain chapitre.

Nous nous proposons, dans ce dernier chapitre, de tester le modèle en l'appliquant à un ensemble de parcelles d'agriculteurs pour lesquelles nous disposons des informations nécessaires : observations de l'état du profil cultural d'une part, connaissance des successions de cultures, des itinéraires techniques et des conditions lors des interventions d'autre part.

CHAPITRE II :

TEST DU MODELE ET PERSPECTIVES D'UTILISATION

POUR L'ÉTUDE DES EFFETS CUMULATIFS

DES SYSTEMES DE CULTURE SUR L'ÉTAT STRUCTURAL

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on se propose de tester les possibilités d'utilisation du modèle dans des conditions réelles, qualificatif auquel ne peuvent prétendre les parcelles expérimentales de Grignon.

Ces dernières sont en effet caractérisées par :

- *une géométrie des passages (et donc un compartimentage du profil) simple*, due à l'emploi d'outils de reprise et de semis ayant la même largeur et à la localisation aux mêmes endroits des passages successifs,

- *une localisation stricte des limites des parcelles et, par conséquent, de la position L3 d'une année sur l'autre*. Nous avons signalé en introduction que ceci correspondait au souci des expérimentateurs de disposer de planches de semis aussi homogènes que possible du point de vue de l'état structural, et nous avons montré que cet objectif ne pouvait être atteint en raison du déport latéral par la charrue des zones tassées.

Si ces conditions rendaient les situations du Centre particulièrement adaptées à la mise au point et au test du modèle ainsi qu'à la validation de l'indicateur, elle sont peu susceptibles de se retrouver hors des parcelles expérimentales étudiées. Il nous faut donc, pour en tester les possibilités, utiliser le modèle avec une configuration plus complexe de géométrie des passages et donc avec des règles moins strictes de positionnement d'une année sur l'autre des compartiments du profil.

Il faut également reconsidérer les règles d'apparition du Δ dans le profil (le flux d'entrée dans le système). C'est en effet la répétition des passages au même endroit au cours de l'année, qui, malgré des conditions d'humidité très variées selon les opérations, assure un tassement maximal dans la position L1 des parcelles expérimentales. Celle-ci représente, de plus, une proportion importante de la couche labourée en raison de la faible largeur des outils employés. Dans les systèmes de grande culture, les outils utilisés lors des opérations de semis, de reprise ou de récolte ayant des largeurs bien supérieures à 1,75 m, les compactages affectent une plus faible partie du volume de la couche labourée à chaque passage. Mais, surtout, ces passages ne sont pas localisés toujours aux mêmes endroits, et l'on ne peut plus considérer que chacun crée à coup sûr du Δ ; les conditions d'humidité lors de ces opérations (en interaction avec les caractéristiques des équipements employés qui déterminent l'intensité des contraintes appliquées) vont donc jouer un rôle déterminant dans le processus de création du Δ .

Nous réaliserons cette étude en deux temps.

En premier lieu, nous confronterons les simulations à des données obtenues par enquête dans des parcelles d'agriculteurs dans une région de grande culture céréalière. Cette première étape nous permettra d'évaluer les possibilités d'utilisation de notre modèle (et de la technique de simulation point à point) dans les conditions de la pratique agricole.

Cette confrontation doit permettre également de montrer si les hypothèses sur le déterminisme de l'évolution de l'état structural au champ que nous faisons sont réalistes.

Dans un second temps, nous reviendrons sur l'aptitude de l'indicateur "*teneur en delta de H5-L3*" à différencier les systèmes de culture sur la base de leurs effets à long terme sur la structure. Nous avons, dans la première partie de ce mémoire, exposé les raisons théoriques qui nous ont conduit à retenir cet indicateur. Dans la seconde partie, nous avons montré qu'il permettait de différencier les systèmes de culture pratiqués à Grignon, dans les conditions particulières du Centre Expérimental, et les premières simulations effectuées avec des règles de fonctionnement des systèmes de culture très proches de celles pratiquées sur le Centre, n'ont pas démenti ce résultat. Il nous paraît donc nécessaire, à ce stade de l'étude, de tester l'aptitude de l'indicateur dans des conditions proches de celles observées sur le terrain. Cependant, les résultats des observations menées dans le réseau de parcelles mentionné ci-dessus ne permettent pas de mener directement cette étude sur la base des teneurs en Δ observées, en raison essentiellement du fait que les systèmes de culture enquêtés ne couvraient pas une gamme large de conditions d'évolution de la structure. Nous procéderons donc par simulation, en nous plaçant dans des conditions comparables à celles décrites lors de l'enquête du point de vue des caractéristiques géométriques des équipements employés, mais en faisant varier les systèmes de culture et le climat pour créer des conditions contrastées d'évolution de l'état structural, et tester ainsi la sensibilité de l'indicateur.

2. TEST DU MODELE PAR SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DE L'ÉTAT DU PROFIL CULTURAL DES PARCELLES ENQUETÉES LORS DE L'ÉTUDE "ROTATIONS CÉRÉALIÈRES INTENSIVES"

Nous utiliserons dans cette partie les observations réalisées dans le cadre d'un dispositif d'enquête mis en place lors de l'étude Rotations Céréalières Intensives⁽¹⁾.

Cette étude avait pour objet, dans une région agricole (le Thymerais en Eure et Loir) choisie pour l'abondance et la diversité de ses systèmes céréaliers et l'existence de problèmes culturaux dans certains d'entre eux, d'effectuer une **étude diagnostique de ces systèmes**. Dans une première phase, on a réalisé l'inventaire des terrains et des systèmes de culture de la zone d'étude (Capillon *et al.*, 1985). Dans une deuxième phase, de diagnostic sur la conduite du blé d'hiver, on a retenu un échantillon de 55 parcelles de blé d'hiver appartenant à onze agriculteurs. Ces parcelles ont fait l'objet d'un suivi approfondi tout au long du cycle de cette culture, lors de la campagne 1986/87.

1. Convention RCI, ONIC/INRA/ITCF ; coordonnateurs : Gérard Monnier et Hubert Manichon, 1989.

En particulier, des profils cultureux ont été décrits dans toutes les situations, en mars 1987. On a également reconstitué l'histoire culturelle de chaque parcelle (nature et date des interventions, caractéristiques des équipements employés,...) sur une période de huit ans avant l'enquête. L'objectif était, d'une part d'évaluer dans quelle mesure l'état structural avait pénalisé le fonctionnement de la culture du blé, d'autre part d'étudier la relation "itinéraire technique-état du profil", en tenant compte des caractéristiques permanentes du milieu, afin d'identifier les déterminants des états observés.

Le schéma de la figure IV-1 présente le principe de la démarche permettant de tester le modèle à partir de ces situations. Il s'agit de confronter le résultat des observations de terrain à ceux fournis par le modèle de simulation, que l'on a paramétré pour tenir compte des caractéristiques des parcelles enquêtées.

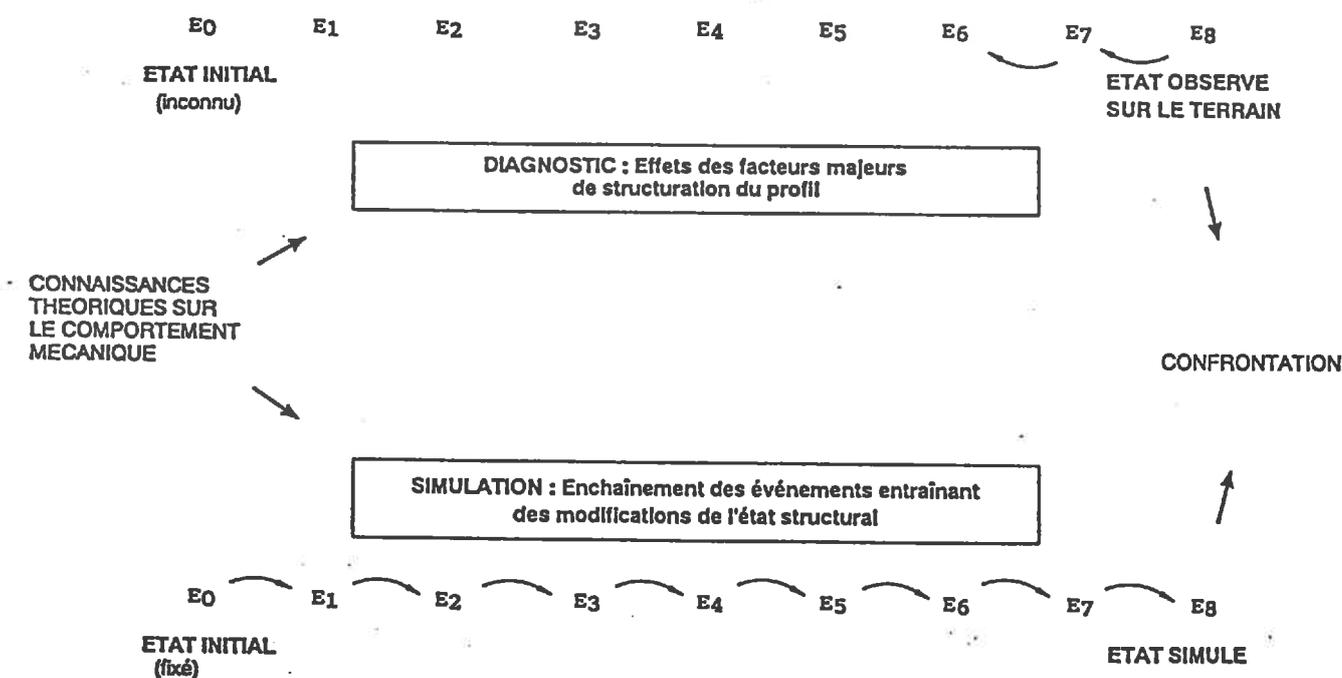


Figure IV-1 : Principe de la démarche pour le test du modèle de simulation

Ainsi ce sont les résultats de deux démarches indépendantes qui sont comparés. Ces deux démarches comportent toutefois une base commune : dans les deux cas, on considère que la structure du sol est le résultat d'une histoire mécanique de la parcelle, caractérisée par une succession d'actions dont les effets (tassement ou fragmentation) sont plus ou moins intenses selon les conditions d'application de la contrainte (état initial, humidité,...).

Lors du diagnostic sur le terrain, on cherche à reconstituer cette histoire. La méthode de description du profil culturel a d'ailleurs été conçue en vue de cet objectif, la partition et la description morphologique permettant de mettre directement en relation la caractérisation de la structure avec les facteurs majeurs de structuration du profil (Manichon, 1982 ; Cf. *supra*

l'analyse bibliographique du chapitre 1). Les résultats des observations réalisées sur les 55 parcelles du dispositif en 1987 ont ainsi été mises en correspondance avec les itinéraires techniques et les conditions climatiques de l'année d'observation et de celle qui la précède. A partir de l'ensemble des connaissances théoriques (préexistant et indépendant des situations observées) sur l'effet des équipements et du climat, on a pu établir une série d'hypothèses explicatives sur l'évolution récente de l'état structural des parcelles enquêtées. Cette reconstitution est partielle, dans la mesure où l'on ne tient compte que d'une partie des facteurs agissant sur l'évolution structurale et qu'on ne peut remonter très loin dans l'histoire : on ne peut prendre en compte que les événements dont les effets sont visibles dans le profil au moment de l'observation(2).

Tout en reposant sur le même ensemble de connaissances théoriques préexistantes, la démarche de simulation est inverse : à partir d'un état initial que l'on fixe (cf infra), huit ans avant la date d'observation, on reconstitue la succession des événements entraînant des modifications de l'état structural, en les enchaînant au cours du temps.

Le test du modèle repose sur la confrontation entre états simulé et observé. **Il ne s'agit donc pas ici de caler le modèle sur les observations de terrain, mais bien de tester la cohérence de l'ensemble des hypothèses qui sous-tendent la modélisation.** Celles-ci portent sur le choix des facteurs agissant sur l'évolution structurale, leurs mécanismes d'action et les caractéristiques géométriques du système.

Après avoir présenté les situations étudiées, nous exposerons, dans un premier temps, les résultats des observations faites en 1987, ainsi que les règles d'interprétation proposées ; nous en déduirons les règles de fonctionnement et le paramétrage de notre programme de simulation point à point, puis nous confronterons les profils simulés à ceux décrits sur le terrain.

2.1. Présentation des situations étudiées

Chaque parcelle du réseau d'enquête est caractérisée par deux ensembles de variables descriptives :

- les caractères permanents du terrain,
- l'histoire culturelle antérieure à l'année d'enquête, et les éléments descriptifs de l'itinéraire technique de la campagne d'étude (1986/87).

a. Les terrains

Les parcelles de l'enquête ont été choisies de manière à recouvrir la variabilité des caractères permanents du milieu et des systèmes de culture de la région. Une première

2. Remarquons cependant que l'analyse des "âges" des points d'état interne Δ , effectuée au chapitre précédent, montre la prédominance des points d'âge récent, ce qui conforte la validité de cette approche diagnostique.

série d'observations a permis de classer les terrains des 55 parcelles en deux grands groupes (TF et TC), à partir des caractéristiques de surface et des grands traits de leur comportement au champ (Tableau IV-1). On s'attend, à la lecture de ce tableau, à ce que ces caractéristiques jouent assez fortement sur l'évolution des états structuraux : ainsi, la texture et la charge en éléments grossiers des horizons de surface vont conditionner le comportement mécanique à la fragmentation et au compactage ; les caractéristiques hydrodynamiques sont également variables d'un type à l'autre, et cela joue sur la vitesse de ressuyage et donc les conditions d'humidité au moment des interventions.

	Types de terrain	
	TC	TF
Comportement au champ		
. Battance	+	+
. Excès d'eau	++	+
. Adhésivité	+	++
Couche labourée		
. Texture	L	LA
. Charge en cailloux	++	0
Sous-sol		
. Texture	LA	AL
. Charge en cailloux	+++	0
. Hydromorphie	+	++
Réserve Utile estimée (mm/m)	50-70	> 100

Légende :

- L : Limon ; LA : Limon Argileux ; AL : Argilo Limoneux
 0 : Caractère absent
 + : Caractère parfois présent
 ++ : Caractère toujours présent, mais peu marqué
 +++ : Caractère toujours présent.

Tableau IV-1 : Caractéristiques des types de terrain représentés dans l'échantillon d'enquête

b. L'histoire culturelle

Etant donné le thème central de l'étude, les successions de culture pratiquées sur les parcelles enquêtées présentent toutes une forte proportion de blé d'hiver (en 1987, 70% environ des terres labourables de la région portaient cette culture). Certaines parcelles sont cultivées en blé depuis huit ans au moins avant l'étude, les autres successions intègrent pois, tournesol, colza, escourgeon, et maïs.

Les informations recueillies auprès des agriculteurs comprenaient les intitulés et la date des opérations effectuées, ainsi que les caractéristiques géométriques des matériels.

Les itinéraires techniques pour l'implantation des blés comprennent systématiquement un labour.

Les travaux réalisés avant cette opération comprennent la récolte du précédent cultural (systématiquement effectuée à l'aide d'une moissonneuse-batteuse, quelle que soit la nature de la culture), les épandages d'engrais de fond et le traitement des résidus de récolte : un déchaumage lorsque la culture qui précède le blé est une céréale ou le broyage des résidus suivi de leur enfouissement superficiel lorsqu'il s'agit de maïs ou de tournesol.

Le labour est dans certains cas (19 sur 55) réalisé très tôt, en septembre, le plus souvent en conditions sèches. Il est immédiatement suivi d'un travail du sol, qui est donc caractérisé par le même état hydrique. Cette reprise du labour est effectuée à l'aide d'une herse simple ou d'un croskill, à grande vitesse. La largeur de travail de ces outils est de trois ou quatre mètres suivant les cas. L'opération de semis elle-même est alors décalée dans le temps par rapport à cette reprise du labour.

Dans les autres cas, le labour est effectué plus tard (en octobre ou novembre) en conditions plus humides. La reprise et le semis sont alors réalisés simultanément, à l'aide d'un outil combiné herse rotative/semoir (en 3 ou 4 mètres de largeur), immédiatement après le labour.

Dans tous les cas, le tracteur était équipé, au semis, de roues jumelées à l'arrière et d'un rouleau tasseur à l'avant. Ces dispositifs visent d'une part à éviter un tassement excessif de la couche labourée, par une meilleure répartition de la contrainte, d'autre part à niveler la surface de la parcelle avant le passage du semoir. Le rouleau tasseur prend appui sur la surface située entre les roues du tracteur. Pour des raisons pratiques (forte résistance à l'avancement en sol meuble si la pression appliquée est trop forte, problème de résistance aux contraintes mécaniques du pont avant) il ne peut être réglé de façon à obtenir un appui énergétique au sol. Dans ces conditions, ce dispositif a essentiellement un rôle de nivellement facilitant le semis, et, en bout de raie, un rôle analogue à celui des masses d'alourdissement placées à l'avant du tracteur, pour éviter le cabrage de ce dernier lors des manoeuvres. En aucun cas, on a observé la création de tassements sévères (de Δ) par ce dispositif. Nous n'en tiendrons pas compte dans l'analyse qui va suivre.

Les itinéraires d'implantation du blé dans cette région apparaissent donc assez semblables entre parcelles ; nous verrons que l'observation des profils révèle malgré cela une assez forte variabilité des états structuraux obtenus. L'une des raisons en étant *l'humidité au moment des interventions*, qui conditionne le comportement mécanique de la terre à la fragmentation comme au compactage, il était important de pouvoir l'évaluer.

En l'absence de mesures d'humidité du sol au moment de chacun des travaux, on a dû procéder à des estimations, basées sur le calcul de l'évolution du **taux de remplissage de la réserve en eau maximale de la couche labourée**. Les bilans hydriques ont été calculés à partir de données climatiques locales (postes de Rueil et de Senonches pour l'ETP, plusieurs postes - dont ceux de certains agriculteurs - pour la pluviométrie). Pour chaque parcelle, une valeur de réserve en eau maximale de la couche travaillée a été calculée, en tenant compte de la composition granulométrique et de la charge en éléments grossiers. Les valeurs sont comprises, pour l'ensemble de l'échantillon, entre 20 et 60 mm.

En postulant, pour toutes les parcelles, une réserve en eau nulle au 10 août 1986, l'évolution de l'état hydrique de la couche labourée a été estimée en considérant un fonctionnement de type "*bi-couche*", à l'humectation comme à la dessiccation : on a considéré que les variations d'humidité des couches profondes ne se produisaient qu'après remplissage total (ou dessèchement total) de la couche travaillée.

Pour *chaque opération culturale*, on a pu alors définir trois modalités d'état hydrique :

- **SEC**, lorsque la réserve en eau était inférieure à 20% de la réserve en eau maximale,
- **MOYENNEMENT HUMIDE** : réserve comprise entre 20 et 60% de la RU_{max},
- **HUMIDE** : pour les valeurs de taux de remplissage supérieures à 60% de la RU_{max}.

Ces seuils sont arbitraires, on ne visait ici qu'à classer les situations entre elles, en définissant des grands groupes de conditions.

c. Description des profils culturaux

Les observations ont toutes été réalisées durant la première quinzaine de mars 1987. Dans chaque parcelle, une fosse, perpendiculaire au sens du labour et des travaux d'implantation, d'une largeur correspondant au moins à une demi-largeur de semoir (1,5 ou 2 mètres) a été décrite, en utilisant la méthode de description morphologique proposée par Manichon (Manichon, 1982 ; Gautronneau & Manichon, 1987), et basée sur une description des états structuraux au sein de compartiments délimités par une double partition du profil (Cf. *supra*, 1ère partie, chapitre II). D'un point de vue méthodologique, on fait donc ici l'hypothèse qu'une seule fosse d'observation (dont on a raisonné la taille et l'emplacement) est représentative de l'ensemble de l'état structural de la parcelle, et permet de discuter la relation entre système de culture et état du profil.

- Dans notre échantillon, la **partition verticale** délimite :
 - un horizon H1, créé lors de l'implantation du blé par la herse animée, de faible épaisseur (4 à 6 cm) ;
 - un horizon H5, labouré non repris.

Etant donné la date d'observation et l'influence des agents climatiques depuis le semis, on n'a pas tenu compte, dans les interprétations, de l'état de l'horizon H1. *Ainsi, on ne tiendra compte pour la description des profils et l'interprétation de leur état structural que de l'horizon H5(3).*

- La partition latérale dressée dans chaque situation permet de distinguer :

- *des positions L2* liées au semis (emplacements situés au droit des roues du tracteur lors du semis). Positionnées sans ambiguïté par rapport aux bords de semoir, elles sont aisément repérables au champ(4) ;

- *des positions L3*, situées entre les roues du tracteur réalisant l'opération de semis.

Le motif géométrique correspondant à ces itinéraires techniques est donc finalement assez simple : suivant les cas, sa largeur est de trois ou quatre mètres. En toute rigueur, il faudrait y ajouter les compartiments correspondant aux passages de roues (très visibles en surface) lors des épandages d'azote et des traitements en cours de culture. Cependant, dans les cas étudiés, les largeurs d'épandages sont de 24 à 32 mètres ; ces compartiments ne représentent donc qu'une faible proportion du volume total de la couche travaillée (3 à 4%), et nous avons choisi de les négliger, en plaçant les fosses d'observation hors de ces traces.

- L'état structural a ensuite été décrit dans chacune de ces strates, en considérant deux niveaux d'organisation de la structure :

- *l'état interne* des éléments structuraux (Δ ou Γ),

- *le mode d'assemblage* et le calibre de ces derniers, caractérisé par l'une des trois modalités suivantes (Gautronneau & Manichon, 1987) : "o" (structure fragmentaire fine), "b" (structure fragmentaire constituée de mottes au moins décimétriques) et "c" (structure continue).

La surface occupée sur la face d'observation par chacun des états décrits a été notée par compartiment.

3. Ces observations au champ comportaient cependant l'analyse des horizons sous-jacents. Aucun symptôme ne révélant une variation sensible de la profondeur de labour entre l'année d'observation et les précédentes, nous considérerons que celle-ci est constante, et ne tiendrons pas compte, dans la modélisation, de ces horizons, qui ne font pas partie du système étudié.

4. il existe aussi des positions L2, liées aux opérations situées entre le labour et le semis (quand elles existent, dans 19 cas sur 55 lorsque le labour est précoce), et dont la localisation exacte n'est pas aussi facile. En l'absence de tassement très marqué dans ces positions (ces travaux ont été effectués tôt, en conditions sèches et à grande vitesse), on ne les a pas distinguées des positions L3.

2.2. Diagnostics

Une analyse détaillée de ces résultats, est présentée dans Manichon *et al.*, (1988) et Coulomb *et al.*, (1990). Nous n'exposerons ici que la synthèse de ces résultats, nécessaire à la compréhension des éléments d'interprétation présentés ci-après.

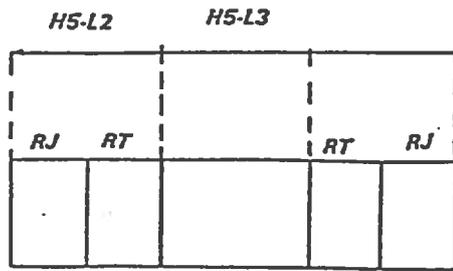
Les 55 profils observés ont été regroupés en cinq types, sur la base des états dominant dans les compartiments H5-L3 et H5-L2 (figure IV-2).

- Les types 1 à 3 présentent un état du compartiment H5-L3 de type $o\Gamma$, (mottes poreuses de petit calibre, abondance de terre fine et forte porosité structurale). Ces profils se distinguent par l'état des positions L2 : $o\Gamma$ pour le type 1, $c\Gamma$ et $c\Delta$ pour le type 2, et $c\Delta$ uniquement pour le type 3 (structure continue à très faible porosité structurale).

- Les profils du type 4 présentent un compartiment H5-L3 $b\Gamma$ (mottes poreuses de gros calibre - >10 cm -, séparées par des cavités importantes, notamment entre bandes de labour), et un compartiment H5-L2 $c\Gamma$ (structure continue, mais présentant une porosité structurale importante).

- Enfin, les profils du type 5 présentent un compartiment H5-L3 dont l'état structural dominant est de type $b\Delta$ (éléments structuraux analogues à ceux du compartiment H5-L3 des profils 4, mais dont la porosité interne est fortement réduite) ; l'état structural en H5-L2 est de type $c\Delta$.

En effectifs, les deux premiers types de profil dominant largement les autres. On analysera successivement les éléments de diagnostic sur l'effet du labour puis de l'implantation du blé.



Profil 1

répartition



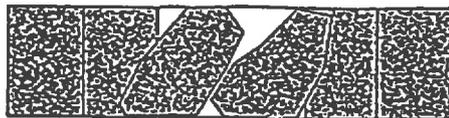
Profil 2



Profil 3



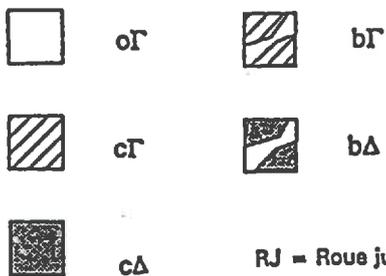
Profil 4



Profil 5

Type de profil	Nombre de parcelles
1	17
2	19
3	6
4	9
5	4
Total	55

Légende



RJ = Roue jumelée
 RT = Roue arrière du tracteur

Figure IV-2 : Les cinq types de profils identifiés

N.B. : On a réalisé, sur chacune des faces d'observation, une estimation visuelle de la proportion d'état internes Δ dans chacun des compartiments de H5. Ceux-ci ont été répartis en trois classes ordonnées non équidistantes : très faible ou nulle, moyenne et forte. Les compartiments notés Γ sur la figure appartiennent au deux premières classes, ceux notés Δ à la troisième.

a. Analyse de l'effet du labour

L'un des effets principaux du labour est la division des bandes de terre ; cela nous amène à distinguer les types 1, 2 et 3, fortement fragmentés, des type 4 et 5, où l'état "b" dominant en L3 caractérise une fragmentation plus limitée de bandes de labour. Plusieurs facteurs sont susceptibles d'être invoqués :

- *La présence ou non d'éléments grossiers dans la couche travaillée*, qui induit un comportement différent à la fragmentation, celle-ci étant plus facile en terrain caillouteux (TC), les points de contact entre cailloux et terre fine étant autant de zones sensibles à la rupture (Hénin, 1976).

- *L'état structural avant le passage de la charrue*. Cet état conditionne fortement le résultat de cette opération, et en particulier le degré de fragmentation atteint (Gautronneau & Manichon, 1987). Il dépend de l'histoire culturale et, en particulier des *conditions d'humidité au moment de la récolte du précédent cultural*. Il n'existe, dans notre échantillon, que deux modalités pour l'humidité au cours des travaux antérieurs au labour : "sec" et "humide". La première correspond aux précédents récoltés au début de l'été (céréales, colza, pois) ; la seconde à certaines récoltes tardives (maïs, tournesol).

- *L'humidité de la terre au moment du labour* qui conditionne la résistance mécanique du matériau (Koolen & Kuipers, 1989). En conditions sèches dans ce type de texture, la cohésion est forte, et l'on s'attend à un degré de fragmentation moindre qu'en conditions moyennement humides ou humides, lorsque la résistance mécanique est plus faible.

- *Les caractéristiques de la charrue* ; Gill & Vandenberg, (1967) soulignent l'influence de la dimension des volumes de sol découpés par la charrue sur l'intensité de la fragmentation, dans les domaines de consistance rigide. Les profondeurs de travail étant peu variables dans cet échantillon (25 à 27 cm), c'est essentiellement la largeur de prise du soc qui peut faire varier ce volume. Ces largeurs varient de 16 à 20 pouces (40,6 à 50,8 cm).

Les autres caractéristiques du labour (vitesse d'avancement et forme du versoir) n'ont pas été retenues. Concernant le premier point, outre que les vitesses d'avancement sont probablement peu variables entre parcelles, les travaux de Coulomb (1991) montrent, dans des textures voisines, que ce facteur est bien moins important sur le résultat du labour que l'état structural initial.

L'analyse du tableau IV-2, permet de discuter de l'effet de ces différents facteurs, sachant qu'ils interviennent de manière combinée dans chacune des situations. L'étude portant ici sur l'état de H5-L3, les profils des types 1, 2 et 3 sont regroupés.

On constate que lorsque les travaux antérieurs au labour ont été effectués en conditions humides, l'état obtenu est $b\Delta$, quelles que soient les modalités des autres

opérations (4 cas sur 4). On retrouve ici le caractère déterminant de ce facteur sur le tassement de la couche à labourer, et sa conséquence sur la fragmentation des bandes de labour, déjà notés dans plusieurs travaux (Manichon & Sebillotte, 1973 ; Tardieu & Manichon, 1987).

CONDITIONS D'HUMIDITE LORS DU LABOUR		CONDITIONS D'HUMIDITE LORS DE LA RECOLTE DU PRECEDENT :								
		SEC				HUMIDE				
TYPE DE TERRAIN		Moyennement Humide ou Humide		Sec				Sec	Humide	
		Caillouteux		Non- caillouteux		Caillouteux		Non- caillouteux	Non- caillouteux	
Largeur des socs- employés (pouces)		16	> 16	16	> 16	16	> 16	> 16	> 16	16-20
Etat de H5-L3	oΓ	3	8	15	5	10	1	-	-	-
	bΓ	-	-	-	-	1	4	4	-	-
	bΔ	-	-	-	-	-	-	-	1	3

Tableau IV-2 : Ventilation des états de H5-L3 observés en fonction des différentes modalités des facteurs étudiés

Lorsque les travaux antérieurs au labour ont été réalisés en conditions sèches, l'humidité au moment du labour lui-même constitue un second facteur discriminant. S'il s'agit de conditions humides ou moyennement humides, on obtient toujours un état oΓ (31 cas sur 31). S'il s'agit de conditions sèches, le degré de fragmentation des bandes dépend de la largeur des socs : avec une largeur de 16 pouces on obtient un état oΓ dans 10 cas sur 11 en TC, alors que, pour des largeurs supérieures (18 ou 20 pouces), la fragmentation est plus limitée et l'état obtenu est bΓ dans 4 cas sur 5. La différence des effectifs entre ces deux modalités incite cependant à la prudence. On remarque toutefois que les données en TF n'infirmant pas ce résultat.

b. Analyse des effets de l'implantation du blé

Les facteurs pouvant jouer sur la structure des compartiments H5-L2 sont, outre

l'état laissé par le labour, l'humidité au moment de l'implantation ainsi que les caractéristiques des équipements utilisés (poids du tracteur, report de charge entre avant et arrière, vitesse d'avancement, types de pneumatiques, pressions de gonflement,...).

Les données dont nous disposons concernent l'état hydrique au moment de l'implantation et l'état structural initial, que l'on déduit de l'état des compartiments H5-L3, indemnes d'actions de compactage ou de fragmentation par les outils depuis le labour. On ne dispose pas, en revanche, d'information concernant les réglages des équipements employés.

Les résultats sont présentés au tableau IV-3, où l'on a reporté les états de H5-L2 observés en fonction de l'état initial et des conditions d'humidité au semis.

Humidité au semis	Etat avant semis (H5-L3)								
	o Γ			b Γ			b Δ		
Etat de H5-L2	S	MH	H	S	MH	H	S	MH	H
o Γ	10	7	-	-	-	-	-	-	-
c Γ	-	-	-	8	1	-	-	-	-
c Γ + c Δ	9	6	4	-	-	-	-	-	-
c Δ	-	3	3	-	-	-	1	-	3

Tableau IV-3 : Etats de H5-L2 en fonction des états initiaux avant semis et de l'humidité lors de l'implantation du blé

- Lorsque l'état initial est o Γ (42 situations sur 55)(5) :

- en conditions sèches au semis, il n'est pas transformé lors du semis dans 10 cas sur 19 (profils 1), l'état de H5-L2 obtenu dans les 9 autres cas étant c Δ sous les roues du tracteur, c Γ dans les compartiments correspondant aux roues jumelées (profils 2) ;

- à l'inverse, lorsque les conditions au semis sont humides (modalité H), il y a systématiquement évolution, l'état observé en H5-L2 étant de type mixte (c Γ et c Δ , profils 2) ou c Δ (profils 3) ;

- pour la modalité intermédiaire d'humidité au semis (MH), on observe dans 9 cas une évolution de l'état structural, qui passe, au moins partiellement, de o Γ à c Δ , et une stabilité de l'état pour les 7 autres situations.

- Lorsque l'état initial est b Γ (9 situations sur 55), et que les conditions au semis

5. Rappelons que l'état de H5-L3 est assimilé à l'état obtenu directement après le labour, appelé ici état initial.

sont sèches (8 cas sur 9) ou moyennement humides (1 cas sur 9), l'état structural évolue de $b\Gamma$ à $c\Gamma$ (profil 4).

- Enfin, lorsque l'état initial est $b\Delta$ (4 cas), l'état observé en H5-L2 est $c\Delta$, que les conditions d'humidité au semis soient sèches (1 cas sur 4) ou humides.

Ces résultats suggèrent l'existence d'effets autres que ceux des facteurs examinés au tableau IV-3. En particulier les caractéristiques des équipements utilisés lors du semis ou leurs réglages (pression de gonflement des pneumatiques) jouent certainement sur l'état obtenu. Cette hypothèse semble confirmée par la comparaison d'exploitations pour lesquelles on dispose de plusieurs parcelles, qui révèle l'existence d'"effets agriculteurs" assez nets (Tableau IV-4).

	Humidité au semis	Etat de H5 - L2		
		$o\Gamma$	$c\Gamma + c\Delta$	$c\Delta$
Exploitation 09 (10 parcelles)	S	2	6	-
	MH	-	1	1
Exploitation 38 (6 parcelles)	S	1	-	-
	MH	5	-	-

S : Conditions sèches ; MH : Conditions moyennement humides

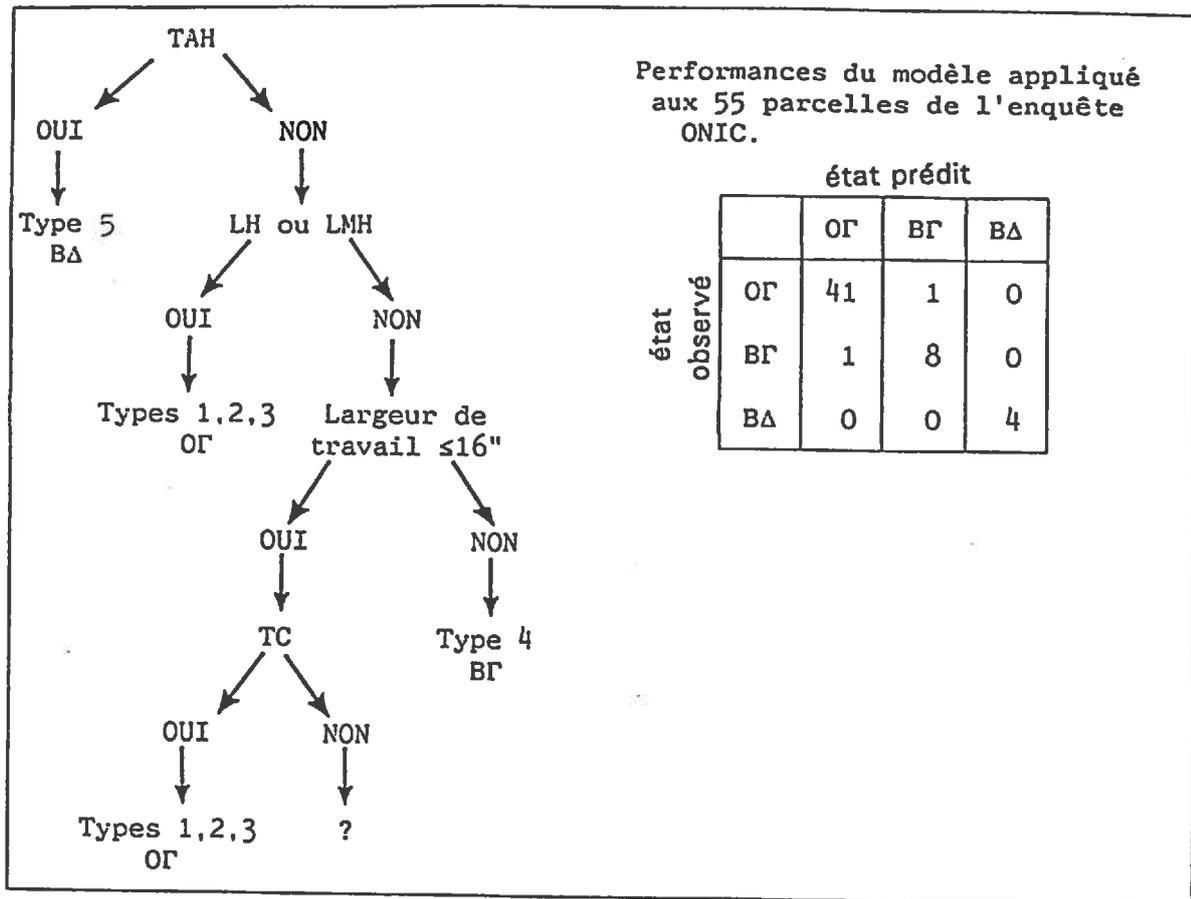
Tableau IV-4 : Comparaison des états obtenus en H5-L2 dans les parcelles de 2 exploitations de l'échantillon d'enquête, en fonction des conditions d'humidité au semis (Pour toutes les parcelles des 2 exploitations, l'état de H5-L3 observé est $o\Gamma$)

Dans l'exploitation 09, ce sont les situations tassées qui dominent, même en conditions sèches au semis. Dans l'exploitation 38 au contraire, dans les mêmes types de sols, on n'observe pas de tassement sous les roues, même en conditions moyennement humides. L'objectif de diminution du tassement par une répartition égale des charges entre les roues du tracteur et les roues jumelées semble bien avoir été atteint dans ce deuxième cas, alors qu'il ne l'a pas été dans le premier.

c. Discussion et règles d'interprétation des états observés

L'analyse de ces 55 parcelles permet d'élaborer deux modèles qualitatifs de prévision de l'évolution de l'état du profil cultural.

Le diagramme de la figure IV-3 présente le premier de ces modèles, concernant la prévision de l'effet du labour sur l'évolution de l'état du compartiments H5-L3 du profil. En choisissant comme variables d'entrée l'état structural initial, l'humidité au moment de l'opération, la largeur de travail des corps de charrue et la charge en éléments grossiers de la couche travaillée, il prédit l'état obtenu après labour, pour les combinaisons de modalités de ces variables présentes dans le dispositif. Sur les 55 cas étudiés, 53 présentent un état du compartiment H5-L3 qui correspond aux prévisions du modèle.



- TAH** = Travaux avant labour en conditions humides
- LH** = Labour en conditions humides
- LMH** = Labour en conditions moyennement humides
- TC** = Présence de cailloux dans la couche travaillée
- ?** = cas non représenté dans l'échantillon

Figure IV-3 : Modèle pour la prévision des états obtenus après labour

Le second modèle, relatif à la prévision de l'évolution de l'état structural sous l'effet de l'implantation du blé, est présenté au tableau IV-5. En fonction de l'état structural avant implantation (trois modalités sont présentes dans le dispositif oΓ, bΓ et bΔ), il donne l'état obtenu en L2 après implantation, en fonction des conditions d'humidité (Sec, Moyennement Humide ou Humide) lors de cette opération. Lorsque les conditions sont sèches (modalité S), l'état avant semis n'est pas modifié. Lorsqu'elles sont humides (modalité H), l'état obtenu est cΔ, quel que soit l'état initial. La règle de décision proposée pour la modalité intermédiaire (MH) est que seul le niveau d'assemblage des éléments structuraux soit affecté (ce type de comportement correspond par exemple aux observations de Papy, 1984). On a présenté au tableau IV-6 les performances de ce modèle de prévision appliqué aux 55 parcelles du dispositif.

	Etat avant semis (H5 - L3)								
	oΓ			bΓ			bΔ		
Humidité au semis	S	MH	H	S	MH	H	S	MH	H
Etat de H5-L2	oΓ	cΓ	cΔ	bΓ	cΓ	cΔ	bΔ	cΔ	cΔ

Tableau IV-5 : Modèle de prévision de l'état de H5-L2 en fonction de l'état structural initial et des conditions d'humidité au semis

	Moins tassé que prévu	Accord avec le modèle	Plus tassé que prévu
Total	20	23	12
Terrains non caillouteux	7	10	12
Terrains caillouteux	13	13	-

Tableau IV-6 : Performances du modèle de prévision de l'état de H5-L2 en fonction de l'état structural initial et des conditions d'humidité au semis

On constate que l'accord est nettement moins bon que pour le modèle de prévision de l'état de H5-L3, puisqu'il ne concerne que 23 parcelles sur 55. Les règles retenues apparaissent par ailleurs "pessimistes", surtout dans les terrains caillouteux ; les désaccords concernent en effet dans ce cas plutôt les situations moins tassées que prévu.

2.3. Simulation des situations étudiées

Deux types d'informations sont fournies en entrée au modèle :

- celles concernant la nature des opérations culturales, les caractéristiques géométriques des outils employés, ainsi que la répartition spatiale des compactages,
- et celles définissant les conditions d'humidité au moment de ces opérations.

Le programme simule l'évolution de la répartition des états internes au sein d'un motif représentatif de la parcelle, dont la taille dépend des caractéristiques géométriques des équipements. La couche travaillée est représentée par un réseau de points définis par leurs

coordonnées et la nature de leur état interne (Δ ou non- Δ). Le programme calcule par ailleurs, l'évolution de la teneur en Δ , en évaluant, chaque année dans le compartiment H5-L3, la proportion de points d'état interne Δ .

a. Caractéristiques géométriques des outils employés, et règles de localisation des passages

Concernant la culture du blé, pour l'ensemble des parcelles de l'échantillon, les itinéraires techniques ont peu varié sur la période étudiée et correspondent à la description qui en a été faite plus haut. La nature des opérations et les caractéristiques des équipements employés sont identiques pour ce qui concerne les cultures d'escourgeon, de colza et de pois protéagineux.

La largeur du motif géométrique représentatif que nous retiendrons sera donc de 3 ou 4 mètres, selon le type d'équipement utilisé lors des semis de cultures d'hiver. Ce faisant, nous négligerons :

- les passages de roues entre le semis et la récolte (traitements, épandages d'engrais); ces passages n'affectent qu'une proportion très faible de l'ensemble de la parcelle (3 à 4 %);

- les passages de roues lors des interventions postérieures aux récoltes d'été et antérieures au labour (épandages d'engrais de fond, déchaumages). Ces opérations, réalisées à la fin de l'été, se sont déroulées en conditions sèches sur l'ensemble de la période concernée, ce qui permet de ne pas en tenir compte dans cette simulation.

Pour les cultures de printemps, nous ne disposons pas de toutes les informations concernant la nature des équipements employés lors de l'implantation. Cet obstacle à l'utilisation du modèle dans le cas de parcelles présentant ces cultures (maïs et tournesol) dans la succession, a cependant pu être levé dans la mesure où, dans les cas étudiés, les conditions d'humidité lors des semis de printemps n'ont jamais été pénalisantes, selon les règles prises.

Nous diviserons ce motif en compartiments correspondant aux bandes de labour. La largeur de ces compartiments est fixée à 40 cm, ce qui correspond à une largeur de prise du soc de 16 pouces, la plus fréquente dans notre échantillon. Le mode de retournement des bandes lors du labour est celui présenté au chapitre précédent (double pivotement, puis glissement le long de plans parallèles à l'axe d'inclinaison de la bande). Le sens de versement se fait alternativement, d'une année sur l'autre, vers la droite et vers la gauche.

Les profondeurs de travail retenues sont de 25 cm pour le labour, (valeur la plus fréquemment observée en 1986), et de 6 cm pour les opérations de fragmentation superficielle.

Enfin, la localisation des passages de roues est déterminée par tirage au sort, pour toutes les opérations hors récolte. Lors de récoltes dégradantes, par contre, nous faisons une hypothèse maximaliste en admettant que l'ensemble de la couche travaillée est affectée, sur toute sa profondeur.

b. Scénarios de simulation

Au cours de la période de simulation, chaque situation est caractérisée par une série d'évènements (création, disparition et transfert entre compartiments) qui dépendent de la nature des interventions, et, pour ce qui concerne le tassement, du climat en interaction avec le type de sol :

Le transfert de Δ est régi par les modalités de déplacement des points lors du labour. Ces modalités ne varient pas entre années, le modèle ne tient donc pas compte, pour ce transfert, ni de l'état structural antérieur, ni de l'état hydrique lors du labour.

La disparition de Δ intervient lors des opérations impliquant une action de fragmentation superficielle intense. Les points en surface, (sur une profondeur de 6 cm) sont alors forcés à l'état interne non delta. Là encore, on ne prend pas en compte l'effet des conditions (état initial, humidité) lors de ces opérations sur le résultat de la fragmentation.

La création de Δ est conditionnée par l'état hydrique du sol lors de l'intervention. Dans le programme, lorsque le taux de remplissage de la RUmax dépasse 60%, tous les points situés au droit des roues du tracteur lors de l'opération correspondante sont forcés à l'état interne Δ . Le modèle d'évolution de la réserve utile de la couche travaillée est celui présenté précédemment. L'évolution du bilan dépend des valeurs quotidiennes de la différence P-ETP, de la texture de la terre fine et de la charge en cailloux. A titre d'illustration, on présente à la figure IV-4 l'évolution du taux de remplissage de la réserve en eau du 10 août au 31 octobre 1986 (poste de Senonches), pour différentes valeurs de RUmax. On constate que durant la deuxième décennie d'octobre (période d'implantation du blé), le seuil des 60% de taux de remplissage n'est franchi que pour les RUmax les plus élevées.

On peut ainsi retracer, pour chaque parcelle de l'échantillon, une séquence d'évènements ayant entraîné une modification de l'état interne selon les hypothèses faites. On recense ainsi 10 scénarios dans l'échantillon des parcelles enquêtées (tableau IV-7). Chacun est bâti à partir (i) des caractéristiques du semoir (largeur), (ii) de la succession des cultures, et (iii) des évènements climatiques ayant déterminé les conditions d'intervention au semis et à la récolte.

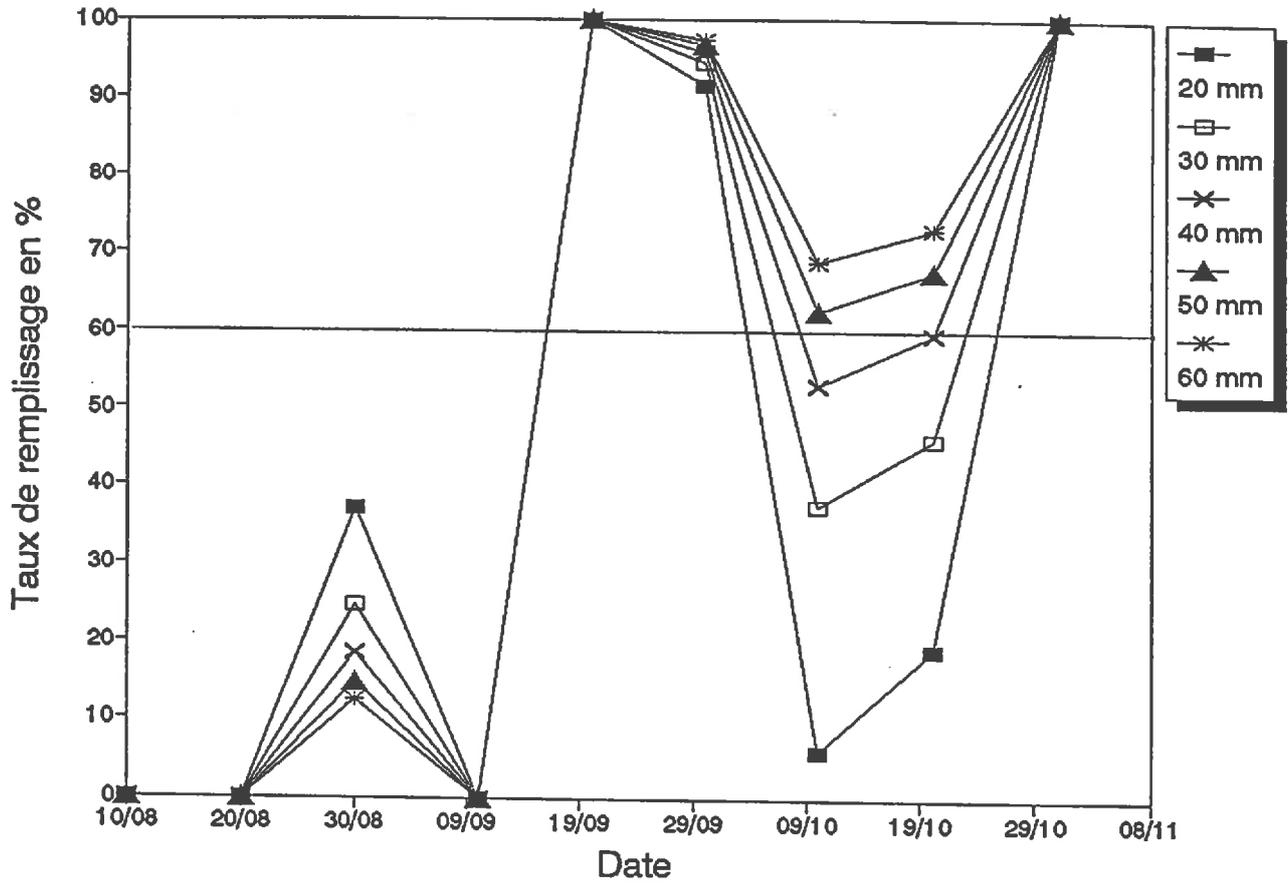


Figure IV-4 : Exemple d'évolution du taux de remplissage de la réserve en eau maximale de la couche labourée (Chaque courbe correspond à une valeur de R_{Umax})

Scénario	Parcelles correspondantes	Largeur semoir	Histoire culturale (Année de récolte)								Type de profil observé
			87	86	85	84	83	82	81	80	
1	0402	4 m	C B T B B B B T B	5							
			Se H S H S H H S S R - H S S S S H S								
2	3806 4206	3 m	C B T B B P B B E	5							
			Se H S H S H H S S R - H S S S S S S								
3	4202 B801 B802 2502 3104 3105 0201	3 m	C B C E B B B T B	4							
		3 m	B T B B P B T P								
		3 m	B T E E B B ME E								
Se S S S S H H S S R - S S S S S H S											
4	A813 0914	3 m	C B B B C B P C B	4							
		3 m	B B B B B B B B								
Se S S S S H H S S R - S S S S S S S											
5	0901 0904 0906 4210 0403 0404 4205 A814 2501 3901 4211 B803 A801	4 m	C B B B B B B B B	1 ou 3							
		4 m	B P B B C B B B								
		4 m	B T B B C B B B								
4 m	B C B B C B E C										
Se S S H S H H S S R - S S S S S S S											
6	3801 3802 3805 3804 A805 A807	3 m	C B B B P B B B P	1							
		3 m	B B B P B P E B								
3 m	P B B P B B B P										
Se S S S H H H S S R - S S S S S S S											
7	0407 0408 F101 3807 F102 A808	4 m	C B B B B B B B B	2 ou 3							
		4 m	B P B B B B B B								
		4 m	B B B C B B B B								
4 m	B B B B P B B P										
Se H S H S H H S S R - S S S S S S S											
8	0405 0406	4 m	C B B B ME B B B B	2 ou 3							
			Se H S H S H H S S R - S S S S S S S								
9	0903 0905 0908 0909 0910 0912 0913 3902 A804 A806 B804 4201 4204 4208 4209	4 m	C B B B B B B B B	2							
		4 m	B B B B B B B B								
		4 m	B B B B B B B B								
4 m	B C E B B E B B										
Se S S S S H H S S R - S S S S S S S											
10	A802	4 m	C B T B B B B T B	5							
			Se S S H S H H S S R - H S H S S H S								

Tableau IV-7 : Description de l'histoire des parcelles de l'enquête ONIC

Légende :

C = Cultures (B = Blé, E = Escourgeon, C = Colza, P = Pois, ME = Maïs ensilage, T = Tournesol)
 Se = Conditions d'humidité lors de l'implantation (S = Sec, H = Humide)
 R = Conditions d'humidité à la récolte (S = Sec, H = Humide)

On peut observer qu'un même scénario d'évolution peut correspondre à des successions différentes (scénario 3 par exemple), ou qu'une même succession engendre des scénarios différents, en raison d'un décalage des dates d'intervention ou d'un effet terrain, à travers la valeur de R_{Umax} (parcelle 0910, scénario 5 et parcelle 0407, scénario 7, par exemple).

Enfin, l'état initial de la couche travaillée a été fixé sans Δ au sein de la couche labourée. Ce parti pris se justifie étant donnée la longueur de la période de simulation ; en effet, de deux choses l'une :

- ou une opération de récolte en conditions dégradantes intervient, et l'état du profil est forcé à 100% de Δ à ce moment, et le choix de l'état initial n'a pas d'importance ;
- ou ce type d'événement n'intervient pas, et le système évolue vers un état d'équilibre atteint assez rapidement, comme l'ont montré les résultats des chapitres précédents. Sur une période de huit ans donc, on peut penser que le choix des conditions initiales n'influe pas sur le résultat final. Nous le vérifierons cependant, en faisant varier l'état de départ, pour un même scénario.

c. Résultats de la simulation et confrontation avec les observations

Chaque parcelle a ainsi été simulée à l'aide du scénario lui correspondant (annexe 9). On présente ici à titre d'exemple une parcelle de l'échantillon, avant de présenter les résultats synthétiques sur la teneur en Δ de H5-L3, puis la morphologie d'ensemble des profils.

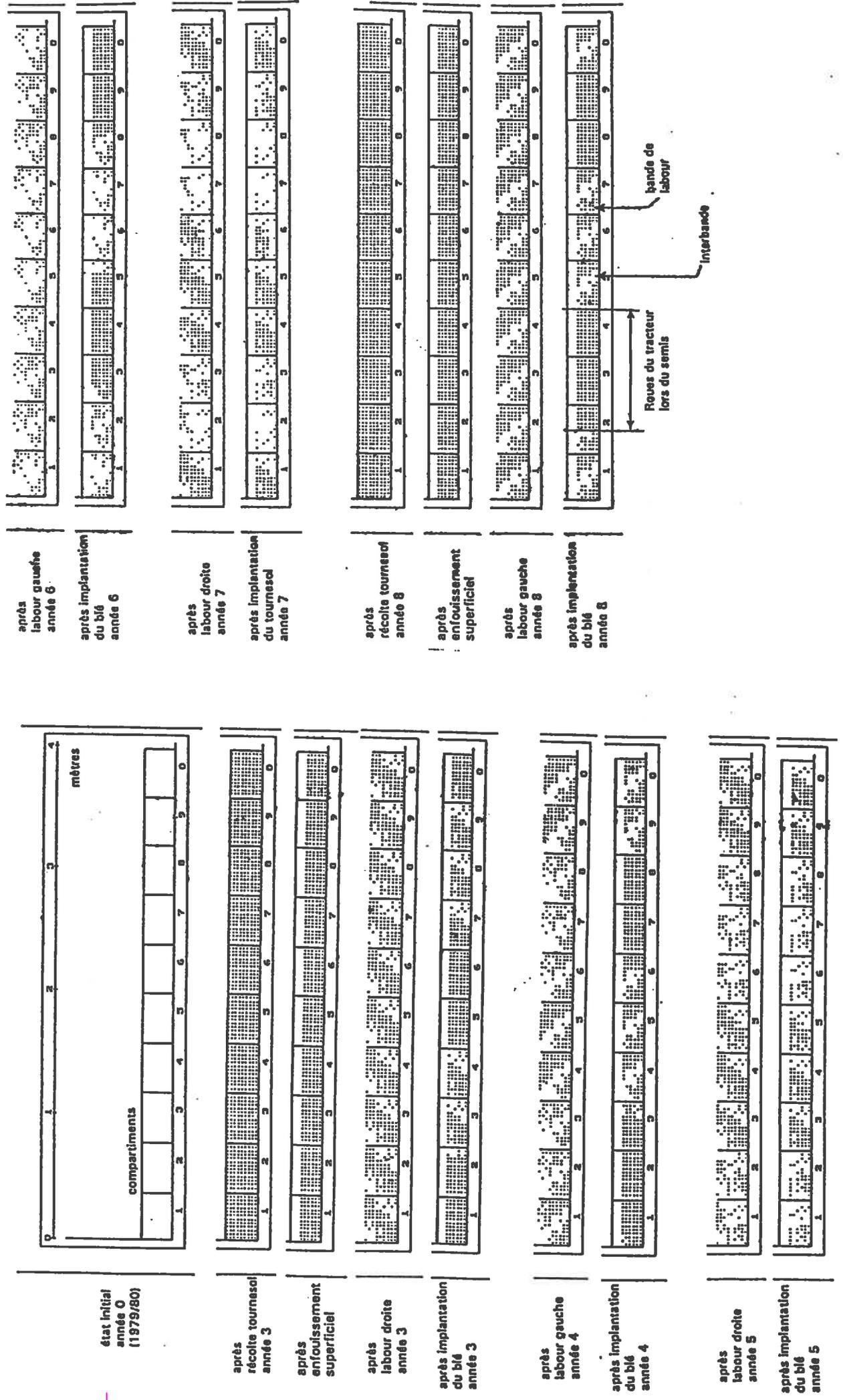
1. EXEMPLE DE LA PARCELLE 0402 (SCENARIO 1)

On a représenté à la figure IV-5 l'évolution de l'état de la couche labourée de la parcelle 0402 (scénario N°1), pour les huit années de la simulation. Sur cette parcelle, les opérations d'implantation du blé sont effectuées avec un combiné herse rotative/semoir, en 4 mètres de largeur, le tracteur étant équipé de roues jumelées à l'arrière. L'implantation du tournesol est par contre réalisée à l'aide d'un semoir six rangs, après reprise du labour, le même jour, avec un passage de vibroculteur et un passage de rouleau croskill (4 m). Cependant, dans la mesure où les conditions d'humidité n'étaient pas défavorables lors des deux implantations de tournesol (la deuxième et la septième année), nous n'avons pas eu à tenir compte de ces interventions. La largeur des pneumatiques est de 16,9 pouces (0,43 m). La charrue utilisée pour le labour, qui a lieu tous les ans, est une quadrisoc 16 pouces (0,406 m de largeur de prise de soc)⁽⁶⁾. Le motif est donc divisé en 10 compartiments, correspondant chacun à une bande de labour de 0,4 mètre de large.

Par convention, nous prenons comme point de départ de l'année, l'état après récolte de la culture précédente.

6. Le sens de versement du labour a été fixé arbitrairement vers la droite les années impaires

Figure IV-5 : Simulation de l'évolution de l'état du profil culturel de la parcelle 0402 (Scénario 1)



Nous n'avons représenté, sur les schémas de la figure IV-5, que les points dont l'état interne est Δ . Nous n'avons par ailleurs fait figurer que les événements entraînant une modification de l'état structural à travers, soit une redistribution des points lors du labour, soit une création de Δ lorsqu'un compactage intervenait en conditions humides, soit une disparition de points d'état interne Δ lors de façons superficielles.

C'est pourquoi aucun point n'est figuré sur le premier schéma, représentant l'état initial. Le schéma suivant est celui du profil la troisième année, après récolte du tournesol, car cette opération est la première à créer du Δ , dans ce scénario. L'opération d'enfouissement superficiel des résidus de récolte qui suit fait disparaître le Δ en surface. Lors de l'implantation du blé, les conditions d'humidité ont entraîné un tassement sous les roues du tracteur, qui ont été positionnées par tirage au sort dans le motif. Lors de cette opération, il y a également disparition de Δ en surface par action de la herse rotative.

En procédant de la même manière pour les années suivantes, on obtient après l'implantation du blé de la campagne 1986/87, un profil dont l'état structural se caractérise par :

- des positions L2 homogènes pour lesquelles tous les points correspondants sont d'état interne Δ .
- des positions L3 (hors roues d'implantation) caractérisées par l'alternance de zones comprenant des points groupés, d'état interne Δ (les bandes de labour), et de zones d'interbande sans points Δ .

Le programme calcule également chaque année la proportion de points d'état interne Δ dans le compartiment H5-L3. Dans cet exemple, la valeur obtenue la 8ème année, est de 60%.

Lors de l'observation sur le terrain, le profil décrit dans la parcelle 0402, de type 5, se caractérisait par un état-type $c\Delta$ en H5-L2, et $b\Delta$ hors roues d'implantation. **Il apparaît que la physionomie du profil simulé se rapproche de celle du profil de type 5 présenté à la figure IV-2.**

2. TENEUR EN Δ DU COMPARTIMENT H5-L3

Le programme évalue la teneur surfacique en Δ , en calculant le rapport du nombre de points d'état interne Δ au nombre total de points constituant le compartiment H5-L3.

Nous devons ici faire une remarque de même nature que celle émise au chapitre 2, sur la comparaison des valeurs fournies par le modèle et estimées sur le terrain : il ne s'agit pas ici de comparer deux manières d'évaluer la même variable ; la teneur en Δ du compartiment H5-L3 a fait l'objet, sur le terrain, d'une *estimation visuelle*, qui a permis de classer les compartiments en trois classes de teneur (cf. la légende de la figure IV-2) : faible ou nulle, moyenne et forte.

La comparaison entre ces estimations et les valeurs calculées par le programme est présentée sur la figure IV-6.

On constate que 45 situations sur 55, rangées, après estimation visuelle sur le terrain, dans la classe des teneurs faibles ou nulles, correspondent à des scénarios menant à des teneurs à l'équilibre inférieures à 20 % (scénarios 3 à 9), alors que 6 parcelles correspondant à ces mêmes scénarios ont été affectées à la classe moyenne de teneur. Pour les quatre parcelles qui correspondent aux scénarios 1, 2 et 10, toutes ayant été rangées, sur le terrain, dans la classe des teneurs élevées, le programme prévoit une teneur de l'ordre de 60 %.

Dans l'échantillon enquêté, le critère de teneur en Δ estimé avait permis de distinguer deux groupes de profils : ceux dont la teneur était très élevée (les 4 situations présentant un profil de type 5), et les 51 autres parcelles, dont la teneur était beaucoup plus faible, dans lesquelles l'état interne Γ et la terre fine dominaient en H5-L3, avec un état de type o Γ (profils 1, 2 et 3) ou b Γ (profils 4).

Ce classement est respecté par la simulation, pour laquelle on distingue également deux groupes de valeurs correspondant aux mêmes parcelles.

Valeurs de teneur en delta en H5-L3 (%) calculées				
S2	60 %	0	0	2
S10, S1		0	0	1+1
Z				
S6	20 %	5	1	0
S5		13	0	0
S8		1	1	0
S3	10 %	4	3	0
S4		2	0	0
S7		5	1	0
S9		15	0	0
Classe de teneur en Delta				
	FAIBLE OU NULLE	MOYENNE	FORTE	
Nombre total de parcelles	45	6	4	

Figure IV-6 : Comparaison entre les valeurs de teneur en Δ de H5-L3 calculées et estimées sur le terrain

Les chiffres indiquent, dans chaque colonne, le nombre de parcelles, rangées par classe de teneur et par scénario.

Les scénarios (Sx) sont classés par valeur de teneur en delta de H5-L3 calculée croissante.

Ainsi, comme pour les parcelles expérimentales à Grignon, mais dans des situations où les conditions d'évolution de l'état structural sont beaucoup moins maîtrisées, on obtient par simulation un classement des systèmes de culture identique à celui décrit sur le terrain.

C'est ce point qui nous paraît le plus important pour le test du modèle : en effet, comme nous l'avons signalé au chapitre 2 en comparant les valeurs simulées à celles obtenues en parcelle expérimentale, il est toujours possible de choisir un jeu de paramètres permettant d'ajuster le résultat de la simulation à une observation donnée. Ainsi, par exemple, en ne changeant que la profondeur de reprise simulée (en la fixant à 3 cm au lieu de 6 cm), le teneur en Δ pour le scénario 2 passe de 61 à 70%. Ce qui compte, c'est qu'avec le même jeu de paramètres pour toutes les situations, on obtienne un classement des parcelles identique à celui observé sur le terrain.

Le modèle permet donc, à partir de données recueillies dans les conditions d'une enquête en parcelles d'agriculteurs, et donc beaucoup moins précises que dans un dispositif expérimental, de simuler, **sans dérive grave liée à l'enchaînement des opérations culturales au cours des huit années**, l'évolution de l'indicateur teneur en Δ de H5-L3. Ce résultat, qui est bien en accord avec le principe (Manichon & Sebillotte, 1973) de l'interdépendance des états successifs d'une parcelle soumise à un système de culture, renforce la plausibilité des hypothèses faites sur le rôle des caractéristiques de l'itinéraire technique.

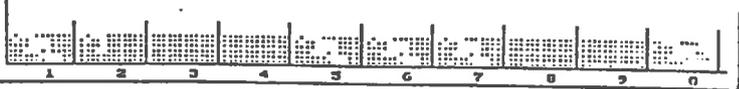
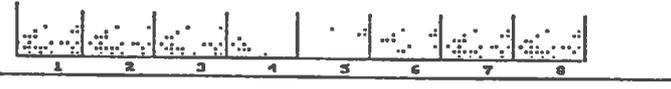
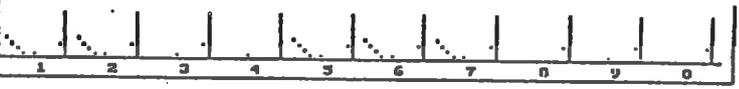
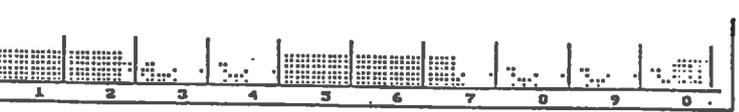
	Numéro du Scénario	Sorties graphiques
CLASSE A	1	
	2	
CLASSE B	3	
	4	
	5	
	6	
	9	
CLASSE C	7	
	8	
CLASSE D	10	

Figure IV-7 : Les 4 classes de profils simulés par le modèle

3. MORPHOLOGIE D'ENSEMBLE DES PROFILS

La technique de simulation mise au point permet d'obtenir une sortie graphique de l'état structural des horizons décrits, qu'il est tentant de rapprocher des cartes réalisées sur le terrain lors de l'enquête.

On a placé à l'annexe 9, les simulations correspondant aux différents scénarios, en utilisant les mêmes règles de présentation que pour la figure IV-5. Les dix sorties graphiques peuvent être regroupées en 4 classes (figure IV-7) :

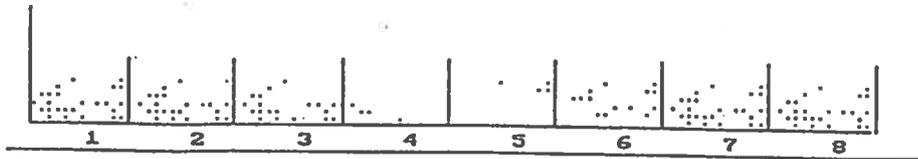
- une première classe, notée *A*, à laquelle appartient l'exemple que l'on vient de traiter, obtenue à partir des scénarios 1 et 2, et dont on a vu que l'on pouvait la rapprocher du type 5 observé sur le terrain ;

- la classe *B*, de profils simulés est caractérisée par la prédominance de points d'état interne non delta dans l'ensemble de l'horizon labouré non repris. On ne note pas de différence significative entre compartiments L2 et L3, pour ce qui concerne la teneur et la répartition des points d'état interne Δ ; en particulier, il n'y a pas d'amas de points Δ regroupés en certains endroits du profil. Cette catégorie peut donc être rapprochée du type 1, dans nos observations de terrain (ensemble de l'horizon H5 présentant un état-type $o\Gamma$) ; les profils de cette classe sont obtenus à partir des scénarios 3, 4, 5, 6 et 9 ;

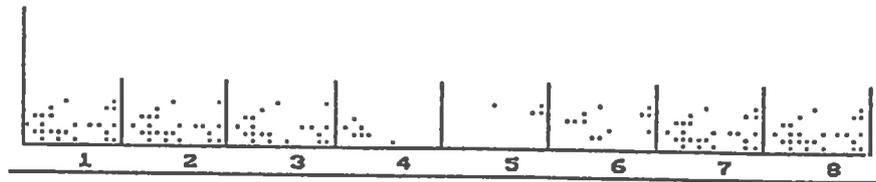
- la classe *C*, comprend les profils obtenus à partir des scénarios 7 et 8, pour lesquels les états des compartiments H5-L2 sont différents de ceux des compartiments H5-L3. Ces derniers sont constitués d'une faible proportion de points d'état interne Δ , non groupés, alors que les positions L2 ressemblent à celles de la classe *A*, constituées exclusivement de points Δ . L'état des compartiments H5-L2 peut donc être rapproché de la modalité $c\Delta$, celui des compartiments H5-L3 de la modalité $o\Gamma$, et les profils de cette classe du type 3 des observations de terrain.

- enfin, la classe *D*, qui n'est représentée que par une seule parcelle (A802), et correspond au scénario N°10, présente un profil dont l'ensemble de l'horizon H5 présente un aspect que l'on peut rapprocher de la modalité $b\Delta$. Ce profil simulé n'est donc comparable à aucun de ceux observés sur le terrain. Il est cependant proche du type 5 ($b\Delta$ en H5-L3 et $c\Delta$ en H5-L2).

Afin de vérifier que ces sorties ne dépendent pas de la condition initiale (sans delta) retenue, on a vérifié que le résultat final (après huit ans de simulation) n'était pas modifié en choisissant comme état initial celui observé à la figure IV-7. On a porté à la figure IV-8 les 2 sorties ainsi obtenues dans le cas du scénario 6.



Etat de la parcelle 3801, obtenu après 8 années de simulation, à partir d'un état initial sans Δ



Etat de la parcelle 3801, obtenu après 8 années de simulation, en partant d'un état l'année 0 identique à celui obtenu ci-dessus

Figure IV-8 : Comparaison des états simulés obtenus en prenant 2 états initiaux différents

Avec les règles de correspondance entre état simulé et état observé résumées au tableau IV-8, on observe que l'on peut prédire trois catégories de profils parmi les cinq observées sur le terrain.

Classe de profil simulé	Etat simulé en		Que l'on rapproche de :		
	H5-L2	H5-L3	H5-L2	H5-L3	Profil
Classe A	Tous les points Δ sont Δ	Amas de points Δ séparés par des zones non Δ	$c\Delta$	$b\Delta$	5
Classe B	Dominance de points non Δ , non groupés		$o\Gamma$ ou $c\Gamma$	$o\Gamma$	1
Classe C	Tous les points Δ sont Δ	dominance de points non Δ non groupés	$c\Delta$	$o\Gamma$	3
Classe D	Amas de points Δ , séparés par des zones non Δ		$b\Delta$	$b\Delta$	-

Tableau IV-8 : Règles pour le rapprochement entre les sorties graphiques de la simulation et les profils observés sur le terrain

Les deux profils que l'on n'obtient pas par simulation, sont les profils de type 2 et 4.

- pour les profils de type 4 on observe sur le terrain un état de H5-L3 de type $b\Gamma$, c'est-à-dire avec un état interne Γ dominant, et la présence de mottes décimétriques (blocs). Dans la mesure où la représentation porte sur les points delta, il ne nous est pas possible de simuler ce type d'état. Il y a là une impossibilité liée à la constitution même du modèle. La simulation fournit toutefois des profils dans lesquels l'état non-delta est dominant, ce qui est cohérent avec ce que l'on a observé sur le terrain ;

- Les profils de type 2, sont caractérisés par une variabilité des états observés au sein du compartiment H5-L2, que l'on avait attribuée à un mauvais réglage des roues jumelées utilisées lors de l'implantation du blé. Ce type d'information sur le réglage des équipements n'ayant pas été enregistré lors de l'enquête, nous n'avons pu l'utiliser pour notre modèle (bien qu'il soit tout à fait possible d'intégrer dans le programme ce type d'information, en considérant par exemple qu'en conditions humides, seules les roues du tracteur tassent le sol, cas qui pourrait correspondre à une situation où l'agriculteur n'abaisserait pas la pression de gonflage des roues du tracteur après montage des roues jumelées). Nous excluons donc aussi les parcelles présentant des profils de type 2 du

tableau IV-9, établissant la comparaison entre les résultats de la simulation et les observations, tableau dans lequel nous avons rapproché les profils où l'état interne non Δ domine (1 et 4) et ceux pour lesquels le nombre d'éléments Δ est majoritaire (3 et 5).

		PROFILS SIMULES		
		1	3	5
P R O F I L S O B S E R V E S	4	9	-	-
	1	17	-	-
	3	3	3	-
	5	-	-	3 + 1 (1)

(1) 3 profils des scénarios 1 et 2 + le profil du scénario 10

Tableau IV-9 : Comparaison entre les sorties de la simulation et les observations de terrain

On constate que :

- lorsque *les profils observés étaient de type 4*, la simulation produit un profil de type 1, pour lequel l'état interne dominant est non delta ;
- dans tous les cas où *les profils observés étaient de type 1 ou 5*, la simulation a produit un profil comparable ;
- cette proportion est de 3 sur 6 dans le cas des *profils de type 3*.

2.4. Conclusion

Si l'on analyse les performances du modèle par type de compartiment, on constate qu'il y a accord entre simulation et observation pour 46 situations sur 55, en ce qui concerne le type d'état structural du compartiment H5-L3. Les 9 désaccords concernent les profils observés de type 4, pour lesquels on a vu que la simulation était cependant cohérente avec l'observation sur le plan des états internes.

Ainsi, les performances du modèle apparaissent satisfaisantes pour la prévision de l'état interne des mottes dans le compartiment H5-L3, donc pour la prévision des effets cumulatifs du système de culture sur l'état structural, objet pour lequel le modèle a été conçu.

Les désaccords entre simulation et observation portent essentiellement sur l'état des compartiments H5-L2, c'est-à-dire sur la reconstitution de l'histoire récente de la parcelle. Pour cette reconstitution, on a déjà eu l'occasion de souligner d'une part la difficulté que présentait, en situation d'enquête, l'évaluation des conditions d'humidité, d'autre part le manque d'information concernant les paramètres pouvant influencer sur l'effet des opérations d'implantation autres que l'état hydrique et l'état initial. Ce sont d'ailleurs ces raisons qui expliquent les limites du diagnostic réalisé en 1987.

En d'autres termes, le modèle se révèle faible sur ce point essentiellement par manque de données permettant de prédire les conditions d'humidité entraînant le tassement.

Les hypothèses entrées dans le modèle apparaissent donc cohérentes dans leur ensemble. En particulier, l'enchaînement des règles d'action sur l'état du profil pendant les huit ans de la période de simulation n'entraîne pas de divergence de l'état global du système.

3 - APTITUDE DE L'INDICATEUR "TENEUR EN DELTA DE H5-L3" A DIFFERENCIER L'EFFET DES SYSTEMES DE CULTURE SUR L'ETAT STRUCTURAL

3.1. Simulation

Nous utiliserons le modèle avec le même paramétrage que précédemment pour comparer, sous un climat identique, quatre systèmes de culture différents par la fréquence des opérations dégradantes qu'ils impliquent, afin de comparer les courbes d'évolution de teneur en delta et les niveaux d'équilibre atteints.

Le paramétrage du modèle est basé sur une maille géométrique de 4 mètres de large, semblable à celle utilisée dans la partie précédente (scénario 1 par exemple). Les règles de transfert, de disparition et de création de delta sont les mêmes que précédemment. Cependant, afin de privilégier dans la comparaison l'effet propre des systèmes de culture, nous limiterons les facteurs de variabilité entre situations ; en particulier :

- la localisation des passages de roues est tirée au hasard, mais le tirage est le même pour les quatre situations une année donnée ;
- le motif géométrique est invariant quelle que soit la culture. Nous faisons l'hypothèse d'une implantation en un seul passage, le tracteur étant équipé de roues jumelées à l'arrière ;
- les profondeurs de travail sont dans tous les cas de 6 cm pour le déchaumage et les reprises, de 25 cm pour le labour ; la largeur des compartiments est de 40 cm ;
- l'état initial est fixé sans delta.

Pour ce qui concerne la séquence des événements entraînant une dégradation de l'état structural, nous prendrons les hypothèses suivantes : la fréquence des années où l'implantation des cultures est réalisée en conditions humides est de 0,33 (un an sur trois) à l'automne comme au printemps ; la fréquence des récoltes d'automne effectuées en conditions dégradantes est de 0,66 (deux ans sur trois) ; les récoltes d'été seront considérées comme étant réalisées toujours en conditions sèches.

La séquence des événements humides et secs est tirée au sort en utilisant la procédure "random" de Turbo-Pascal, sur une période de trente ans. Une fois établie, elle permet de dresser les quatre scénarios, correspondant aux quatre situations choisies (tableau IV-10).

		Années																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Implantation Automne(1)		H	S	S	H	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	H	S	H	S	H	S	S	S	S	H	S
Implantation Printemps(1)		H	S	S	S	H	H	S	S	H	S	S	S	H	S	H	S	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	H	S	H	S
Récolte Automne(2)		H	H	S	H	H	S	H	S	H	S	H	S	H	H	S	H	H	S	H	H	S	H	H	S	S	H	H	S	H	H
Monoculture Blé d'hiver		B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Se		H	S	S	H	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	H	S	S	H	S	H	S	S	S	H	S
R		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Succession Maïs/Blé/ Orge		M	B	O	M	B	O	M	B	O	M	B	O	M	B	O	M	B	O	M	B	O	M	B	O	M	B	O	M	B	O
Se		H	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S
R		H	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S
Succession Maïs/Blé		M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B
Se		H	S	S	H	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	H	S	S
R		H	S	S	H	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	H	S	S
Monoculture de Maïs		M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Se		H	S	S	S	H	H	S	S	H	S	S	S	H	S	H	S	S	S	S	H	S	S	S	H	S	S	H	S	S	H
R		H	H	S	H	H	S	H	S	H	S	H	S	H	H	S	H	H	S	H	H	S	H	H	S	H	H	S	H	H	S

Tableau IV-10 : Scénarios de simulation pour le test de l'indicateur "Teneur en Δ de H5-L3"

- (1) Séquence obtenue par tirage au sort, avec une fréquence des événements humides de 0.33
- (2) Séquence obtenue par tirage au sort, avec une fréquence des événements humides de 0.66

Légende :

Se : Conditions d'humidité lors de l'implantation (S = Sec ; H = Humide)
 R : Conditions d'humidité à la récolte (S = Sec ; H = Humide)

Nous avons retenu, par ordre d' "intensité potentielle de dégradation" croissant :

- une monoculture de blé d'hiver,
- une succession Maïs/Blé/Orge d'hiver,
- une rotation Maïs/Blé,
- et une monoculture de maïs.

Les courbes d'évolution de l'indicateur sont présentées aux figures IV-9, IV-10 et IV-11.

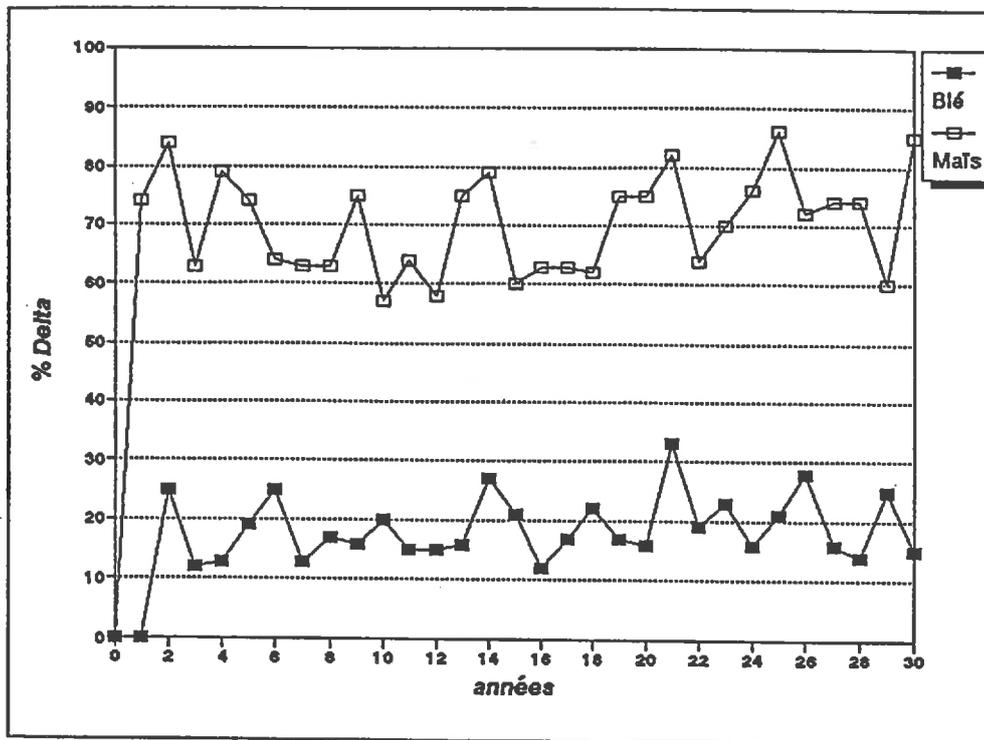


Figure IV-9 : Courbes d'évolution de la teneur en Δ du compartiment H5-L3 (monoculture de blé d'hiver et monoculture de maïs)

Moyenne Blé = 18,3% ; Ecart-type Blé = 6,1

Moyenne Maïs = 70,4% ; Ecart-type Maïs = 8,4

La comparaison des courbes correspondant aux deux monocultures (maïs et blé) montre que, sous le jeu d'hypothèses retenu, l'indicateur oscille autour d'une valeur moyenne, nettement différente pour les deux successions (18,3% pour la monoculture de blé d'hiver, et 70,4% pour celle de maïs). La variabilité autour de la moyenne est légèrement plus élevée pour le maïs (écart-type 8,4) que pour le blé (écart-type 6,1).

Dans ces situations extrêmes, les valeurs simulées de l'indicateur différencient bien les deux successions, et il apparaît possible de parler d'état d'équilibre dynamique (Pavé, 1994). On trouve, dans le cas de la monoculture de blé, une situation que l'on peut rapprocher de celle de la parcelle N°1 du Centre Expérimental de Grignon, même si la valeur d'équilibre est inférieure, en relation avec un jeu de paramètres géométriques moins favorable à la création de Δ .

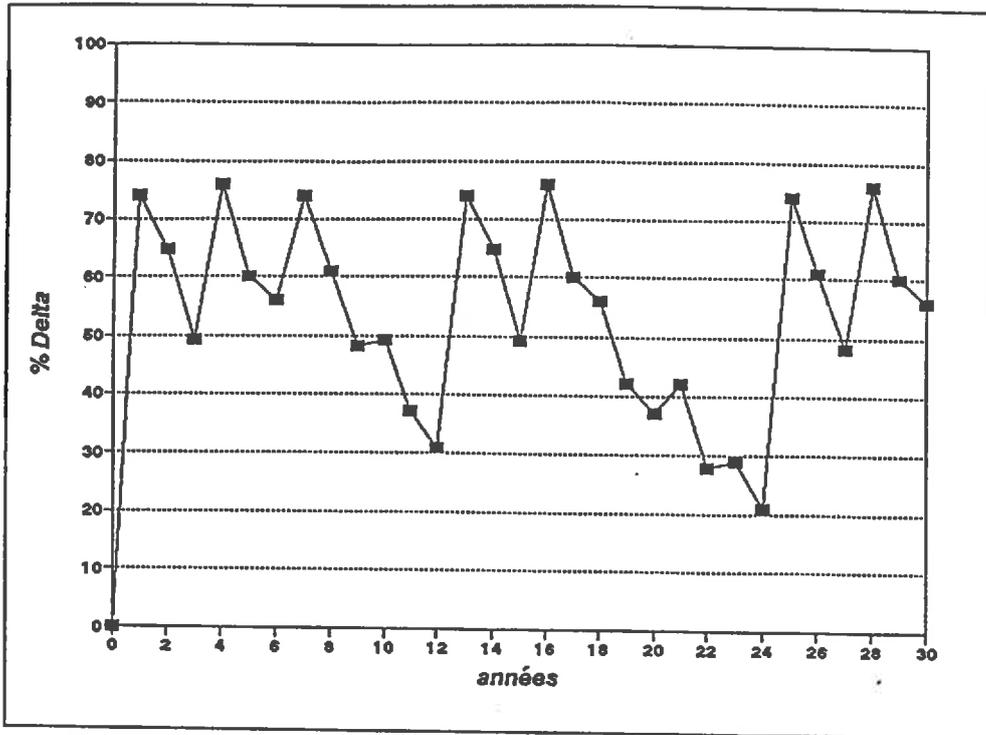


Figure IV-10 : Courbe d'évolution de la teneur en Δ du compartiment H5-L3
(succession Maïs/Blé/Orge)
Moyenne = 54.5% ; Ecart-type = 15.7

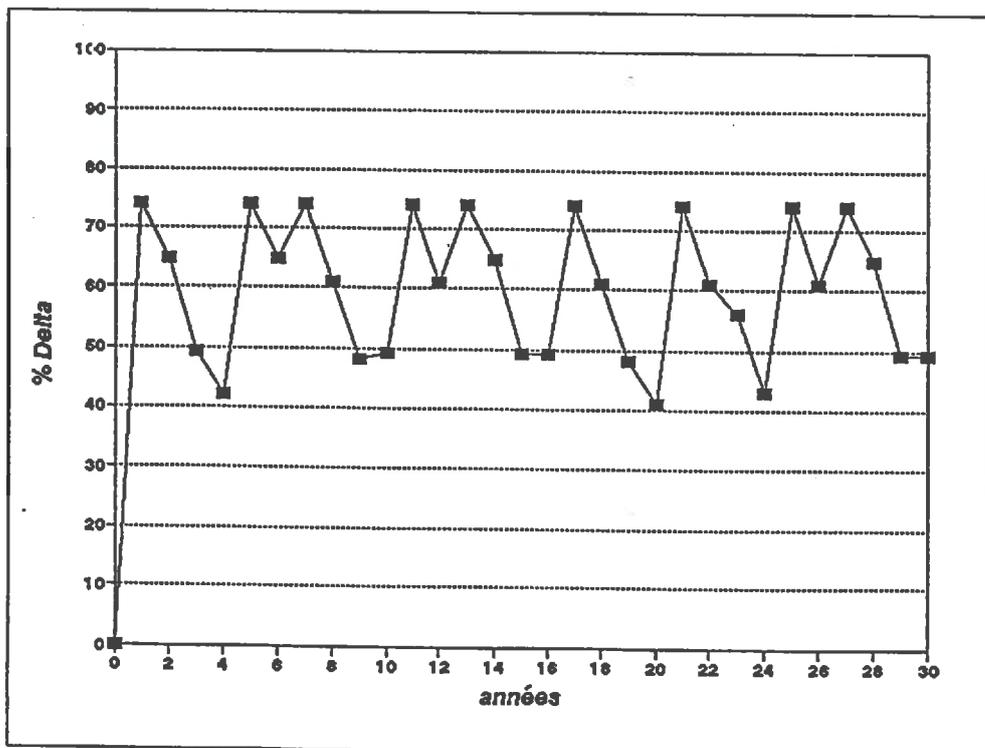


Figure IV-11 : Courbe d'évolution de la teneur en Δ du compartiment H5-L3
(succession Maïs/Blé)
Moyenne = 60.1% ; Ecart-type = 11.4

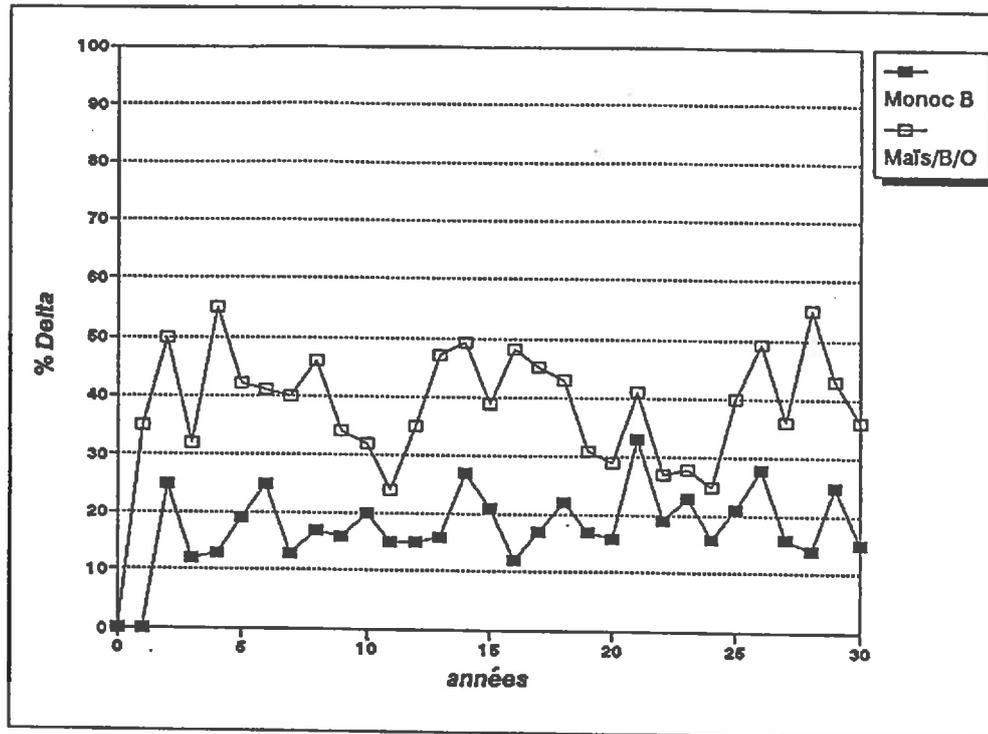


Figure IV-12 : Courbes d'évolution de la teneur en Δ du compartiment H5-L3 (succession Maïs/Blé/Orge avec UN compartiment sur DEUX tassé à la récolte et monoculture de blé)
Moyenne Maïs/Blé/Orge = 39.2% ; Ecart-type = 8.4

Par contre, dans le cas des deux successions intermédiaires, si les valeurs prises par l'indicateur ne divergent pas, restant comprises dans un intervalle grossièrement délimité par les valeurs obtenues avec les deux monocultures, les fluctuations sont très importantes : pour la succession triennale Maïs/Blé/Orge, leur amplitude autour de la moyenne atteint plus ou moins 25%. Dans ce cas et, dans une moindre mesure pour celui de la succession Maïs/Blé, on atteint semble-t-il les limites de la notion *d'équilibre dynamique*, étant donné l'amplitude des fluctuations observées.

Il faut souligner cependant que la connaissance de l'amplitude des fluctuations et celle de leur déterminisme est, en soi, intéressante pour détecter les éléments du système sur lesquels il est possible de jouer. Dans ces situations, ce sont les conditions de récolte du maïs qui paraissent devoir être mises en cause.

On considère que lorsque ces dernières se produisent en conditions humides, l'ensemble de la couche labourée est forcé à Δ . C'est ce qui explique que l'indicateur soit amené, après une telle récolte, à une valeur proche de la moyenne correspondant à la monoculture de maïs. Lorsqu'une série d'années sans récolte humide suit, l'indicateur tend vers la valeur caractéristique de la monoculture de blé (on constate, sur la figure IV-11, qu'il faut huit ans pour retrouver cette valeur, avec le paramétrage retenu).

En prenant une hypothèse de fonctionnement moins extrême pour le compactage lors de récoltes d'automne en conditions humides, on réduit fortement les fluctuations autour de la moyenne pour la succession Maïs/Blé/Orge. C'est ce qui est présenté à la figure IV-12, pour laquelle on a fait tourner le programme correspondant à la succession Maïs/Blé/Orge en ne tassant qu'un compartiment sur deux lors des récoltes de maïs en conditions humides. On constate que l'on réduit ainsi fortement les fluctuations autour de la valeur moyenne, et que l'on obtient une courbe d'évolution située au dessus de la courbe caractéristique de la monoculture de blé.

Cette dernière simulation montre l'importance des caractéristiques géométriques des équipements utilisés pour les récoltes tardives.

3.2. Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent le parti que l'on peut tirer de notre modèle pour simuler l'évolution à long terme de l'état structural du profil, en conditions réelles.

Les règles de fonctionnement proposées apparaissent en effet cohérentes, dans la mesure où l'on a pu d'une part classer correctement les situations sur la base de la teneur en Δ du compartiment H5-L3 (ce qui était l'objectif de départ de notre travail de modélisation), et, d'autre part, rapprocher les sorties graphiques de la méthode de simulation point à point des cartes obtenues sur le terrain, dans près de la moitié des cas.

De plus, en procédant par simulation mais en gardant des règles très proches de celles adoptées par les agriculteurs du Thymerais, on a montré que l'indicateur de l'effet des systèmes de culture que nous proposons permettait de différencier les systèmes de culture dans un même contexte climatique.

Ces constatations permettent à notre avis de considérer le modèle comme un outil opérationnel de diagnostic et de pronostic sur l'effet à long terme des systèmes de culture comportant un labour.

Concernant la modélisation de l'ensemble de l'état du profil cultural, le modèle doit encore être perfectionné. Cela sera possible lorsque les connaissances qui permettent de prévoir les conditions d'humidité déclenchant le tassement auront suffisamment progressé. Le modèle tel qu'il est conçu permet d'intégrer ces connaissances au fur et à mesure de leur évolution. Il est même de ce point de vue, particulièrement souple d'utilisation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'évolution de l'état structural des sols cultivés sous l'action d'agents externes, naturels ou culturels, fait l'objet de nombreuses recherches que l'on peut regrouper, schématiquement en deux grandes catégories selon leurs finalités :

- Pour la première, il s'agit d'étudier l'**influence d'un facteur déterminé** (la pluie, le compactage,...) ; abordées au laboratoire sur de petits agrégats ou des échantillons homogènes, ces études visent à révéler les comportements intrinsèques liés à la constitution du matériau (Stengel, 1990). Les méthodes utilisées dans ce cadre font souvent appel à des tests standardisés (pour l'évaluation de la stabilité structurale, l'étude du compactage,...) et l'on cherche à établir des relations reproductibles entre le facteur étudié et divers paramètres d'états de l'échantillon étudié (par exemple, entre la contrainte appliquée, la teneur en eau et la densité finale de l'échantillon pour établir les courbes de compactage). La transposition directe au champ de ces résultats est le plus souvent décevante. En effet, au delà des propriétés des matériaux, l'état structural et sa variabilité verticale et horizontale jouent en eux-mêmes un rôle important dans les transformations obtenues.

- Pour la seconde, il s'agit d'élaborer des **diagnostics au champ sur l'effet des événements climatiques ou culturels sur l'état du profil cultural** observé à un moment donné. L'élaboration de ces diagnostics nécessite l'utilisation des connaissances établies dans le cadre précédent. Elle ne peut, évidemment, prendre en compte que les événements les plus récents, c'est-à-dire ceux qui laissent dans le profil cultural des symptômes explicites, interprétables et accessibles à l'observation et à la mesure. Par cette voie, utilisée surtout depuis l'invention du concept de profil Cultural, par S. Hénin et ses collaborateurs dans les années soixante, on a pu établir des relations qualitatives assez robustes, de nature corrélative, entre les états observés et les actions culturelles.

Compte-tenu de cet état des connaissances, nous avons choisi dans ce travail d'aborder la question *des effets cumulatifs, à long terme, des systèmes de culture sur l'état structural*, celui-ci étant considéré comme un résultat de l'activité agricole dont il est nécessaire de connaître les tendances d'évolution pour piloter les systèmes de culture. Plus précisément, nous avons cherché à mieux définir les conditions d'atteinte de l'état moyen (Sebillotte ; 1982, 1990) du Profil Cultural, dont le niveau serait déterminé, dans un milieu donné, par le système de culture et les conditions de sa mise en oeuvre. Il s'agissait également d'identifier les composantes du système de culture responsables de cet état, pour, si possible, fournir les moyens d'agir sur les évolutions jugés défavorables pour les cultures ou l'environnement.

◆ Choix d'un critère d'évaluation de l'effet à long terme des systèmes de culture

Nous nous sommes tourné vers les **méthodes de description du profil cultural** (Manichon, 1982). Cet auteur propose un niveau de description, l'état interne des éléments structuraux, comprenant trois modalités Δ , Γ et Φ . Il suggère que l'état interne Δ puisse être considéré comme un état de compacité limite des mottes, résultant de compactages sévères en conditions humides, et qu'il existe des termes de passage entre ces trois modalités et la terre fine, à travers les effets de compactage et de fragmentation liés à la pratique du système de culture (Cf. figure I-4). De nombreuses observations de terrain montraient par ailleurs que ces trois états coexistaient en proportions variables au sein des profils. On pouvait, à partir de là, émettre l'idée que la proportion d'éléments d'état interne Δ puisse être interprétée comme le résultat du solde du bilan entre compactages et décompactages subis par le profil, et soit un indicateur instantané de l'état d'évolution de la structure de l'horizon Ap.

Pour ce qui concerne l'observation au champ des effets à long terme, nous avons proposé d'évaluer la teneur en éléments d'état interne Δ dans la partie du profil indemne de toute action de compactage et de fragmentation depuis le dernier labour, afin de ne pas introduire une variabilité conjoncturelle liée aux effets climatiques et culturels les plus récents lors de l'évaluation. Ce compartiment est constitué de l'horizon H5, situé entre le fond de labour et la base de l'horizon créé par les outils de reprise, pour les positions latérales L3, parties du profil situées hors des passages de roues postérieures au labour.

Par contre, la modélisation de l'enchaînement des états successifs au cours du temps, imposait de prendre en compte l'ensemble de la couche labourée, l'état d'un compartiment du profil une année donnée dépendant de celui des autres compartiments l'année précédente. Nous avons donc choisi de modéliser l'évolution de la teneur en éléments d'état interne Δ de l'ensemble de la couche labourée.

La variable étudiée ne prétend pas représenter la totalité de l'état structural du profil. Il s'agit d'un indicateur de l'effet des systèmes de culture, dont on suppose qu'il permet de rendre compte d'une évolution. Cependant, dans la mesure où l'on a pu montrer que dans un régime de travail du sol comportant un labour tous les ans, la teneur en éléments d'état interne Δ était corrélée avec le calibre des mottes de ce type (Manichon, 1988), on peut penser que la valeur de cet indicateur n'est pas sans rapport avec l'état global du profil, et en particulier le degré de fragmentation des bandes de labour. Le caractère pénalisant d'une couche labourée constituée de mottes Δ de calibre décimétrique ayant été démontré dans plusieurs situations (notamment Tardieu, 1984 ; Coulomb *et al.*, 1990) nous pouvons également considérer que l'on peut relier l'indicateur à certaines des conséquences de l'état du profil sur le fonctionnement du peuplement végétal.

◆ Résultats obtenus

Les valeurs de l'indicateur mesurées sur quatre parcelles du Centre Expérimental de Grignon (Yvelines) opposent nettement deux groupes de parcelles :

- Elles se sont en effet révélées faibles et très voisines pour les parcelles dans lesquelles les tassements ne provenaient que des opérations d'implantation et d'entretien, systématiquement localisées aux mêmes endroits tous les ans. Le fait que des éléments structuraux d'état interne Δ soient présents dans un compartiment non roulé en conditions humides amenait alors l'hypothèse d'un transfert de Δ des positions L1 vers les positions L3 lors du labour, en raison du déport latéral des volumes de terre qu'implique cette opération.

- Les valeurs mesurées étaient en revanche doublées dans les parcelles ayant subi, dans les positions L3, des compactages par des passages d'engins lors de récoltes en conditions humides.

Ces résultats nous ont amené à considérer que l'indicateur proposé était apte à rendre compte des effets cumulatifs du système de culture sur l'évolution de l'état structural de la couche labourée, dans ces conditions très contrôlées. L'évolution de l'indicateur apparaît ainsi, dans les situations labourées, essentiellement déterminée par trois phénomènes : la **création**, sous les roues des engins, de volumes tassés ; ceux-ci sont ensuite retournés et **déplacés latéralement** lors du labour, alternativement dans un sens puis dans l'autre au fil des années ; enfin la **disparition** d'éléments Δ s'opère par fragmentation lors de la reprise et sous l'effet du climat (alternances humectation-dessiccation ou gel-dégel). Partant d'un état initial donné, ces différentes actions sur la structure de la couche labourée l'amènent progressivement à un état moyen, caractéristique du système de culture, ce dernier déterminant l'intensité de chacune de ces actions, ainsi que l'importance et la localisation spatiale des volumes affectés à chaque étape de l'évolution.

Ces considérations nous ont incité à choisir, dans un premier temps, un modèle compartimental comme support pour la simulation de cette évolution, afin de tester la cohérence de ces hypothèses sur le fonctionnement d'une couche labourée. Les compartiments correspondent aux volumes de sol déplacés par la charrue, et sont caractérisés, à un moment donné, par leur teneur en Δ . Par analogie avec les modèles compartimentaux utilisés en cinétique chimique, on considère que cette teneur évolue sous l'effet des trois types de flux énoncés ci-dessus. Le pas de temps est annuel.

Pour appliquer ce modèle aux parcelles expérimentales de Grignon, nous l'avons adapté aux caractéristiques géométriques du système modélisé, ce qui s'avérait relativement simple dans ces situations où les outils et leurs règles d'emploi (largeur, profondeur d'action, localisation des passages) étaient strictement définies : la parcelle est constituée de la

répétition de motifs géométriques adjacents, composés d'une position L1 correspondant à un compartiment, associée à une position L3, elle-même composée de quatre compartiments correspondant aux bandes de terre déplacées par la charrue. Ces différents compartiments sont de même dimension. A partir d'une écriture basée sur le cas de la parcelle pour laquelle on n'avait pas à prendre en compte les compactages situés en dehors de la position L1, le modèle a été appliqué aux cas des autres parcelles en introduisant une partie aléatoire dans son fonctionnement par tirage au sort du numéro du compartiment de L3 affecté lors des récoltes en conditions humides.

Les résultats de la simulation ont permis de distinguer les mêmes groupes de parcelles que par la mesure directe de l'indicateur. L'influence de l'opération de récolte sur l'évolution de l'état structural est ici bien mise en évidence comme facteur majeur de différenciation du profil. Nous rejoignons ici les observations de plusieurs auteurs (Tardieu, 1984 ; Coulomb, 1991).

Il apparaît aussi, par mesure directe comme par simulation, une quasi identité des valeurs numériques obtenues dans des parcelles qui n'ont pourtant pas connu la même succession de cultures. Ceci suggère que, plus que la nature de ces dernières, ce sont les techniques culturales qu'elles impliquent et les conditions hydriques du sol au moment des interventions qui sont déterminantes pour l'évolution de l'état structural. Nous apportons à ce résultat, déjà observé au champ, une démonstration par le calcul.

Plus encore, cette quasi identité des valeurs numériques suggère que le facteur déterminant tient aux caractéristiques géométriques des équipements employés et à leurs règles d'emploi. Ainsi, lorsque, par simulation, on augmente, toutes choses égales par ailleurs, la profondeur du labour, cela entraîne une évolution positive ou négative selon les caractéristiques de l'horizon sous-jacent, de la valeur atteinte à l'équilibre. Lorsqu'il y a diminution, celle-ci est faible au regard de l'accroissement de dépense énergétique que cela représente. Lorsqu'on accroît la largeur des outils employés, on observe une diminution de la valeur à l'équilibre et une augmentation de la variabilité des teneurs entre compartiments. Cet accroissement de la variabilité spatiale de l'état structural peut avoir diverses conséquences (sur le comportement de la végétation, la traficabilité,...) et inciter les agriculteurs à rechercher des moyens permettant de limiter le tassement. Une adaptation simple des règles de fonctionnement du modèle permet d'étudier l'effet de ces mesures. On constate que la réduction du flux d'entrée de Δ dans le système se traduit par un abaissement sensible de la valeur d'équilibre, mais qu'à flux d'entrée égal, une répartition entre plusieurs compartiments entraîne également une diminution de la valeur d'équilibre. Ces quelques exemples montrent le parti que l'on peut tirer de ce modèle très simplifié pour étudier l'effet de changements techniques. Cependant, d'envisager son utilisation dans des situations plus proches de la réalité agricole que les parcelles expérimentales de Grignon, il nous fallait revenir sur les principales simplifications faites dans cette partie et en tester les effets sur les sorties du modèle.

Cette étude de sensibilité nous a montré le poids important du taux de disparition annuel de Δ sur le niveau de l'équilibre. Or, nous avons basé le calcul de la valeur de ce paramètre sur le rapport entre la profondeur des reprises de labour et l'épaisseur de la couche labourée, postulant que la disparition n'avait lieu qu'en surface, sous l'action des outils de reprise et du climat. Admettre que l'épaisseur de cet horizon soit constante n'était pas réaliste en dehors de parcelles expérimentales très contrôlées, et nous avons dû modifier notre modèle pour pouvoir l'appliquer à d'autres situations.

Pour ce faire, il nous fallait identifier explicitement des sous-compartiments correspondant aux horizons H1 (reprise) et H5 (labouré non repris), ce dont nous n'avions pas eu besoin jusqu'alors, ayant écrit le modèle sur la base d'une répartition spatiale homogène du Δ dans chaque compartiment. Ceci nous a conduit à perfectionner la prise en compte des modalités de retournement de la bande de terre lors du labour, en nous calant sur des observations réelles, et à découper la section de chaque bande en surfaces élémentaires de 2 x 2 cm. Chacune est affectée de la modalité delta ou non delta suivant sa position par rapport aux compactages appliqué au profil. Ses déplacements sous l'action de la charrue sont calculés par le programme suivant les nouvelles modalités de retournement et de déformation des bandes de terre que nous avons introduites dans le modèle. Ceci rendait alors possible une localisation de la disparition de Δ au seul horizon de surface (H1). Grâce à cette nouvelle modalité de simulation, plus réaliste quoiqu'encore très simplifiée vis-à-vis de la réalité, nous avons pu montrer que l'état d'équilibre n'était pas sensiblement modifié par rapport aux premiers calculs effectués avec le même jeu de paramètres. Mais, surtout, cette valeur n'est pas non plus très sensible à des fluctuations aléatoires de la profondeur de reprise du labour. Enfin, nous avons, par simulation, vérifié que le type de fonctionnement du programme n'entraînait pas d'hypothèse irréaliste sur la persistance de éléments d'état interne Δ dans le profil.

Disposant alors d'un modèle et d'un outil de simulation rendus plus robustes aux variations du paramètre fixant le taux annuel de disparition de Δ , nous avons pu tenter de le tester en l'appliquant à un ensemble de parcelles agricoles pour lesquelles nous disposions des informations nécessaires : les descriptions de l'état du profil cultural d'une part, la connaissance des successions de cultures, des itinéraires techniques et des conditions climatiques lors des interventions d'autre part. La confrontation des résultats des simulations et des observations s'est alors avérée satisfaisante. Les valeurs simulées de l'indicateur teneur en Δ de H5-L3 à l'équilibre, comme les observations au champ, permettent de distinguer et de classer entre eux les deux grands types de systèmes de culture pratiqués dans la région d'étude (comportant ou non implantations et récoltes en conditions dégradantes, ces dernières étant appréciées par l'utilisation d'un modèle simple d'évolution du bilan hydrique et les données climatiques réelles). De plus, certains types de profils observés correspondent assez bien aux sorties graphiques de nos simulations, ce qui montre une certaine capacité du modèle à aborder maintenant la morphologie générale des profils cultureux. Il faut souligner que ces résultats ont été obtenus malgré des informations

relativement succinctes sur les situations. C'est, nous le pensons, l'un des intérêts de notre modèle que de ne nécessiter qu'un **nombre de paramètres très réduit pour faire des simulations**.

Afin d'étudier l'aptitude de l'indicateur teneur en Δ de H5-L3 à différencier les systèmes de culture sur la base de leurs effets sur l'évolution de l'état structural, dans une plus large gamme de situations que celles présentes dans l'échantillon des parcelles enquêtées, nous avons choisi de travailler par simulation.

Pour trois cas de systèmes de culture, nous avons calculé les valeurs d'équilibre de l'indicateur en introduisant par tirage au sort des aléas dans les conditions climatiques de l'automne et du printemps. On constate que l'indicateur évolue au cours du temps en oscillant autour d'une valeur moyenne caractéristique du système de culture. Cette valeur moyenne permet de classer les systèmes de culture sur la base de l'évolutions qu'ils induisent sur l'état structural de la couche labourée. L'amplitude des oscillations observées dépend pour une large part de la fréquence et de l'intensité des dégradations de la structure occasionnées par les opérations de récolte. Ce résultat suggère que, pour le type de situations simulées, c'est bien le caractère dégradant des opérations de récolte qu'il faut réduire si l'on veut diminuer la valeur moyenne de teneur et sa variabilité. Dans ces systèmes de grande culture, en climat tempéré de type océanique, cet objectif doit être atteint par la mise au point de matériels de récolte et de transport capables d'intervenir en conditions humides en occasionnant un minimum de tassements. En effet, le choix de la date et donc des conditions de récolte est très limité ; il est en particulier difficile de retarder la récolte en automne pour attendre des conditions plus favorables : le risque d'avoir une humidité du sol plus forte encore, ou de perdre en qualité des produits, s'accroît rapidement ; un retard peut également compromettre la réussite de l'implantation de la culture suivante, généralement une céréale d'hiver.

◆ Limites et perspectives

Dans les deux dernières séries de calculs, nous avons choisi de maximiser les effets de compactage, forçant à l'état interne delta tous les compartiments concernés par un passage de roue d'engin en conditions humides, pour les travaux d'implantation, d'entretien et de récolte.

Dans les parcelles expérimentales de Grignon, cela ne posait pas de problème particulier, dans la mesure où la répétition des passages au même endroit nous assurait de la création de Δ tous les ans quelles que soient les conditions climatiques, ce fait étant par ailleurs confirmé par nos observations. Dans les autres cas, l'hypothèse maximaliste que nous avons retenue tient à une connaissance insuffisante des surfaces touchées par les engins de récolte, mais aussi à l'insuffisance de connaissances théoriques sur les mécanismes de compactage, et plus précisément sur les conditions de création de l'état interne delta. Il résulte de ce choix un accroissement des fluctuations interannuelles au sein

de chacun des systèmes simulés, ainsi qu'une augmentation des valeurs à l'équilibre. Ce dernier aspect doit cependant être limité. En effet, et les simulations faites à Grignon l'on montré, l'incidence d'un compactage accidentel sur le niveau de l'indicateur n'est que temporaire, le retour à l'équilibre (stable) défini par les paramètres géométriques du système de culture étant relativement rapide.

Il reste qu'un **progrès des connaissances sur le compactage est nécessaire** pour que nous puissions simuler de façon plus réaliste les parcelles où les compactages ne sont pas localisés systématiquement aux mêmes endroits. Tel qu'il est conçu, notre modèle permet d'intégrer sans difficulté les progrès dans ce domaine. Ceci nécessitera, par ailleurs, des données beaucoup plus précises sur les conditions hydriques et leur variabilité dans l'espace (en particulier selon la profondeur) ; les connaissances actuelles montrent en effet l'influence considérable de ce facteur sur le degré de tassement obtenu (Guérif, 1990).

Une autre limite de notre travail tient à la **modélisation du retournement et de la déformation des bandes de terre** lors du labour. Parti d'une représentation très simple, la seule disponible dans la littérature, nous avons ensuite introduit une modalité de déformation de la section de la bande de labour. En nous calant sur les résultats expérimentaux de Coulomb (1991), montrant un allongement de cette section et un abaissement de son centre de gravité, nous proposons de simuler ces phénomènes par un glissement de la terre le long de plans de cisaillement parallèles aux grands côtés de la bande de labour. Ces plans de cisaillement existent dans la réalité (ils ont été en premier décrits par Nichols & Reed en 1934), et l'on pourrait en introduire d'autres. Il est possible que de cette manière on arrive à rendre compte de l'effet de l'état structural avant labour sur le degré de fragmentation des bandes. On sait, surtout qualitativement, par des observations de terrain, que cet effet existe, notamment pour des teneurs en eau faibles ou de fortes teneurs en Δ , qui diminuent l'intensité de la fragmentation par la charrue. Nous n'en avons pas, jusqu'à présent tenu compte. Si cela était possible, on pourrait alors simuler l'évolution du calibre des éléments structuraux, notamment d'état interne delta, sous l'action des systèmes de culture. Il est vraisemblable que l'incidence quantitative de ces modifications sur la valeur de l'indicateur à l'équilibre serait faible, la répartition de la terre entre les différents compartiments ne pouvant guère être modifiée pour une profondeur et une largeur de travail données. Par contre cette variable de sortie supplémentaire serait d'un grand intérêt pour l'étude des conséquences de l'état structural sur le fonctionnement du profil et ses conséquences sur les plantes et l'environnement, en la couplant avec des résultats de l'étude des propriétés (rétention de l'eau, diffusion gazeuse, résistance mécanique, conséquence pour les racines....) de mottes d'état interne défini.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Angers D.A., Kay B.D., Groenevelt P.H., 1987. Compaction characteristics of a soil cropped to corn and bromegrass. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 779–783.
- Ashby W. 1934 – Progress report on plough investigations for corn borer control. Bureau of Agricultural Engineering, USDA.
- Baldock J.A., Kay B.D., 1987 – Influence of cropping history and chemical treatments on the water stable aggregation of a silt loam soil. *Can. J. Soil Sci.*, 67, 501–511.
- Billot J.F., 1982 – Les applications agronomiques de la pénétrométrie à l'étude de la structure des sols travaillés. *Sci. Sol*, 3, 187–202.
- Boiffin J., 1976 – Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann. agron.*, 27, 447–463.
- Boiffin J., 1984 – *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse Doct. Ing., INA–PG, 320 p. + Annexes.
- Boiffin J., Monnier G. – 1982. Etats, propriétés et comportements des sols : recherche et utilisation de critères de fertilité physique. *Bull. techn. inf.* 370/372.
- Boiffin J., Lemaire G., 1992. *Thématiques, structures et insertion du Département d'Agronomie au sein du Secteur Environnement physique et agronomie*. INRA, Département d'Agronomie, 32 p.
- Boiffin J., Sebillotte M., Duby C., 1975 – Influence des conditions écologiques et de l'histoire culturale sur le rendement du maïs–grain. Analyse de 8 campagnes sur un essai de longue durée. *Ann. agron.*, 26, 555–591.
- Boiffin J., Keli Zagbahi J., Sebillotte M., 1986 – Système de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hénin–Dupuis. *Agronomie*, 6, 437–446.
- Boizard H., Richard G., Guéris J., Boiffin J., 1994. Effects of harvest and tillage operations on soil structure. in *Proc. 13th Intern. Conf. ISTRO : Soil and Tillage for Crop Production and Protection of the Environment*, Aalborg, Denmark, 24–29/7/94. 19–24.
- Bonneau M., Souchier B., 1979 – *Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol*. 265 p. Masson. Paris.
- Bousfield W.R., 1880 – On implements and machinery for cultivating land by horse power. *Proc. Inst. Mech. Engineers*, Manchester.
- Boussinesq J., 1885 – *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Gauthier–Villars, Paris. 30 p.
- Bui Huu Tri, 1968. Dynamique de la granulation des sols sous prairie. *Ann. Agron.*, 19, 415–439.
- Bullock P., Thomasson A.J., 1979 – Rothamsted studies of soil structure. II – Measurement and characterisation of macroporosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements. *J. Soil Sci.*, 30, 391–413.

- Burgevin R., Henin S., 1939 - Dix années d'expérience sur l'action des engrais sur la composition et les propriétés d'un sol de limon. *Ann. agron.*, 6, 771-779.
- Cannell R.Q., Davies D.B., Mackney D., Pidgeon J.D., 1978 - The suitability of soils for sequential direct drilling of combine-harvested crops in Britain : a provisional classification. *Outlook on Agriculture*, 9, 306-316.
- Capillon A., 1993. *Typologie des exploitations agricoles ; contribution à l'étude régionale des problèmes techniques*. Thèse, INA-PG, 47p. + annexes.
- Capillon A., Leterme Ph., Manichon H., 1985 - *Les exploitations agricoles du Thymerais (Eure et Loir) et leurs systèmes de culture : une approche typologique*. Doc. mult. INA-PG/ONIC, 25 pp.
- Campbell D.J., 1979 - Soil clods and potato harvesting problems. *A.R.C. Res. Rev.* (5),2, 5-38.
- Caneill J., Roger-Estrade J., Coulomb I., Manichon H., 1992 - A quantitative method for describing soil structure. In *Proc. 2nd ESA cong.* Warwick Univ.
- 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.
- Chancellor W.J., 1976 - Compaction of soil by agricultural equipments. *Bull. 1881 Div. Agric. Sci. Univ. California*, Davies, 53 pp.
- Chancellor W.J., Schmidt R.H., 1962 - Soil deformation beneath surface loads, *Trans. ASAE*, 5(2), 240-249.
- de Cockborne A.M., Jauzein M., Stengel P., Guennelon R., 1986 - Variations du coefficient de diffusion de NO_3^- dans les sols : influence de la teneur en eau et de la porosité. *Agronomie*, 8, 905-914.
- Coulomb I., 1990 - *Mechanisms of soil structure evolution : analysis of soil displacement by soil-working implements*. Poster. First Congress of the European Society of Agronomy. Session 5 p 06.
- Coulomb I., 1991 - *Analyse quantitative du comportement du sol au labour : rôle de l'état structural initial*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, 230 pp + Annexes.
- 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*", J. Boiffin & A. Marin-Laflèche Eds, INRA Laon, 137-155.
- Coulomb I., Caneill J., Manichon H., 1993a - Comportement du sol au labour : méthode d'analyse et évaluation des conséquences de l'état structural initial du sol sur l'état transformé par le labour. *Agronomie*, 13, 45-56.
- Coulomb I., Caneill J., Manichon H., 1993b - Comportement du sol au labour : évolution de l'état structural au cours du labour. *Agronomie*, 13, 457-465.

- Coulon E., 1988 – *Conséquences du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Contribution à la connaissance des mécanismes de compactage*. Thèse, Univ. d'Orléans, 183 pp.
- Cucci G., de Caro A., Caliendo A., 1988 – The influence of tillage on soil structure. Poster in "*Mechanics and related processes in structured agricultural soils*", Larson et al. Eds, NATO ASI, Series E, Vol. 172, 240.
- Curmi P., 1987 – Comportement physique intrinsèque de mottes à macroporosités différentes. In "*Soil compaction and regeneration*", G. Monnier & M.J. Goss Eds, Balkema, Rotterdam, 53–58.
- Currie J.A., 1966 – The volume and porosity of soil crumbs. *J. Soil Sci.*, 17, 324–35.
- Dagnélie P. 1975 – *Théorie et méthodes statistiques ; Applications agronomiques* (2 vol.). Les Presses Agronomiques de Gembloux, 700 pp.
- De Leon F., 1991 – *Morphologie, propriétés physiques et conditions de formation des éléments structuraux de la couche labourée. Contribution à l'interprétation du profil cultural*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, 133 pp. + Annexes.
- Debaeke Ph., 1987 – *Effets des systèmes de culture sur la flore adventice dicotylédone annuelle. Intérêt de la modélisation pour l'étude de l'évolution à long terme du stock de graine de l'horizon travaillé*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, 342 pp. + Annexes.
- Dekkers H., Gandais F., 1985 – *Influence des systèmes de culture sur l'état physique du sol. Contribution à l'élaboration d'une méthode d'évaluation objective des fréquences d'état interne de mottes*. Mémoire de DAA Chaire d'Agronomie, INA-PG, 108 pp. + Annexes.
- Dexter A.R., 1976 – Internal structure of tilled soils. *J. Soil Sci.*, 27, 267–278.
- Dexter A.R., 1988 – Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 11, 199–238.
- Dickson J.W., Campbell D.J., 1990 – Soil and crop response to zero and conventional traffic systems for winter barley in Scotland, 1982/1986. *Soil Tillage Res.*, 18, 1–26.
- Doré T., 1992 – *Analyse, par voie d'enquête, de la variabilité des rendements et des effets précédents du pois protéagineux de printemps (Pisum sativum L.)*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, 214 pp. + Annexes.
- Emerson W.W., 1977 – Physical properties and structure. In "*Soil factors in crop production in a semi-arid environment*", J.S. Russel & E.L. Greacen Eds, Univ. of Queensland Press, S. Lucia, 78–104.
- Feuerlin W. 1960 – Die Pflugarbeit und ihre Beurteilung. *Grundlag. der Landtech.*, 12, 44–50.
- Feuerlin W. 1966 – Characterization of good ploughing. *Grundförbattring*, 19, 241–250.
- Fiès J.C., 1982 – Constitution physique du sol. *Encyclopédie Tech. Agric.*, Ed. Techniques, Paris, 1130 p.

- Fiès J.C., 1984 - Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie*. 4(9), 891-899.
- Frese H., 1969 - Aktuelle Probleme der Bodenbearbeitung. *Archiv Deutsche Landwirtschafts Gesellschaft*, 44, 53-73 (in German).
- Gachon L., 1988. *Phosphore et potassium dans les relations sol-plantes : conséquences pour la fertilisation*. ouvrage collectif sous la direction de L. Gachon. INRA ed. 566 p.
- Gardner W.R., 1956 - Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 151-153.
- Gautronneau Y, Manichon H., 1987 - *Guide méthodique du Profil Cultural*. Lyon, Paris, CEREF/GEARA Eds, 71 pp.
- Gede Wibaya, 1992 - *Approche par enquête et expérimentation de l'effet de l'état structural du sol sur la nutrition azotée et l'élaboration du rendement de l'orge de brasserie*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, 209 pp. + Annexes.
- Gibbs R.J., Reid J.B., 1988 - A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, 8, 123-149.
- Gill W.R., Vandenberg G.E., 1967 - Soil dynamics in tillage and traction. *Agricultural Handbook N°316*. Agricultural Research Service, USDA.
- Groenevelt P.H., 1989 - Effective stress in structured soils. In "*Mechanics and related processes in structured agricultural soils*", Larson et al. Eds, NATO ASI, Series E, Vol. 172, 53-58.
- Gueguen, Grenier, Benchimol, 1978 - *Introduction à la théorie des systèmes. Représentation d'état des systèmes multidimensionnels*. Doc. mult. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications. Paris, 105 pp.
- Guérif J., 1984 - The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. *J. Agric. Eng. Res.*, 25, 367-374.
- 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*". J. Boiffin & A. Marin-Lafèche Eds, INRA Laon, 71-90.
- Guérif J., 1991 - Simplification du travail du sol et évolution du milieu physique et chimique. *Perspec. agric.*, 161, 39-46.
- Hadas A., 1987 - Long-term tillage practice effects on soil aggregation modes and strength. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 191-197.
- 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 characterising the compactness of an arable soil. In "*Impact of water and external forces on soil structure*", Catena sup. 11, Drescher, Horn & De Boolt Eds, 101-105.

- Hamblin A., 1985 – The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 38, 95–158.
- Hébert J., 1969. La fumure azotée du blé d'hiver. *Bull. Techn. Inf.* 244, 755–766.
- Hénin S., 1976 – Cours de physique du sol (2 vol.), ORSTOM – Editest, 371 pp.
- Hénin S., Dupuis M., 1945 – Essai de bilan de la matière organique des sols, *Ann. agron.*, 15, 161–172.
- Hénin S., Monnier G., 1956 – Evaluation de la stabilité structurale du sol. *C.R. V^{ème} Congrès International Sci. Sol*, Paris, Vol. B, 49–52.
- Hénin S., Gras R., Monnier G., 1969 – *Le profil cultural : L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques*. Paris, Masson, 332 pp.
- Holloway R.E., Dexter A.R., 1990 – Traffic intensity on arable land on the Eyre peninsula of South Australia. *J. Terramechanics*, 27, 247–259.
- Horn R., 1989 – Strength of structured soils due to loading : a review of processes on macro and micro scale; european aspects. In *"Mechanics and related processes in structured agricultural soils"*, Larson *et al.* Eds, NATO ASI, Ser. E, Vol. 172, 240.
- INRA, 1992. Référentiel Pédologique. Principaux sols d'Europe.
- Jacquez J.A., 1985 – Compartmental analysis in biology and medicine, The University of Michigan Press, 560 pp.
- Jenkinson DS, Raynes JH, 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiment. *Soil Sci.*, 123, 298–305
- Kay B.D., Angers D.A., Groenevelt P.H., Baldock P.H., 1988 – Quantifying the influence of cropping history on soil structure. *Can. J. Soil Sci.*, 68, 359–368.
- Kemper W.D., Bullock M.S., Dexter A.R., 1989 – Soil cohesion changes. In *"Mechanics and related processes in structured agricultural soils"*, Larson *et al.* Eds, NATO ASI, Ser. E, Vol. 172, 81–96.
- Koolen A.J., 1994 – Mechanics of soil compaction. in *"Soil compaction in crop production"*. B.D. Soane & C. Van Ouwerkerk Eds. Elsevier, Amsterdam. pp 23–44.
- Koolen A.J., Kuipers H., 1989 – Soil deformation under compressive forces. In *"Mechanics and related processes in agricultural soils"*. Ed. W.E. Larson *et al.*, NATO ASI, Ser. E : Applied Sciences. Kluwer Academic pub., Vol. 172.
- Kouwenhoven J.K., Terpsta R., 1972 – Characterization of soil handling with mouldboard ploughs. *Neth. J. Agric. Sci.*, 180–192.
- 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, Ser. E : Applied Sciences. Kluwer Academic pub., Vol. 172.

- Kuipers H., van De Zande J.C., 1994 – Quantification of traffic systems in crop production. In *"Soil Compaction in Crop Production"*, B.D. Soane et C. van Ontwerkerk Eds, Amsterdam, pp. 417–445.
- Lafolie F., de Cockborne A.M., Delacourt, A., 1990 – Modélisation des transferts de nitrate en sol hétérogène : utilisation d'un modèle à fonction de forme. In *"Nitrates, agriculture, eau"*, INRA, Paris 7–8/11, R. Calvet Ed., 275–280.
- Lamers J.G., Perdock U.D., Lumkes L.M., Klooster J.J., 1986 – Controlled traffic systems in the Netherlands. *Soil. Till. Research* (8) ; 65–76.
- Larson W.E., 1964 – Soil parameters for evaluating tillage needs and operations. *Soil Sci. Am. Proc.*, 28, 118–122.
- Le Bissonais Y., 1988 – *Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse Doct. Univ. d'Orléans, 197 pp. + Annexes.
- Lebreton J.D., 1973 – Introduction aux modèles mathématiques de la dynamique des populations. In *"Informatique et Biosphère"*, 77–116.
- Leterme Ph., Manichon H., Roger-Estrade J., 1994 – Analyse intégrée des rendements du blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais. *Agronomie* (14) 341–361.
- Lyles L., Woodruff N.P., 1961 – Surface soil clodiness in relation to soil density at time of tillage. *Soil Sci.*, 91, 178–182.
- Manichon H., 1982 – *Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, 214 pp. + Annexes.
- Manichon H., 1987 – Observation de l'état structural et mise en évidence d'effet de compactage des horizons travaillés. In *"Soil compaction and regeneration"*, G. Monnier & M.J. Goss Eds, Balkema, Rotterdam, 39–52.
- Manichon H., 1988 – Compactage, décompactage et système de culture. *C.R. Acad. Agr. Fr.*, 76, 39–52.
- Manichon H., 1995. *L'écorégionalité dans la recherche pour le développement : propositions de la recherche française*. CIRAD, 11 p.
- 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 succesifs de différents outils sur le profil cultural. *Bull. tech. Inf.*, 302/303, 569–577.
- 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"*. ITCF, Paris, 109–131.

- Manichon H., Roger-Estrade J., 1990 – Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. In "Systèmes de Culture", Les Colloques de l'INRA, Paris.
- 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.
- Mary B., Guérif J., 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cah. Agricultures*, 3, 247-257.
- 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.
- Meynard J.M. 1985 – *Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, 297 pp.
- Monnier G., Stengel P., Fiès J.C., 1973 – Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agrégats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. agron.*, 24, 533-545.
- Monnier G., Stengel P., Guérif J., 1982 – Recherche de critères de la fertilité du sol et de son évolution en fonction du système de culture. Séminaire "Evolution du niveau de fertilité des sols dans différents systèmes de culture", Lanza F. Ed., Bari, 35-52.
- Nichols M.L., Reed I.F., 1934 – Soil dynamics VI : Physical reactions of soils to mouldboard surfaces. *Agric. Engn.*, 15, 187-190.
- Ojeniyi S.O., Dexter A.R., 1979 – Soil factor affecting the macrostructures produced by tillage. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 22, 339-343.
- ORSTOM, 1969 – *Glossaire de pédologie. Description des horizons en vue du traitement informatique* (DGRST/ORSTOM). Bondy, France.
- Papy F., 1984 – *Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps*. Thèse Doct. Ing., INA-PG, 232 pp. + Annexes.
- Papy F., 1986 – La conduite des états physiques d'un sol cultivé (Analyses des effets de l'état initial). *Bull. tech. Inf.*, 412/413, 685-691.
- Papy F., 1987 – Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural. *Agronomie*, 7, 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". J. Boiffin J. & A. Marin-Laflèche A. Eds, INRA Laon, 157-186.
- Pavé A., 1982 – Modèles à compartiments linéaires. In "Les modèles déterministes en biologie", Lebreton & Millier Eds, Masson, Paris, 99-134.
- Pavé A., 1994 – *Modélisation en biologie et en écologie*. Aléas. Lyon. 560 p.

- Perdock U.D., Lamers J.G., 1985 - *Studies of controlled agricultural traffic in the Netherlands*. Proc. of an International Conference on Soil Dynamics at Auburn, AL, 5, 1070-1085.
- Raghavan G.S., Mc Kyes E., 1978 - Statistical models for predicting compaction generated by off-road vehicular traffic in different soil types. *J. Terramech.* 15, 1-14.
- Renault P., 1988 - *Etude et modélisation du coefficient de diffusion en phase gazeuse en fonction de la morphologie de l'espace poral textural des sols cultivés*. Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 325 pp.
- Roger-Estrade J., 1991 - Effet du travail du sol sur la localisation et l'accessibilité des éléments minéraux ; conséquences sur l'élaboration du rendement du maïs (*Zea mays* L.). *Sci Sol*, 29, 159-173.
- Russel E.N., 1971 - Soil structure : its maintenance and improvement. *J. Soil Sci.*, 22-137.
- Russel R.S., Goss M.J., 1974 - Physical aspects of soil fertility. The response of the roots to mechanical impedance. *Neth. J. Agric. Sci.*, 22, 305-318.
- Sebillotte M., 1974 - Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cah. ORSTOM, Sér. Biol.*, 3, 3-25.
- 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., 1982 - *Les systèmes de culture. Reflexion sur l'intérêt et l'emploi de cette notion à partir de l'expérience acquise en région de grande culture*. Actes Sémin. Départ. Agronomie, INRA, Vichy, 16-18 mars, 63-80.
- Sebillotte M., 1986 - *Analyse du concept de précédent cultural*. Conférence à la séance du 07/03/1986 de l'Assoc. Fr. Sci. Sol, Paris.
- Sebillotte M., 1990 - Système de culture. Un concept opératoire pour les agronomes. In "*Les systèmes de culture*", L. Combe & D. Picard Eds., INRA, Paris, 165-196.
- Sebillotte M., Servettaz L., Legay J.M., 1989. Etude de séries chronologiques de rendement dans le Noyonnais. in "*Fertilité et systèmes de production*" M. Sebillotte Ed. INRA, pp 291-307.
- Soane B.D., Blackwell P.S., Dickson J.W., Painter D.J., 1981 - Compaction by agricultural vehicles : a review. II - Compaction under tyres and other running gear. *Soil Tillage Res.*, 1, 373-400.
- Söhne W., 1956 - Einige Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik. *Grundlag. der Landtechn.*, 7, 11-27.
- Söhne W., 1959 - Untersuchungen über die Form von Plugkörpern bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit. *Grundlag. der Landtechn.*, 11, 22-39.

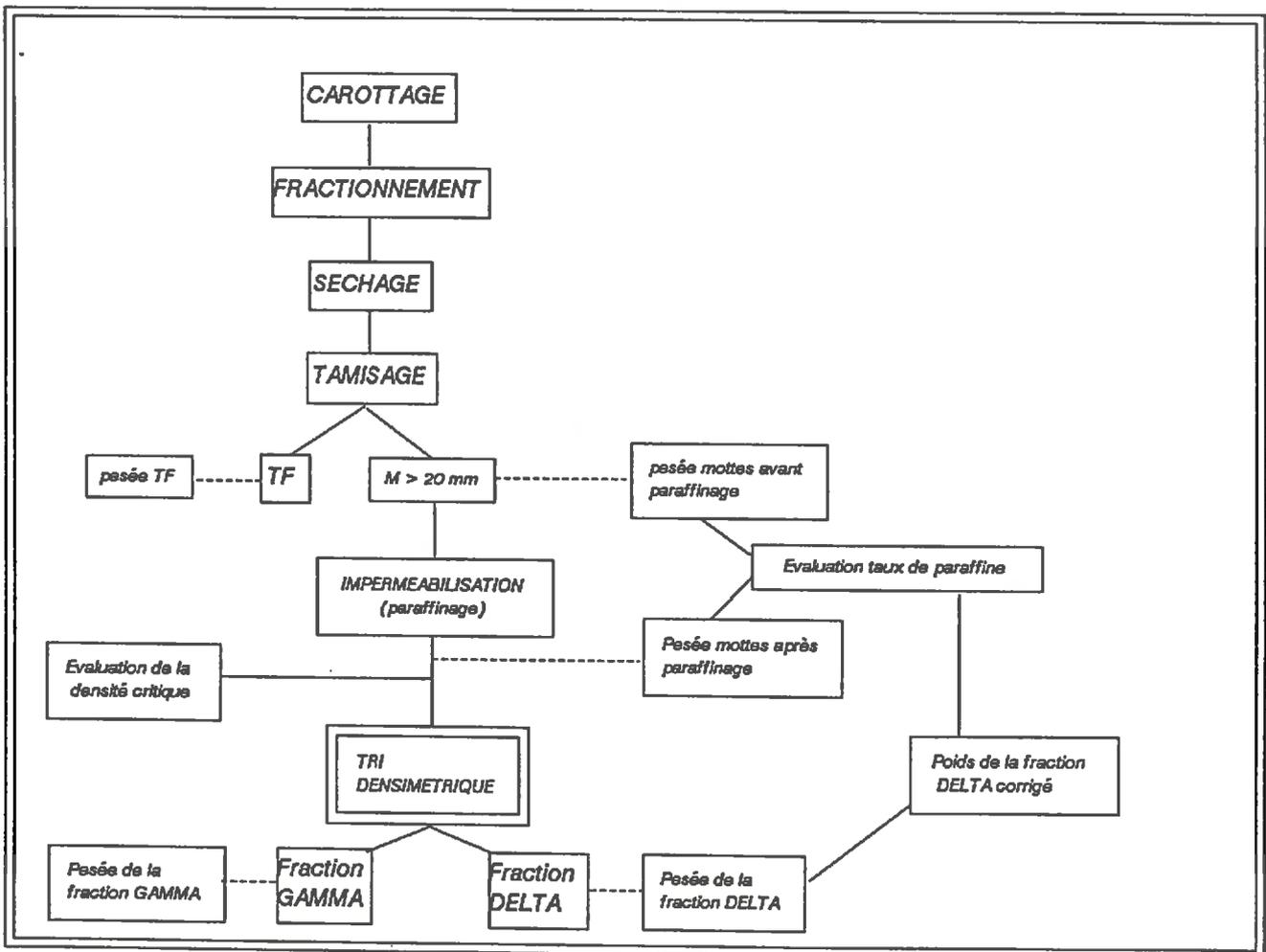
- Stengel P., 1976 – Incidence de la simplification du travail du sol sur la porosité de la couche arable. In Colloque ITCF "*Simplification du travail du sol et production céréalière*", Paris, 7-8/12, 133-149.
- Stengel P., 1979 – Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique *in situ*. *Ann. agron.*, 30, 27-49.
- Stengel P., 1990 – Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In Actes du colloque "*La structure du sol et son évolution*". J. Boiffin & A. Marin-Lafèche Eds, INRA Laon, 15-36.
- Tardieu F., 1984 – *Etude au champ de l'enracinement du maïs. Influence de l'état structural sur la répartition des racines, conséquences sur l'alimentation hydrique*. Thèse, INA-PG ; Paris, 218 p + annexes.
- Tardieu F., 1987 – Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. III – Disponibilité des réserves en eau du sol. *Agronomie*, 7, 279-288.
- Tardieu F., Manichon H., 1987 – Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. *Agronomie*, 7, 123-131 ; 201-211.
- Taylor H.M., Ratliff L.F., 1969 – Root elongation rate of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci.*, 108, 113-119.
- Unger P.W., Van Doren D.M., 1982 – Predicting tillage effects on soil physical properties and process. Spec. Pub. 44. *Am. Soc. Agron.*, Madison, W.I.
- Van Bavel C.H.M., 1953 – Report of the Soil Sci. Soc. Am. Committee on physical analyses 1951-1953, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 17, 416-418.
- Van De Zande J.C., 1991 – Computed reconstruction of field traffic patterns. *Soil Tillage Res.*, 29, 1-15.
- Van Den Akker J.J.H., Van Wijk A.L.M., 1987 – A model to predict sub-soil compaction due to field traffic. In "*Soil compaction and regeneration*", G. Monnier & M.J. Goss Eds, Balkema, Rotterdam, 69-84.
- Voorhess W.B., 1979 – Energy aspects of controlled wheel traffic in the northern corn belt of the United States. *Proc. of the 8th Conf. International Soil Till. Res. Org.*, Stuttgart, 2, 333-338.
- Zobeck T.M., Onstad C.A., 1987 – Tillage and rainfall effects on random roughness : a review. *Soil Tillage Res.*, 9, 1-20.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

		Pages
Annexe 1	Principe de l'évaluation de la teneur pondérale en Δ des compartiments H5-L3 dans les parcelles du Centre Expérimental de Grignon	1
Annexe 2	Évaluation du paramètre "c"	3
Annexe 3	Calcul des valeurs propres de l'équation caractéristique du modèle mathématique associé à la parcelle 1	11
Annexe 4	Expression littérale des valeurs à l'équilibre prévues par le modèle compartimental	17
Annexe 5	Recherche de fonctions continues décrivant l'évolution des concentrations en delta des 5 compartiments (Parcelle 1)	23
Annexe 6	Calcul sur tableur	27
Annexe 7	Calcul des paramètres "a" et "c" (modèle avec glissement)	29
Annexe 8	Calcul des coordonnées d'un point de la bande de terre après retournement par la charrue (modèle avec glissement)	37
Annexe 9	Sorties graphiques du programme point à point	41

ANNEXE 1 : PRINCIPE DE L'EVALUATION DE LA TENEUR PONDERALE EN Δ
DES COMPARTIMENTS H5-L3 DANS LES PARCELLES DU CENTRE
EXPERIMENTAL DE GRIGNON



ANNEXE 2 : EVALUATION DU PARAMETRE c

Il s'agit de calculer :

- La surface BCD de la figure A-21 (cas N° 3)
- La surface SPQR de la figure A-21 (cas N°4)

L'angle limite est $39^{\circ},7$: pour A variant de 90° à $39^{\circ},7$, la partie de la bande qui se trouve dans le compartiment $i + 1$ est un *triangle* ; lorsque A diminue encore, cette partie devient un *trapèze*.

1. Calcul de la valeur de l'angle limite

1.1. Relations géométriques dans le dessin de la figure A-21 (cas N° 4) :

A est l'angle de la bande avec l'horizontale
l est la largeur de travail,
p est la profondeur de travail.

- . $OO' = p$
- . $O'P' = l - p$
- . $RQ = p$
- . $SR = PR' = S'Q$ (par construction)
- . $O'PP'$ est rectangle en P'
- . $R'RQ$ est rectangle en Q
- . $RR' = \frac{p}{\cos A}$

1.2. Pour quelle valeur de A annule-t-on SR ?

$$l = O'Q = O'P + PR' + R'Q = O'P + SR + R'Q$$

$$\text{donc } SR = l - O'P - R'Q$$

$$O'P = \frac{O'P'}{\cos A} \text{ dans le triangle rectangle } O'PP'$$

$$R'Q = \sqrt{RR'^2 - RQ^2} \text{ dans le triangle rectangle } R'RQ$$

donc

$$SR = l - \frac{O'P'}{\cos A} - \sqrt{RR'^2 - RQ^2}$$

$$SR = l - \frac{(l-p)}{\cos A} - \sqrt{\frac{p^2}{\cos^2 A} - p^2} \quad (\text{en utilisant les relations du 1.1})$$

$$SR = l - \frac{(l-p)}{\cos A} - p \sqrt{\frac{1 - \cos^2 A}{\cos^2 A}}$$

$$SR = l - \frac{l-p}{\cos A} - p * \tan A \quad (1)$$

donc

$$SR = 0 \Leftrightarrow l \cos A = l - p + p \sin A \text{ (en multipliant (1) par } \cos A \text{)}$$

En posant $x = \frac{p}{l}$, on peut écrire :

$$\cos A = \sqrt{1-x^2}, \sin A = x, \text{ et } \tan A = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}$$

on obtient alors :

$$\begin{aligned} SR = 0 &\Leftrightarrow l\sqrt{1-x^2} = l - p + px \\ &\Leftrightarrow \sqrt{1-x^2} = 1 - \frac{p}{l} + x\frac{p}{l} \\ &\Leftrightarrow \sqrt{1-x^2} = x^2 - x + 1 \end{aligned}$$

Solution triviale, $x = 0$: l'autre solution s'obtient par résolution graphique (figure A-22) : $\sqrt{1-x^2}$ est l'équation d'un cercle de rayon 1, centré sur (0,0). $x^2 - x + 1$ est l'équation d'une parabole de sommet (0,5 ; 0,75), de concavité tournée vers le haut. La solution est forcément comprise entre 0 et 1. L'intersection des deux courbes donne :

$$x = 0,639, \text{ ce qui est le sinus de l'angle } A = 39^\circ,7.$$

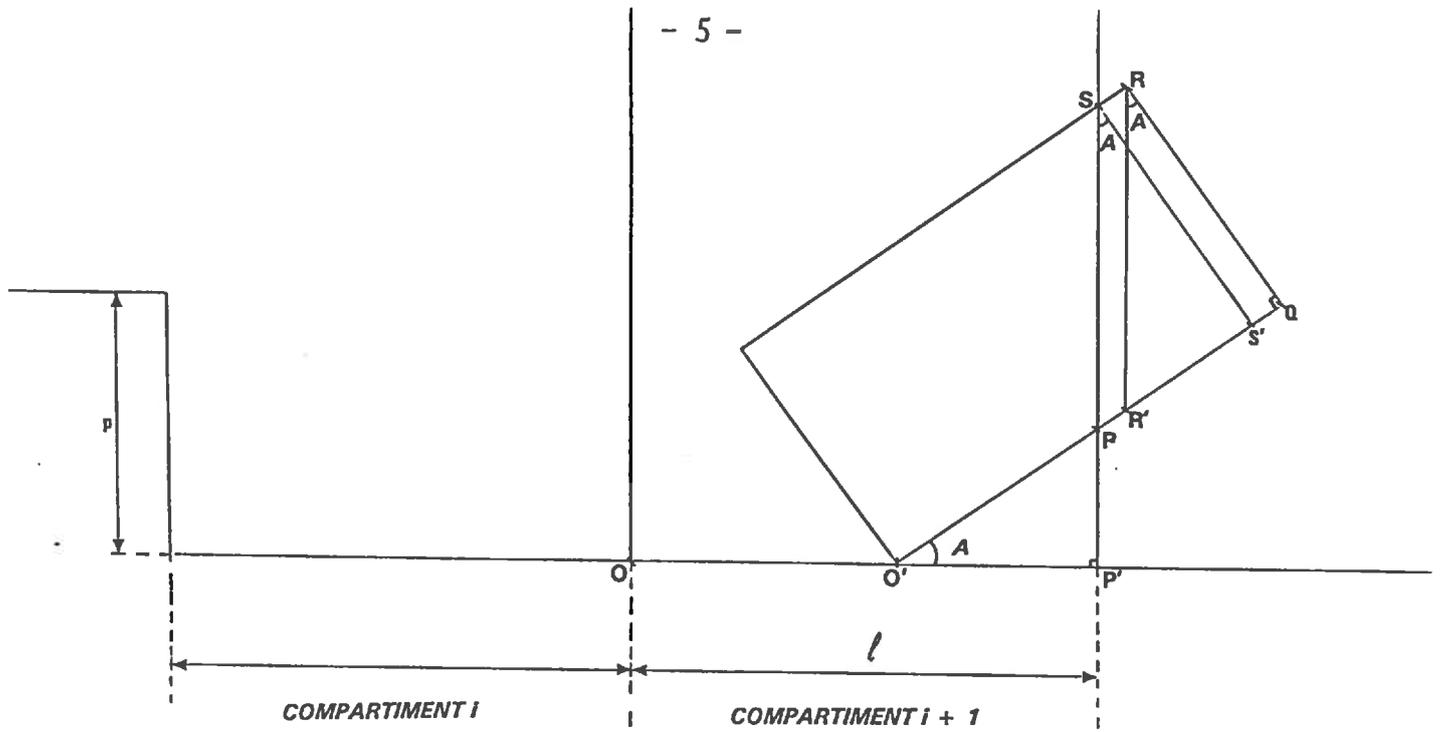


Figure A2-1 : Configuration de la bande de terre après son retournement.

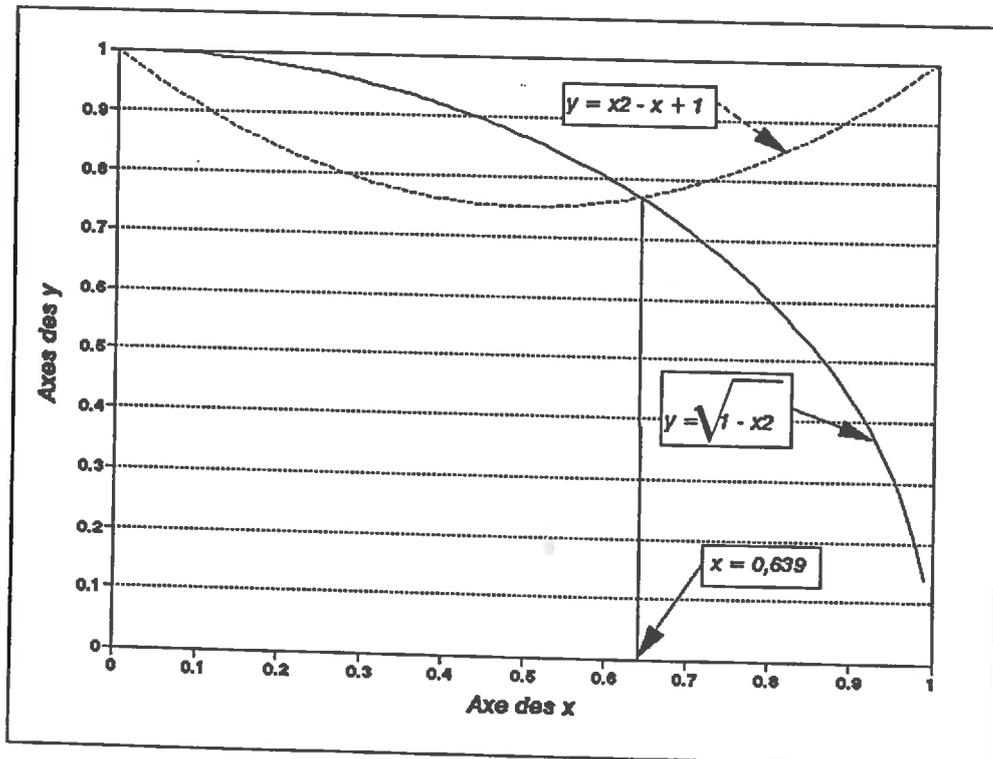


Figure A2-2 : Résolution graphique de $x^2 - x + 1 = \sqrt{1 - x^2}$

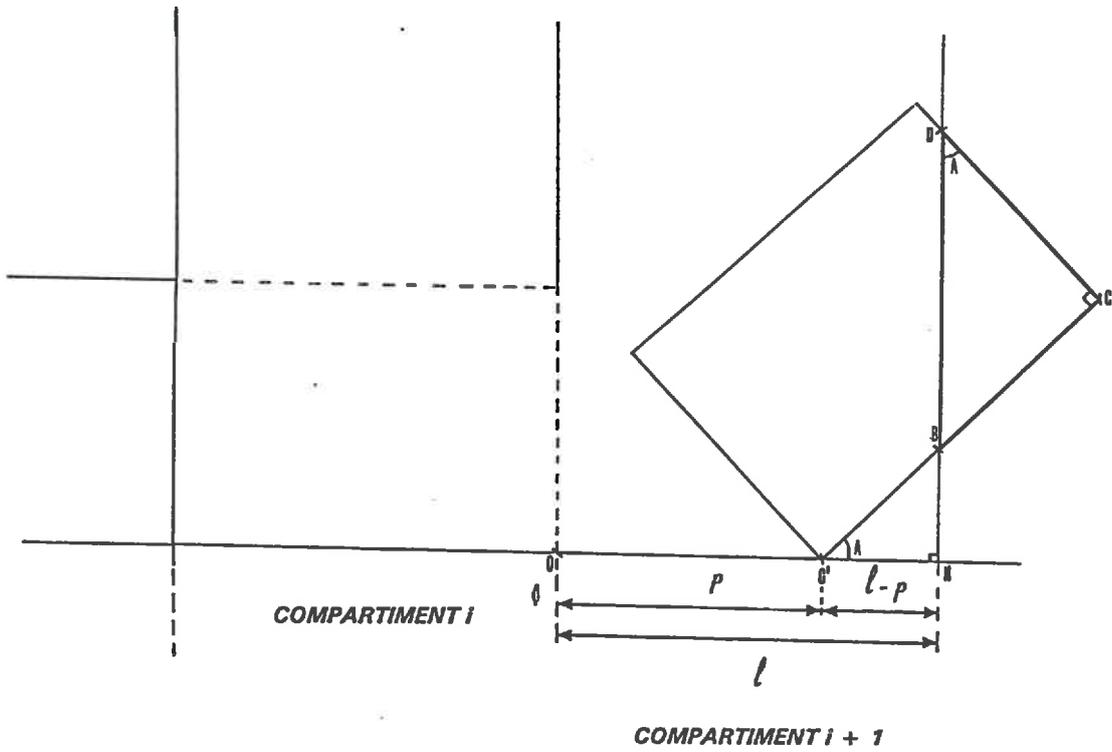


Figure A2-3 : Evaluation de c (triangle).

2. Evaluation des surfaces de la section de bande projetée dans le "compartiment I + 2"

2.1 Pour A variant de 39°,7 à 90°

La surface recherchée est l'aire du triangle rectangle BCD de la figure A2-3. Soit T cette aire.

$$T = \frac{(BC * DC)}{2}$$

BCD étant rectangle en C, on a :

$$DC = \frac{BC}{\tan A}$$

$$\text{donc } T = \frac{BC^2}{2 \tan A}$$

Exprimons BC en fonction de l,p et de l'angle A :

O'BH étant rectangle en H, on a :

$$BC = l - O'B$$

$$BC = l - \frac{(l-p)}{\cos A}, \text{ car } O'B = O'H/\cos A \text{ dans le triangle rectangle } O'BH.$$

$$BC = l \left(1 - \frac{1}{\cos A} + \frac{p}{l \cos A} \right)$$

en utilisant, comme précédemment, la notation $x = p/l = \sin A$, on a

$$\cos A = \sqrt{1-x^2}, \text{ et } \tan A = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}$$

ce qui donne :

$$BC = l \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} + \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} \right), \text{ et, en reportant cette formule dans } T = \frac{BC^2}{2 \tan A}$$

$$T = \frac{\sqrt{1-x^2}}{2x} * \left[l^2 \left(1 + \frac{x-1}{\sqrt{1-x^2}} \right)^2 \right]$$

$$T = pl * \frac{\sqrt{1-x^2}}{2x} * \left[\frac{l}{p} \left(1 + \frac{x-1}{\sqrt{1-x^2}} \right)^2 \right] = pl * \frac{\sqrt{1-x^2}}{2x} * \left[\frac{1}{x} \left(\frac{\sqrt{1-x^2} + x - 1}{\sqrt{1-x^2}} \right)^2 \right],$$

et, en simplifiant cette expression :

$$T = pl * \frac{(1-x)(1-\sqrt{1-x^2})}{x^2 \sqrt{1-x^2}}$$

pl étant la surface de la section de la bande, la valeur du rapport est celle de la fraction de bande projetée dans le compartiment i + 2 (valeur de c).

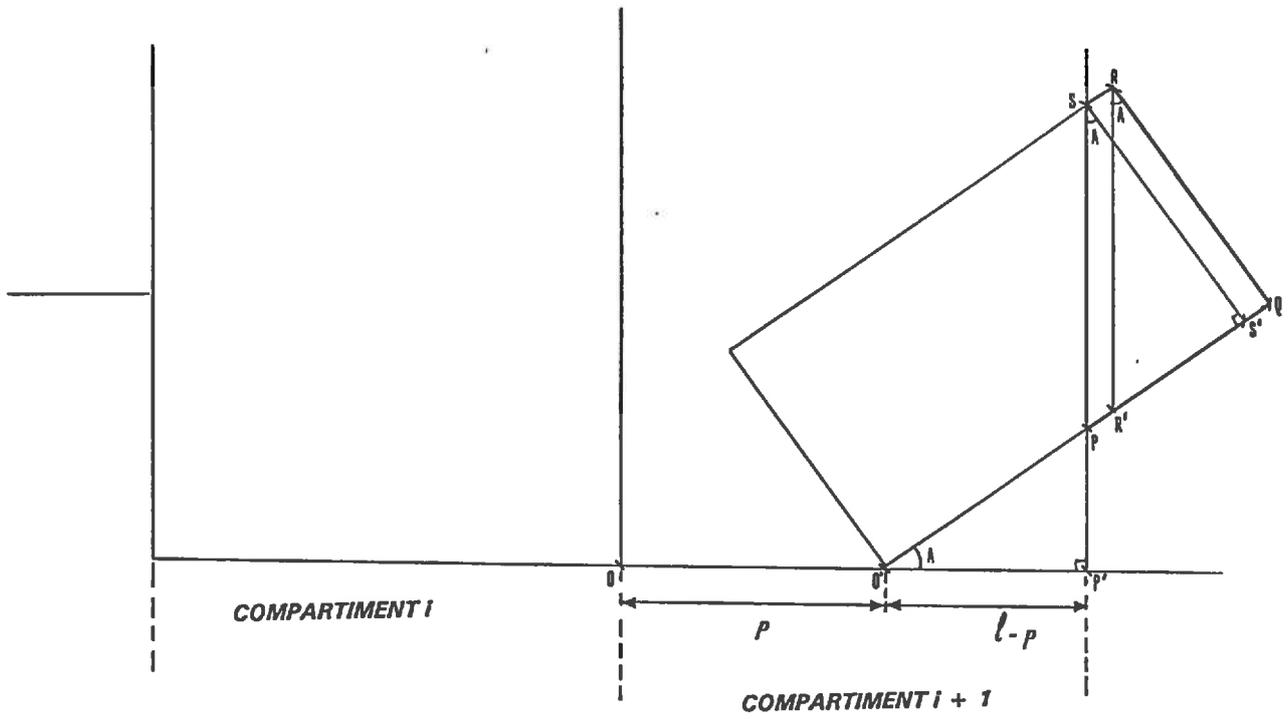


Figure A2-4 : Evaluation de c (trapèze)

2.2 Pour A variant de 0° à 39°,7

La surface à calculer est celle du trapèze PQRS (figure A2-4). L'aire recherchée (T) est alors la somme de celle de SRQS' et de celle de SS'P.

l'aire de SRQS' est : $SR \cdot RQ = SR \cdot p$

l'aire de SS'P est $\frac{(SS' \cdot S'P)}{2} = \frac{S'P \cdot p}{2}$

l'aire recherchée vaut donc : $p \cdot (SR + \frac{S'P}{2})$

SR = PR' par construction

SR = O'Q - QR' - O'P, et S'P = QR'. Donc

$$T = p \cdot (O'Q - QR' - O'P + \frac{QR'}{2})$$

$$T = p \cdot (O'Q - QR'/2 - O'P)$$

$$O'Q = l$$

$$QR' = QR \tan A = p \tan A$$

$$O'P = (l - p) \cos A$$

donc

$$T = p \cdot \left(l - \frac{p}{2} \tan A - \frac{l - p}{\cos A} \right)$$

$$T = pl \cdot \left(1 - \frac{p}{2l} \tan A - 1 + \frac{p}{l \cos A} \right)$$

En posant $x = p/l = \sin A$, on a

$$\cos A = \sqrt{1 - x^2}, \text{ et } \tan A = \frac{x}{\sqrt{1 - x^2}}, \text{ ce qui donne :}$$

$$T = pl \cdot \left(1 - \frac{x^2}{2\sqrt{1 - x^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}} + \frac{x}{\sqrt{1 - x^2}} \right)$$

Soit :

$$T = pl \cdot \frac{\left(\sqrt{1 - x^2} - 1 + x - \frac{x^2}{2} \right)}{\sqrt{1 - x^2}}$$

Comme précédemment, la valeur du rapport est celle de la fraction de bande projetée dans le compartiment i + 2.

ANNEXE 3 : CALCUL DES VALEURS PROPRES DE L'EQUATION CARACTERISTIQUE DU MODELE MATHEMATIQUE ASSOCIE A LA PARCELLE 1.

Afin d'étudier cette équation, remarquons tout d'abord que la matrice $A - \lambda I$ peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{vmatrix} -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F & D-\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E-\lambda & F & 0 \\ 0 & 0 & F & C-\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F & C-\lambda \end{vmatrix}$$

avec :

$$C = (1-r)^2(c^2+(1-c)^2)$$

$$D = (1-r)^2c^2$$

$$E = (1-r)^2(1-c)^2$$

$$F = (1-r)^2c(1-c)$$

Avec ces notations, l'équation caractéristique s'écrit :

$$-\lambda(D-1)[\lambda^3 - (E+2C)\lambda^2 + (2EC + C^2 - 2F^2)\lambda - (EC^2 + EF^2 + CF^2)]$$

Il y a deux racines évidentes, toutes deux inférieures à 1 en valeur absolue :

$$\lambda = 0$$

$$\lambda = D = (1-r)^2c^2$$

Pour trouver les trois autres racines, introduisons une nouvelle variable L telle que :

$\lambda = L + \frac{E+2C}{3}$, le polynôme de degré 3 entre crochets s'écrit :

$$L^3 - \frac{1}{3}[(E-C)^2 + 6F^2]L + \frac{1}{27}(E-C)(-2(E-C)^2 + 9F^2)$$

et devient de la forme $L^3 + pL + q$ (forme canonique).

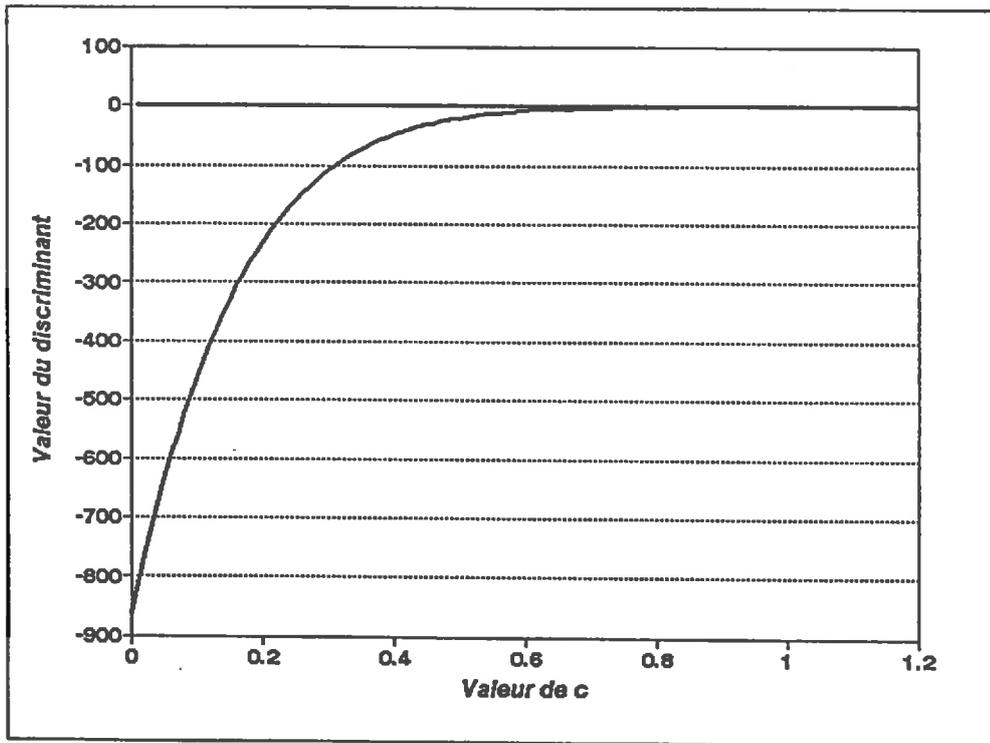


Figure A3-1 : Signe du discriminant de l'équation caractéristique

Ce polynôme admet des racines réelles si et seulement si son discriminant $4p^3 + 27q^2$ est négatif. Or, en développant cette expression, on note que son signe ne dépend que de la valeur du paramètre "c" :

$$4p^3 + 27q^2 < 0 \Leftrightarrow -4(7c^2 - 12c + 6)^3 + c^2(7c^2 - 18c + 9)^2 < 0$$

On a porté sur la figure A3-1 le graphe du polynôme de degré 6 en "c" ci-dessus ; on constate que, pour c variant de 0 à 1, il est toujours négatif.

Ainsi, l'équation caractéristique admet des racines réelles pour toute valeur de r et de c comprise entre 0 et 1.

Il reste à montrer qu'elles sont inférieures à 1 en valeur absolue.

Pour exprimer les racines en fonction de "r" et de "c", on utilise la méthode trigonométrique de résolution d'une équation du troisième degré.

En posant $L = 2\sqrt{\frac{-p}{3}} \cos A$, et en utilisant la relation $\cos 3A = 4 \cos^3 A - 3 \cos A$, il vient trois racines :

$$L_1 = 2\sqrt{\frac{-p}{3}} \cos A$$

$$L_2 = 2\sqrt{\frac{-p}{3}} \cos(A + 2\pi/3)$$

$$L_3 = 2\sqrt{\frac{-p}{3}} \cos(A + 4\pi/3)$$

$$\text{avec } \cos 3A = \frac{-q}{2} \sqrt{\frac{-p^3}{27}}$$

En développant les valeurs de p et de q, on constate que l'on peut éliminer r et que $\cos 3A$ s'exprime en fonction de c seulement :

$$\cos 3A = \frac{c(7c^2 - 18c + 9)}{3(7c^2 - 12c + 6)^{\frac{3}{2}}}$$

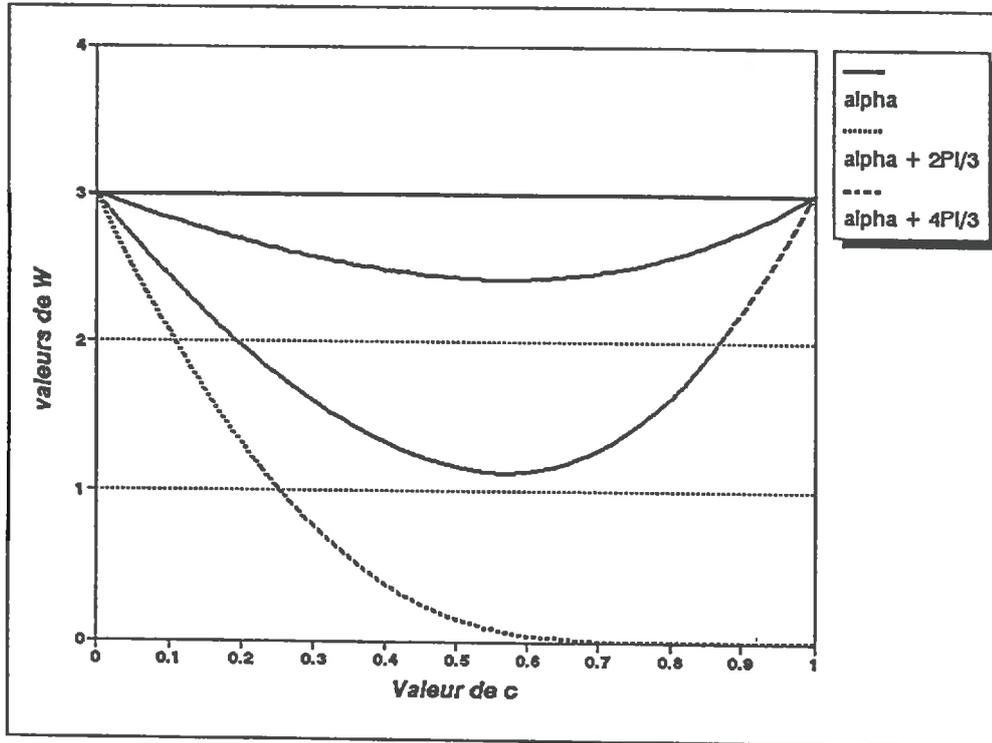


Figure A3-2 : Etude du module des racines de l'équation caractéristique : valeur de W

Donc, en revenant à l'expression des racines de l'équation caractéristique :

$$\lambda_i = \frac{1}{3}(1-r)^2 \left[2c\sqrt{7c^2-12c+6} \cos A_i + 5c^2 - 6c + 3 \right] - 1$$

où

$$\lambda_i = \frac{1}{3}(1-r)^2 W - 1$$

avec $A_1 = A$; $A_2 = A + 2\pi/3$ et $A_3 = A + 4\pi/3$

La quantité W ne dépend que de " c ". Il suffit donc de montrer que, pour " c " variant de 0 à 1, cette quantité est comprise entre 0 et 3 pour montrer que les trois racines sont comprises entre -1 et 0.

Sur le graphe de la figure A3-2, on a porté les valeurs de W pour les trois angles et pour " c " variant de 0 à 1. On constate que la condition recherchée est bien remplie.

Ainsi la matrice A admet 5 valeurs propres réelles de module inférieur à 1 ; le système est donc asymptotiquement stable quelles que soient les valeurs de " r " et de " c " choisies entre 0 et 1 pour le paramétrer.

ANNEXE 4 : EXPRESSION LITTERALE DES VALEURS A L'EQUILIBRE PREVUES PAR LE MODELE COMPARTIMENTAL

N.B. On se place ici dans le cas où les U^t sont constants (même valeur de forçage du compartiment 1 tous les ans).

$$U^t = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

On reprend par ailleurs les notations utilisées à l'annexe 3, pour simplifier l'expression des équations :

$$\begin{aligned} E &= (1-r)^2 \cdot (1-c)^2 \\ F &= (1-r)^2 \cdot c \cdot (1-c) \\ C &= (1-r)^2 \cdot (c^2 + (1-c)^2) \\ D &= (1-r)^2 \cdot c^2 \end{aligned}$$

A l'équilibre, on a $X^{2k} = X^{2(k+2)} = X_e$, où X_e est le vecteur d'état à l'équilibre. On a donc:

$$X^{2k} - X^{2(k-1)} = X_e - X_e = 0$$

$$\Leftrightarrow (1-r) \cdot A \cdot X^{2(k-1)} + [(1-r) \cdot M + I] \cdot U^{2k} - X^{2(k-1)} = 0$$

$$\Leftrightarrow [(1-r)^2 \cdot A - I] \cdot X^{2(k-1)} = -[(1-r) \cdot M + I] \cdot U^{2k}$$

En développant cette équation matricielle, on obtient un système d'équations linéaires dont les cinq inconnues sont les valeurs des concentrations des cinq compartiments :

$$-x_1 = -1$$

$$((1-r)^2 c^2 - 1)x_2 = - (1-r)(1-c)((1-r)c + 1)$$

$$[(1-r)^2(1-c)^2 - 1]x_3 + (1-r)^2 c(1-c)x_4 = -c(1-r)$$

$$(1-r)^2 c(1-c)x_3 + [(1-r)^2(c^2 + (1-c)^2) - 1]x_4 + (1-r)^2 c(1-c)x_5 = 0$$

$$(1-r)^2 c(1-c)x_4 + [(1-r)^2(c^2 + (1-c)^2) - 1]x_5 = -(1-r)^2 c(1-c)$$

En reprenant les notations déjà utilisées, ce système s'écrit, de manière plus simple :

$$x_1 = 1$$

$$(D-1)x_2 = C_1$$

$$(E-1)x_3 + Fx_4 = C_2$$

$$Fx_3 + (C-1)x_4 + Fx_5 = 0$$

$$Fx_4 + (C-1)x_5 = C_3$$

Avec :

$$C_1 = -(1-r)(1-c)((1-r)c + 1)$$

$$C_2 = -c(1-r)$$

$$C_3 = -(1-r)^2 c(1-c)$$

Les valeurs à l'équilibre de x_1 et x_2 s'obtiennent immédiatement :

$$x_1 = 1$$

$$x_2 = C_1/(D-1)$$

Les autres valeurs sont les solutions du système de trois équations restant :

$$x_3 = \frac{-1}{(E-1)} * \frac{C_2/(E-1) + C_3/(C-1)}{(-1/(E-1) - (C-1)/F^2 + 1/(C-1))} + \frac{C_2}{(E-1)}$$

$$x_4 = 1/F * \frac{C_2/(E-1) + C_3/(C-1)}{(-1/(E-1) - (C-1)/F^2 + 1/(C-1))}$$

$$x_5 = \frac{-1}{(C-1)} * \frac{C_2/(E-1) + C_3/(C-1)}{(-1/(E-1) - (C-1)/F^2 + 1/(C-1))} + \frac{C_3}{(C-1)}$$

Dans ce calcul, nous n'avons considéré que les années paires, en supposant de plus que l'on avait alternance d'un labour **droite** les années paires et d'un labour **gauche** les années impaires.

Ce faisant, nous avons admis que :

1. Avec la condition d'un labour **droite** les années paires, il suffit d'inverser les valeurs des compartiments 2 et 5 d'une part, 3 et 4 d'autre part, pour connaître l'état d'équilibre du système les années **impaires**.

2. Lorsque le labour verse vers la gauche les années paires, le résultat ci-dessus est celui d'une année impaire, l'état pour les années paires s'obtenant en faisant l'inversion 2-5 et 3-4.

Bien entendu, les moyennes 2-5, 3-4 et *a fortiori* la moyenne pour les 4 compartiments sont constantes lorsque le système est à l'équilibre.

Pour le vérifier, réécrivons l'équation d'état avec un labour gauche au temps "t" :

$$X^t = (1-r)M' * X^{t-1} + U^t \text{ (labour gauche)}$$

et

$$X^{t-1} = (1-r)M * X^{t-2} + U^{t-1} \text{ (labour droite) (1)}$$

donc :

$$X^t = (1-r)M' * [(1-r)M * X^{t-2} + U^{t-1}] + U^t$$

(en remplaçant X^{t-1} par sa valeur dans (1))

$$= (1-r)^2 M' * M * X^{t-2} + [(1-r)M' + I] * U^t \text{ (I = matrice identité)}$$

car $U^{t-1} = U^t$, avec nos hypothèses (même valeur de forçage du compartiment 1 tous les ans).

On a donc :

$$X^t = (1-r)^2 A' * X^{t-2} + [(1-r)M' + I] * U^t$$

avec :

$$A' = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c(1-c) & (1-c)^2 + c^2 & c(1-c) & 0 & 0 \\ 0 & c(1-c) & (1-c)^2 + c^2 & c(1-c) & 0 \\ 0 & 0 & c(1-c) & (1-c)^2 & 0 \\ c(1-c) & 0 & 0 & 0 & c^2 \end{vmatrix}$$

et, quel que soit t, $[(1-r)M' + I] * U^t =$

$$\begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ (1-r)c \\ (1-r)(1-c) \end{vmatrix}$$

En développant pour obtenir l'expression de chacune des concentrations au temps "t" en fonction des concentrations au temps t-2, il vient :

$$x_1^t = 1$$

$$x_2^t = (1-r)^2 [(c(1-c)x_1^{t-2} + ((c^2+(1-c)^2)x_2^{t-2} + c(1-c)x_3^{t-2})]$$

$$x_3^t = (1-r)^2 [(c(1-c)x_2^{t-2} + (c^2+(1-c)^2)x_3^{t-2} + c(1-c)x_4^{t-2}]$$

$$x_4^t = (1-r)^2 [c(1-c)x_3^{t-2} + (1-c^2)x_4^{t-2}] + (1-r)c$$

$$x_5^t = (1-r)^2 [c(1-c)x_1^{t-2} + c^2x_5^{t-2}] + (1-r)(1-c)$$

On constate, en comparant ces égalités avec celles données en présentant l'équation de récurrence, que les concentrations des compartiments x_2 et x_5 d'une part et x_3 et x_4 d'autre part sont très exactement inversées (autrement dit, en remplaçant x_2 par x_5 et x_3 par x_4 dans ces égalités, on retrouve celles du texte).

Or, ce cas de figure correspond :

au cas d'une année **impaire** dans l'hypothèse d'un labour **droite** les années **paires**,
au cas d'une année **paire** lorsque les labours versent à **gauche** les années **paires**.

Les hypothèses émises aux points 1 et 2 ci-dessus sont donc vérifiées.

Le développement de ces expressions en fonction des valeurs de c et r donne des formules un peu lourdes à manipuler. Il est possible cependant de les programmer sur un tableur, afin de calculer les valeurs correspondant à un jeu de paramètres donné.

Avec les valeurs retenues pour la parcelle 1 ($c = 0,24$ et $r = 0,20$), on obtient :

$$x_1 = 100 \%$$

$$x_2 = 75,25 \%$$

$$x_3 = 32,43 \%$$

$$x_4 = 10,66 \%$$

$$x_5 = 21,76 \%$$

ce qui donne une teneur moyenne pour L3 de 35,03 %. On retrouve bien la valeur calculée sur tableur.

Il est possible, en programmant les formules ci-dessus, d'étudier la sensibilité des valeurs atteintes à l'équilibre aux paramètres c et r .

a. Sensibilité aux valeurs de "c" (figure A4-1)

Les valeurs admissibles de ce paramètre sont comprises entre 7 et 28 % (cf. Figure II-9).

Lorsque c varie de la plus faible à la plus forte de ces 2 valeurs, on constate que la teneur du compartiments 2 décroît légèrement (de 79 à 74 %), tout en restant nettement supérieure à celle des autres compartiments. La teneur de ces derniers augmente au contraire, ce qui compense la baisse précédente et entraîne une faible variation de la teneur à l'équilibre, qui augmente légèrement, ce qui est cohérent avec le fait que lorsque c croît, la proportion de delta passant de la "source", le compartiment 1 vers la position L3 augmente.

b. Sensibilité à la valeur de "r" (figure A4-2)

On a fait varier ce paramètre de 0 à 100 % de disparition.

On constate sur la figure A4-2 que le modèle est beaucoup plus sensible aux variations de ce paramètre. Les valeurs à l'équilibre passent de 100 % de delta en L3 lorsqu'il n'y a pas de disparition à 0 % lorsque celle-ci affecte tout le delta. La décroissance est très rapide dès que r n'est plus nul (la teneur moyenne passe de 100 % à 50 % lorsque r passe de 0 à 0,1), pour s'amortir ensuite.

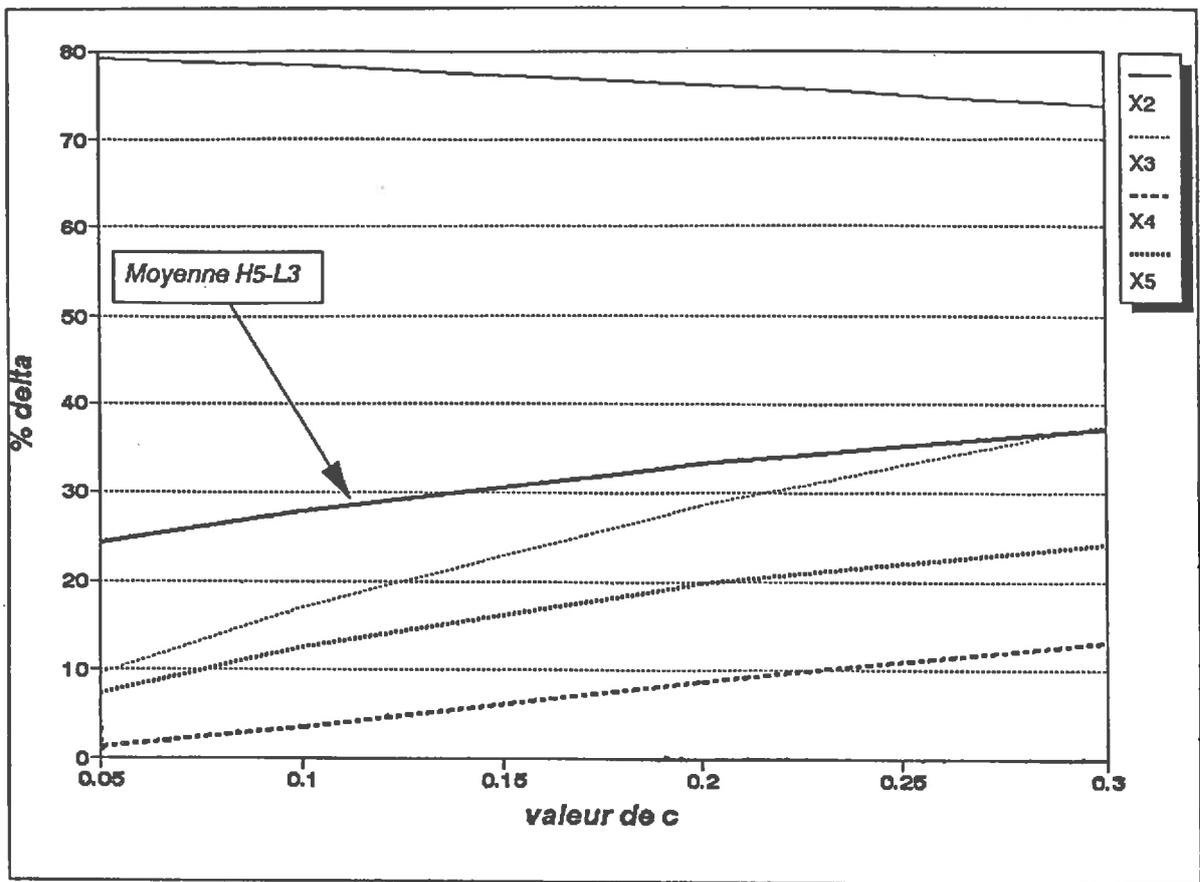


Figure A4-1 : Sensibilité des valeurs d'équilibre au paramètre "c" ($r = 0,20$)

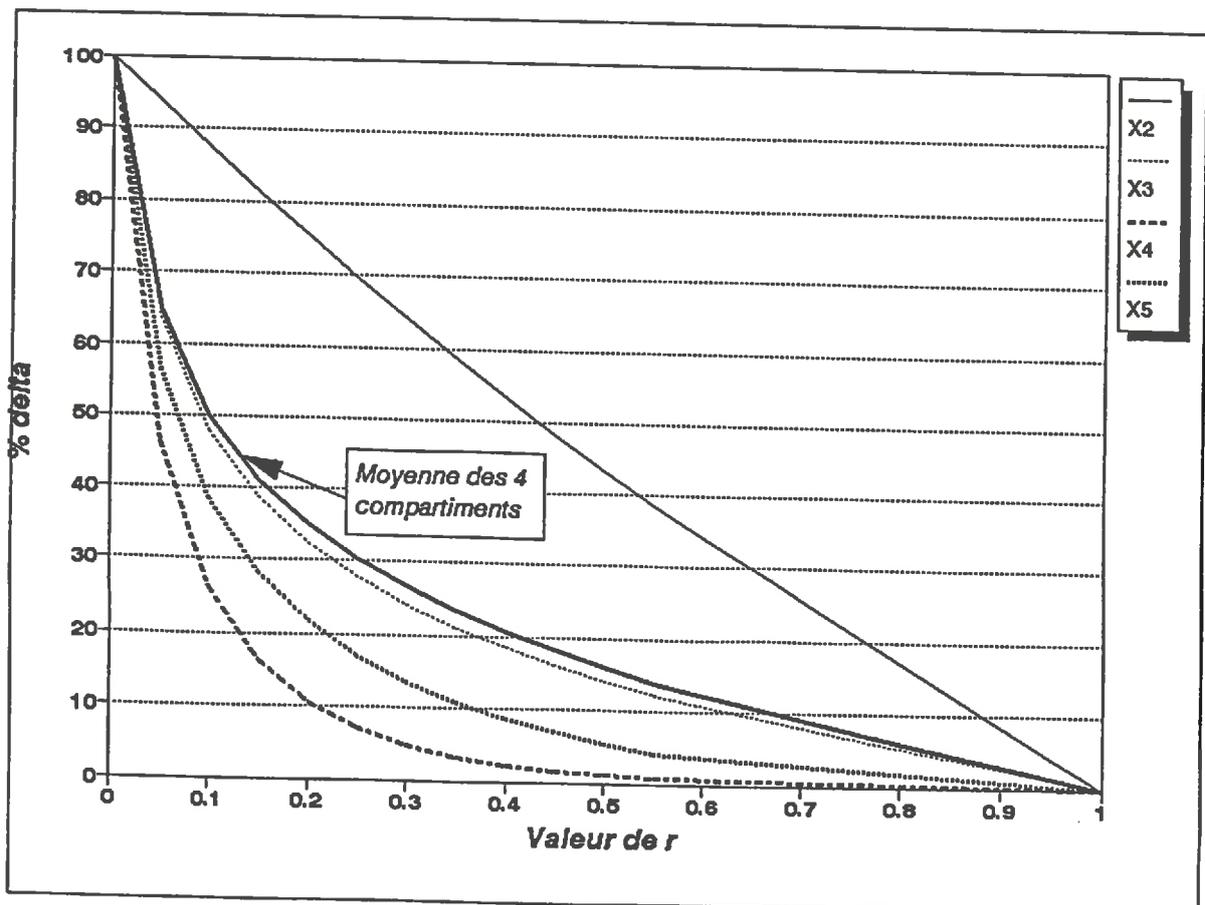


Figure A4-2 : Sensibilité des valeurs d'équilibre au paramètre "r" ($c = 0,24$).

ANNEXE 5 : RECHERCHE DE FONCTIONS CONTINUES DECRIVANT L'EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN DELTA DES 5 COMPARTIMENTS (PARCELLE 1)

Nous recherchons l'écriture sur un pas de temps de deux ans, en notant que cela suffit à connaître le fonctionnement en chaque instant du fait de la symétrie entre compartiments.

Les fonctions recherchées sont solutions du système d'équations différentielles que l'on obtient en considérant que les variations du système sont continues au cours du temps. On écrit pour cela :

$$dX^t/dt = X^{t+2} - X^t = (A - I) * X^t + B * U^t$$

avec les mêmes notations qu'à l'annexe 4 :
 $A = (1-r) * MM'$ et $B = [(1-r)M + I]$.

C'est la représentation, en notations matricielles, d'un système d'équations différentielles linéaires du premier ordre avec second membre. En le développant, on obtient (les x_i étant les fonctions du temps recherchées) :

$$dx_1/dt = 0$$

$$dx_2/dt = ((1-r)^2 c^2 - 1)x_2 + (1-r)(1-c)((1-r)c + 1)$$

$$dx_3/dt = ((1-r)^2(1-c)^2 - 1)x_3 + (1-r)^2 c(1-c)x_4 + c(1-r)$$

$$dx_4/dt = (1-r)^2 c(1-c)x_3 + ((1-r)^2(c^2 + (1-c)^2) - 1)x_4 + (1-r)^2 c(1-c)x_5$$

$$dx_5/dt = (1-r)^2 c(1-c)x_4 + ((1-r)^2(c^2 + (1-c)^2) - 1)x_5 + (1-c)^2 c^2 x_5 + (1-r)^2 c(1-c)$$

Ce système s'écrit, en reprenant les notations déjà utilisées aux annexes 3 et 4 pour simplifier l'expression des coefficients :

$$dx_1/dt = 0$$

$$dx_2/dt - (D-1)x_2 = C_1$$

$$dx_3/dt - (E-1)x_3 - Fx_4 = C_2$$

$$dx_4/dt - Fx_3 - (C-1)x_4 - Fx_5 = 0$$

$$dx_5/dt - Fx_4 - (C-1)x_5 = C_3$$

On remarque que l'équation pour le compartiment N°2 est de la forme $dx_2/dt - (D-1)x_2 = (D-1)K$, avec $K = C_1/(D-1)$. C'est l'équation différentielle d'un modèle monomoléculaire, et la solution s'obtient aisément par intégration :

$$x_2 = K - (K - x_2^0)e^{-(1-D)t}$$

où " x_2^0 " est la concentration à l'origine du compartiment 2 et " K " sa valeur à l'équilibre.

Pour les trois autres compartiments, les solutions s'obtiennent en résolvant le système de trois équations différentielles du premier ordre, avec second membre restant.

Les solutions d'un tel système sont de la forme :

$$x_i = x_i^e + \sum_{j=1}^3 B_j e^{k_j t}$$

" x_i^e " est la teneur du compartiment i à l'équilibre, et les k_j sont les trois racines de l'équation caractéristique du système d'équations.

Celle-ci est le polynôme de degré trois que nous avons étudié à l'annexe 3 pour vérifier l'existence d'un équilibre. On montre, par un raisonnement analogue à celui tenu à l'annexe 3, que ses racines sont *réelles et négatives*, ce qui assure, quelles que soient les valeurs de c et de r , de l'atteinte d'un équilibre stable (les solutions tendent vers " x_i^e " quand " t " tend vers l'infini, car les exponentielles ont des exposants négatifs).

L'expression littérale des fonctions solutions du système d'équation est en pratique impossible à établir pour un système à 5 compartiments ; on peut cependant calculer ces fonctions pour le jeu de paramètres déjà utilisé ($c = 0.24$; $r = 0.20$), et avec une teneur nulle à l'origine dans chacun des compartiments de L3 :

$$\begin{aligned} x_1 &= 100 \\ x_2 &= 75.25*(1 - e^{-0.963t}) \\ x_3 &= 32.44 - 14.53 e^{-0.436t} - 12.18 e^{-0.769t} - 5.73 e^{-0.611t} \\ x_4 &= 10.71 - 24.31 e^{-0.436t} + 14.50 e^{-0.769t} - 0.90 e^{-0.611t} \\ x_5 &= 21.84 - 18.10 e^{-0.436t} - 9.64 e^{-0.769t} + 5.90 e^{-0.611t} \end{aligned}$$

où les " x_i " représentent les teneurs en % des 5 compartiments et " t " le temps en années. On constate que les valeurs d'équilibre sont très proches des valeurs trouvées précédemment. La teneur moyenne du compartiment H5-L3 à l'équilibre est :

$$Te = (75.25 + 32.44 + 10.71 + 21.84)/4 = 35.06 \%$$

valeur à rapprocher de 35.03% trouvé par la méthode basée sur l'équation de récurrence.

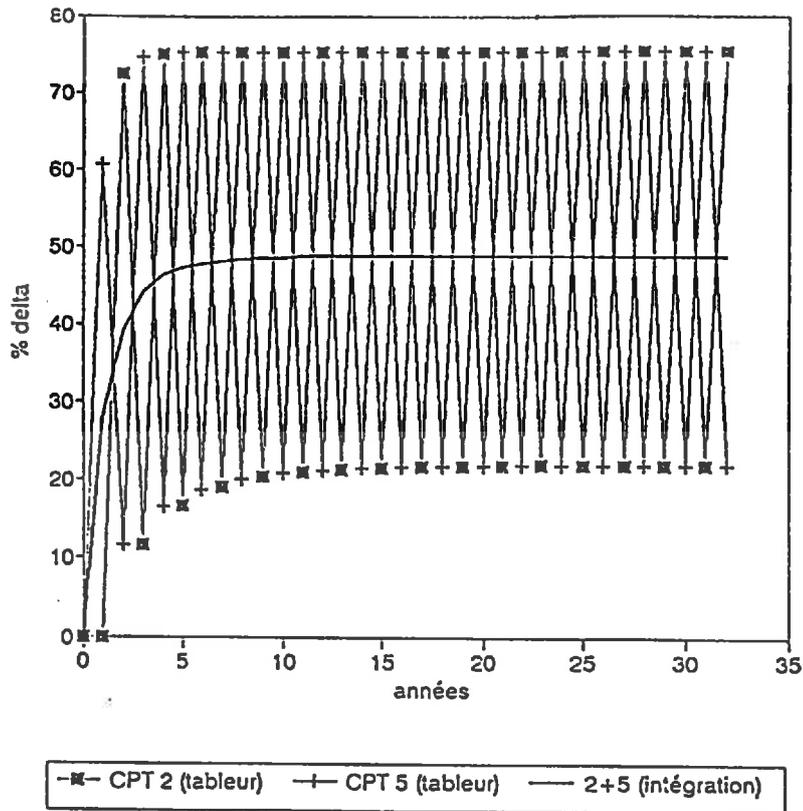


Figure A5-1 : Evolution de la teneur en Δ dans les compartiments latéraux
(Comparaison des valeurs obtenues sur tableur et par intégration du système d'équations différentielles)

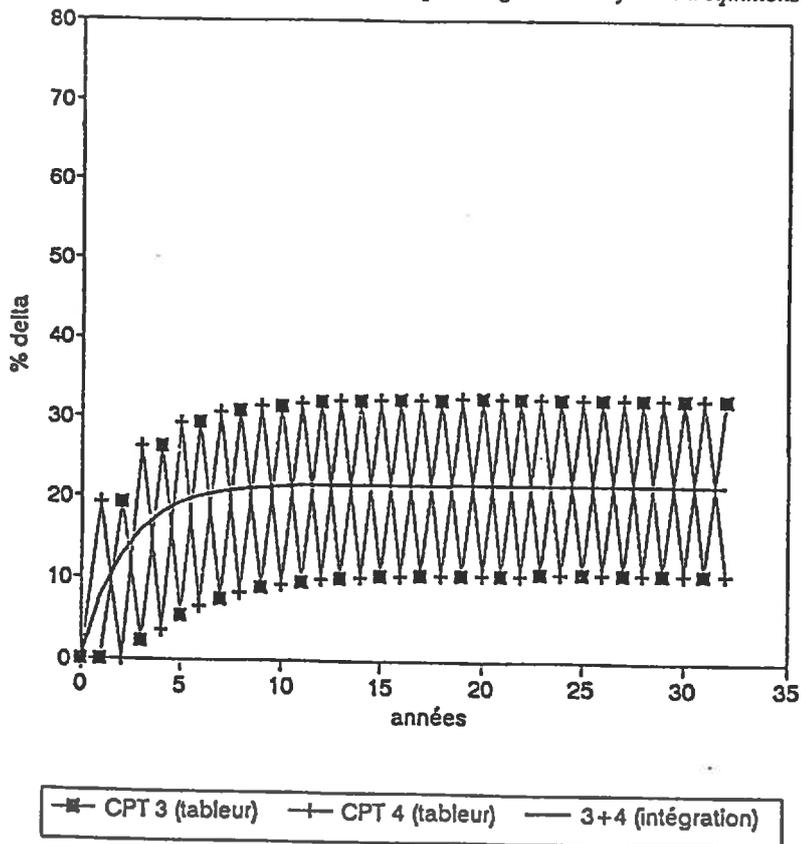


Figure A5-2 : Evolution de la teneur en Δ dans les compartiments centraux
(Comparaison des valeurs obtenues sur tableur et par intégration du système d'équations différentielles)

Le pas de temps choisi (2 ans) nous interdit de représenter ces courbes avec en abscisse le temps en années. On peut cependant, du fait de la symétrie du système, tracer l'évolution annuelle de *la moyenne des compartiments centraux (3 et 4), de celle des compartiments latéraux (2 et 5), ainsi que celle de l'ensemble de la position L3.*

Ces courbes sont représentées aux figures A5-1 et A5-2, où l'on a porté également les valeurs obtenues pour chaque compartiment par le calcul sur tableur. On constate que l'on obtient un ajustement très correct de l'évolution de ces moyennes (avec cependant un léger écart les premières années, dû à l'approximation que l'on fait en retenant une dynamique continue et non discrète).

ANNEXE 6 : CALCUL SUR TABLEUR

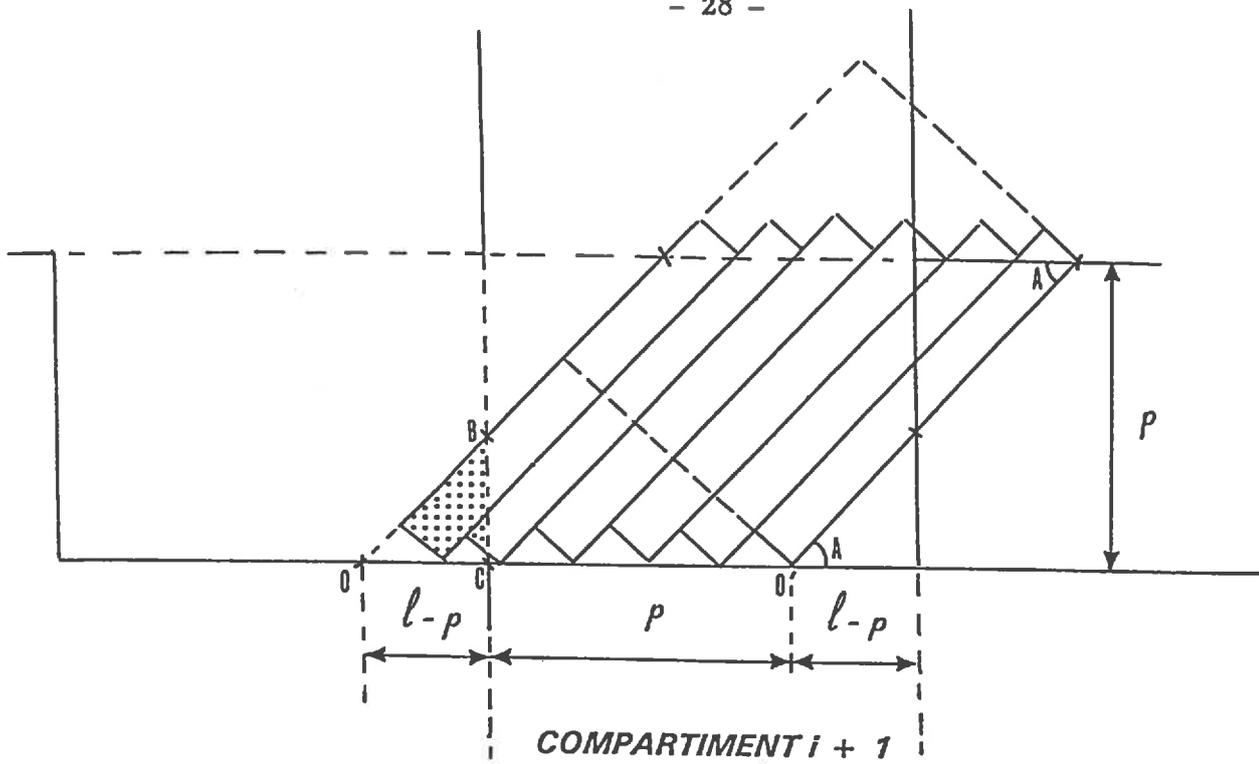
Les formules ont été programmées sur Quattro Pro (version 4.0). Nous présentons l'aspect de la feuille de calcul, avec le paramétrage correspondant à la parcelle 1.

années	c 0.24		1 - r 0.80			moyenn tableur	
	cpt1	cpt2	cpt3	cpt4	cpt5	cpt1	
0	100	0.00	0.00	0.00	0.00	100	0.00
1	100	0.00	0.00	19.20	60.80	100	20.00
2	100	72.47	19.20	0.00	11.67	100	25.84
3	100	11.67	2.24	26.30	74.71	100	28.73
4	100	75.15	26.30	3.60	16.42	100	30.37
5	100	16.68	5.34	29.18	75.23	100	31.61
6	100	75.24	29.34	6.45	18.77	100	32.45
7	100	19.08	7.53	30.61	75.25	100	33.12
8	100	75.25	30.80	8.24	20.06	100	33.59
9	100	20.31	8.86	31.39	75.25	100	33.95
10	100	75.25	31.55	9.29	20.79	100	34.22
11	100	20.96	9.64	31.84	75.25	100	34.42
12	100	75.25	31.95	9.88	21.21	100	34.57
13	100	21.32	10.08	32.10	75.25	100	34.69
14	100	75.25	32.16	10.22	21.45	100	34.77
15	100	21.52	10.33	32.24	75.25	100	34.84
16	100	75.25	32.28	10.41	21.59	100	34.88
17	100	21.63	10.48	32.32	75.25	100	34.92
18	100	75.25	32.35	10.52	21.67	100	34.95
19	100	21.69	10.56	32.37	75.25	100	34.97
20	100	75.25	32.39	10.58	21.71	100	34.98
21	100	21.72	10.60	32.40	75.25	100	34.99
22	100	75.25	32.41	10.62	21.73	100	35.03

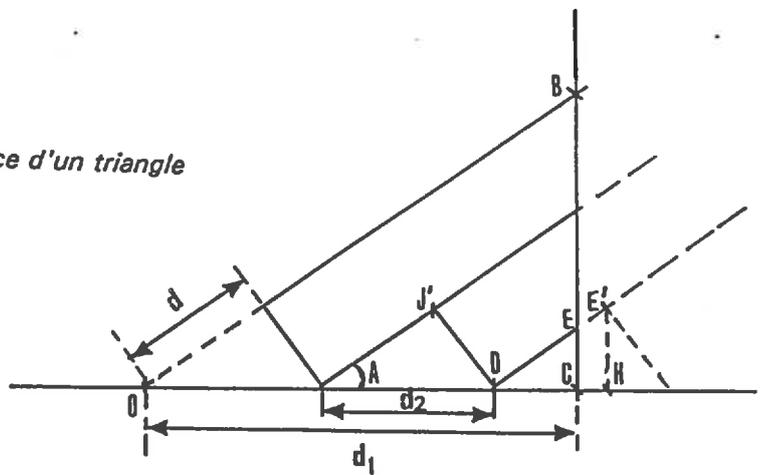
Sur la seconde ligne, les valeurs des paramètres c (24 %) et 1-r (80 %).

Sur la 2ème colonne, la teneur en delta du compartiment 1 est fixée à 100 %.

La dernière colonne donne la valeur moyenne des compartiments 2 à 4 (compartiments de L3).



a. S_3 est la surface d'un triangle



b. S_3 est la surface d'un polygone

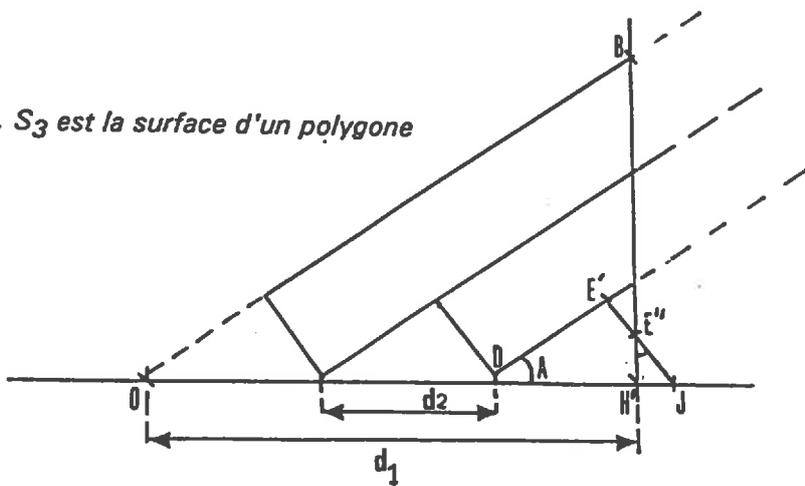


Figure A7-1 : Evaluation du paramètre "a", dans le cas du mode de retournement de la bande de terre avec déformation

ANNEXE 7 : CALCUL DES PARAMETRES a ET c ; MODELE AVEC GLISSEMENT

On a présenté aux figures A7-1 et A7-2, la bande découpée suivant 5 plans de cisaillement. Il s'agit de calculer, en fonction de p, l, A et n (le "degré de découpage", égal au nombre de plans de cisaillement plus 1), les proportions de la surface de la section de la bande de terre restant dans le compartiment d'origine et projetée dans le compartiment "i+2" (paramètres a et c du modèle avec glissement).

1. Calcul de a

La surface à calculer (S) est celle du triangle OBC (S_1), à laquelle il faut retrancher les parties de vide à la base de la bande. Ces dernières sont constituées de N triangles rectangles entiers (la valeur de N dépend du degré de découpage), de surface S_2 et d'une portion de triangle, de surface S_3 , qui est, suivant les cas, un triangle (DCE sur le schéma A7-1a) ou un polygone (DE'E'H' sur le schéma A7-1b).

$$S = S_1 - NS_2 - S_3$$

$$d_1 = OC = l - p \text{ (schéma A7-1a)}$$

$$\text{La surface de OBC est donc } S_1 = \frac{1}{2} d_1 * BC = \frac{1}{2} d_1^2 \tan A, \text{ car } BC = OC * \tan A.$$

$$S_1 = \frac{1}{2} (l-p)^2 \tan A.$$

d_2 (hypothénuse des triangles élémentaires) vaut $\frac{l}{n}$, car OO' est découpé, par

construction en n parties égales. Le nombre de triangles entiers est $N = E \left[\frac{d_1}{d_2} \right] = E \left(\frac{(l-p)}{\frac{l}{n}} \right)$,

où E désigne la partie entière.

$$d_3 = \frac{l}{n} \cos A$$

La surface de chaque triangle est $S_2 = \frac{1}{2} d_3 * DJ'$ où DJ' vaut $\frac{p}{n}$, par construction (c'est la largeur de chaque rectangle élémentaire découpé dans la bande). Donc $S_2 = \frac{1}{2} \frac{l}{n} \cos A \frac{p}{n}$

$$S_2 = \frac{pl}{2n^2} \cos A$$

Il reste à calculer S_3 , la surface de la portion de triangle coupée par la limite du compartiment.

Si $DC < DH$, soit lorsque $d_1 - Nd_2 < DH = \frac{l}{n} \cos^2 A$, cette surface est celle d'un triangle (DCE rectangle en C) ; sinon c'est la surface d'un polygone (DE'E''H', sur le schéma A7-1b).

. Cas d'un triangle (A7-1a)

$$S_3 = \frac{1}{2} DC \cdot EC = \frac{1}{2} DC^2 \cdot \tan A$$

$$\begin{aligned} DC &= d_1 - Nd_2 \\ &= (l - p) - N \frac{l}{n} \end{aligned}$$

$$S_3 = (l - p) - \frac{l}{n} E \left(\frac{(l - p)}{\frac{l}{n}} \right)$$

. Cas d'un polygone (A7-1b)

Dans ce cas, plutôt que de calculer directement sa surface, on retranche celle du triangle H'E''J, plus facile à calculer, de celle d'un triangle entier.

La surface de H'E''J est $\frac{1}{2} H'J^2 \cdot \tan A$, avec $H'J = (N+1)d_2 - d_1 = (N+1)d_2 - (l-p)$.

Donc :

$$S_3 = S_2 - \frac{\left[(N+1) \frac{l}{n} - (l-p) \right]^2}{2} \tan A$$

2. Calcul de c

On procède de la même manière que pour le calcul de a : la surface à calculer (S) est celle (S₁) du triangle FOC, à laquelle il faut *ajouter* les "pointes" qui dépassent au-dessus de la ligne FC. Ces dernières sont constituées de N triangles rectangles (de surface S₂), et d'une portion de triangle, de surface S₃, qui est, suivant les cas, un triangle (FEI sur la figure A7-2b) ou un polygone (EDC'F sur le schéma A7-2a).

$$S = S_1 + NS_2 + S_3$$

d₁ (longueur de FC) vaut $p - l(1 - \cos A)$.

En effet :

$$\cos A = d_1/CO$$

$$CO = l - OO'$$

$$OO' = \frac{(l-p)}{\cos A}, \text{ car } \cos A = O'O''/O'O = (l-p)/O'O$$

$$\text{donc } CO = l - \frac{(l-p)}{\cos A}$$

$$\text{et } d_1 = \left[l - \frac{l-p}{\cos A} \right] \cos A = p - l(1 - \cos A)$$

$$\text{La surface du triangle FOC est } S_1 = \frac{1}{2} (FC \cdot FO) = \frac{1}{2} (d_1 \cdot FO)$$

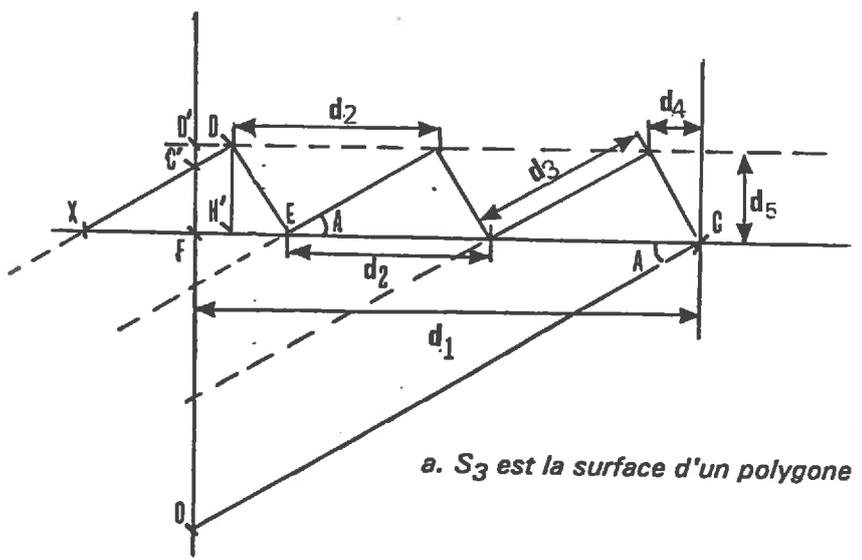
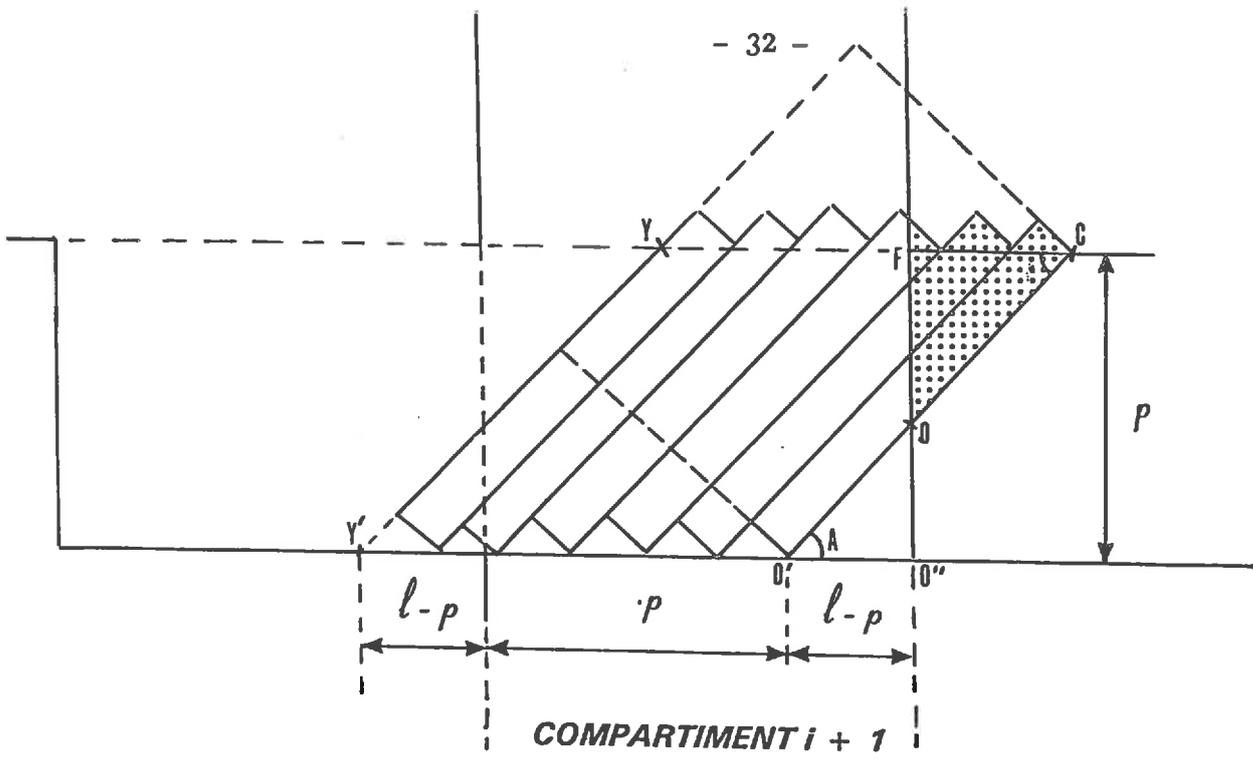
$$\text{Or, } FO = d_1 \tan A ; \text{ donc } S_1 = \frac{1}{2} \tan A d_1^2$$

$$S_1 = \frac{1}{2} (p - l(1 - \cos A))^2 \tan A$$

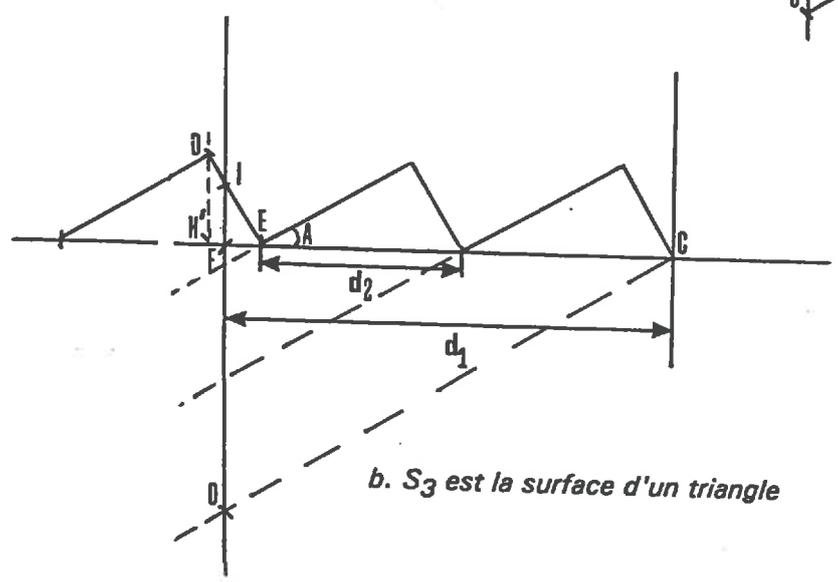
d₂ (hypoténuse des triangles élémentaires) vaut $\frac{l}{n}$ (par construction YC = l est découpée en n parties égales).

$$\text{Le nombre de triangles entiers est donc : } N = E \left[\frac{(p - l(1 - \cos A))}{\frac{l}{n}} \right], \text{ où E désigne la}$$

partie entière.



a. S_3 est la surface d'un polygone



b. S_3 est la surface d'un triangle

Figure A7-2 : Evaluation du paramètre "c", dans le cas du mode de retournement de la bande de terre avec déformation

$$\cos A = d_3/d_2, \text{ et } d_3 = d_2 \cos A = \frac{l}{n} \cos A.$$

La surface de chaque triangle rectangle entier est donc $S_2 = \frac{1}{2} d_3 * DE$, où DE est la largeur de découpage, soit, par construction, $\frac{p}{n}$; donc $S_2 = \frac{1}{2} \frac{l \cos A}{n} \frac{p}{n}$

$$S_2 = \frac{pl}{2n^2} \cos A$$

Il reste à calculer S_3 , la surface de la portion de triangle coupée par la limite du compartiment. Si $EF > EH'$, soit lorsque $d_1 - Nd_2 > EF = \frac{p}{n} \sin A$, cette surface est celle d'un polygone; sinon c'est la surface d'un triangle.

. Cas d'un triangle (FEI sur le schéma A7-2b)

$$S_3 = \frac{1}{2} FE * FI = \frac{1}{2} FE^2 \tan A$$

$$FE = d_1 - Nd_2$$

$$FE = p - l(1 - \cos A) - \frac{l}{n} E \left[\frac{p - l(1 - \cos A)}{\frac{l}{n}} \right]$$

Donc

$$S_3 = \frac{1}{2} \tan A \left[p - l(1 - \cos A) - \frac{l}{n} E \left[\frac{p - l(1 - \cos A)}{\frac{l}{n}} \right] \right]^2$$

. Cas d'un polygone (FEDC', sur le schéma A7-2a).

On décompose la surface à calculer en celle d'un triangle H'ED rectangle en H', dont la surface est $\frac{1}{2}H'E^2 \tan A$ et celle d'un trapèze FH'DC' dont la surface est $\frac{1}{2} (F'C' + H'D) * FH.'$

Avant de calculer F'C', H'D et FH, rappelons les valeurs des 3 distances caractéristiques sur le schéma A7-2a :

$$d_1 \text{ (longueur de FC) vaut } p - l(1 - \cos A).$$

$$d_2 \text{ (hypoténuse des triangles élémentaires) vaut } \frac{l}{n}.$$

$$d_3 = d_2 \cos A = \frac{l}{n} \cos A.$$

et ajoutons-en 2 autres :

$$d_4 = \frac{p}{n} \sin A$$

$$d_5 = \frac{p}{n} \cos A$$

$$FH' = d_1 - Nd_2 - HE' = d_1 - Nd_2 - d_4$$

$$H'D = d_5 = \frac{p}{n} \cos A$$

$$FC' = d_5 - D'C' = d_5 - DD' \sin A$$

$$DD' = FH' = d_1 - Nd_2 - d_4$$

$$\text{donc } FC' = d_5 - (d_1 - Nd_2 - d_4) \sin A$$

$$\text{et } S_3 = \frac{1}{2} [d_5 - (d_1 - Nd_2 - d_4) \sin A + d_5] * (d_1 - Nd_2 - d_4)$$

$$S_3 = \frac{1}{2} [2d_5 - (d_1 - Nd_2 - d_4) \sin A] * (d_1 - Nd_2 - d_4)$$

Application numérique

Nous nous plaçons dans le cas de la figure A7, avec un degré de découpage $n = 6$.
Les paramètres géométriques du labour sont $p = 25$ cm et $l = 35$ cm.

On a donc :

$$\sin A = 0,714$$

$$\cos A = 0,700$$

$$\tan A = 1,020$$

$$pl \text{ (surface de la section de la bande)} = 875 \text{ cm}^2$$

1. Calcul de a

$$S_1 = \frac{1}{2} (l-p)^2 \tan A = \frac{1}{2} (10)^2 1,02 = 51 \text{ cm}^2, \text{ soit } 5,8 \% \text{ de la section de la bande.}$$

$$S_2 = \frac{pl}{2n^2} \cos A = 0,700 * 875 / 2 * 36 = 8,50 \text{ cm}^2, \text{ soit } 0,972 \% \text{ de la surface totale.}$$

$$d_1 = p - l = 10 \text{ cm}$$

$$d_2 = p/n = 35/6 = 5,83 \text{ cm}$$

$$N = E \left(\frac{(l-p)}{\frac{l}{n}} \right) = E[10/5,83] = 1.$$

$$d_1 - Nd_2 = 10 - 6 = 4 \text{ cm}$$

$$DH = DE' \cos A = d_3 \cos A = \frac{l}{n} \cos^2 A = 2,85 \text{ cm}$$

$d_1 - Nd_2 > DH$ donc S_3 est la surface d'un triangle.

$$S_3 = S_2 - \frac{\left[(N+1) \frac{l}{n} - (l-p) \right]^2}{2} \tan A = 10 - 5,83 = 4,17 \text{ cm}^2, \text{ soit } 0,476 \% \text{ de la surface totale.}$$

$$a = 5,8 - 0,972 - 0,476 = 4,35 \% \text{ de la surface de la section de la bande de labour}$$

b. Calcul de c

$$d_1 = p - l(1 - \cos A) = 14,5 \text{ cm}$$

$$d_2 = \frac{l}{n} = 5,83 \text{ cm}$$

$$N = E[14,5/5,83] = 2.$$

$$S_1 = \frac{1}{2} \tan A d_1^2 = 107,2 \text{ cm}^2$$

$$S_2 = \frac{pl}{2n^2} \cos A = 8,507 \text{ cm}^2$$

$$d_1 - Nd_2 = 14,5 - 2*5,83 = 2,84$$

$$H'E = \frac{p}{n} \sin A = 2,975$$

$d_1 - Nd_2 < H'E$, donc S_3 est la surface d'un triangle.

$$S_3 = \frac{1}{2} \tan A \left[p - l(1 - \cos A) - \frac{l}{n} E \left[\frac{p - l(1 - \cos A)}{\frac{l}{n}} \right] \right]^2 = \frac{1}{2} * 1,02(14,5 - 2*5,83) = 4,11 \text{ cm}^2$$

$$S = 107,2 + 2*8,507 + 4,11 = 128,32 \text{ cm}^2 \text{ et}$$

$$c = \frac{S}{pl} = 14,66 \% \text{ de la surface totale de la section de la bande de terre.}$$

ANNEXE 8 : CALCUL DES COORDONNEES D'UN POINT DE LA BANDE DE TERRE APRES RETOURNEMENT PAR LA CHARRUE.

Soit $(x ; y)$ les coordonnées du point P avant retournement (figure A8-1). Nous nous plaçons pour ces calculs dans le cas de la première bande (celle correspondant au compartiment 1). Les formules pour les autres compartiments s'obtiennent facilement par translation. Nous prendrons également l'exemple d'un labour versant vers la droite.

1. Première rotation

$$\begin{cases} x_1 = l + y \\ y_1 = l - x \end{cases}$$

2. Seconde rotation

$$\begin{aligned} x_2 &= XH + HE' = x_1 + HE' \\ HE' &= HO' + O'E = HO' + (O'G' - E'G') \\ HO' &= (l + p) - x_1 \\ O'G' &= O'G \cos A = y_1 \cos A \\ E'G' &= EG = P''G \cos B \\ P''G &= HO' = (l + p) - x_1 \end{aligned}$$

donc :

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + (l + p) - x_1 + y_1 \cos A - [(l + p) - x_1] \cos B \\ x_2 &= (l + p)(1 - \cos B) + y_1 \cos A + x_1 \cos B \end{aligned}$$

A et B étant complémentaires, on a $\sin A = \cos B$ et $\cos A = \sin B$; donc :

$$x_2 = (l + p)(1 - \sin A) + x_1 \sin A + y_1 \cos A \quad \text{avec } \sin A = \frac{p}{l} \text{ et } \cos A = \sqrt{1 - \frac{p^2}{l^2}}.$$

$$\begin{aligned} y_2 &= E'P'' = G'G + EP'' \\ G'G &= y_1 \sin A \\ EP'' &= P''G \cos A \\ P''G &= HO' = (l + p) - x_1 \end{aligned}$$

donc

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 \sin A + [(l + p) - x_1] \cos A \\ y_2 &= (l + p) \cos A - x_1 \cos A + y_1 \sin A \end{aligned}$$

et, finalement :

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \sin A & \cos A \\ \cos A & 1 + \sin A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l + p \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sin A & \cos A \\ -\cos A & \sin A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$$

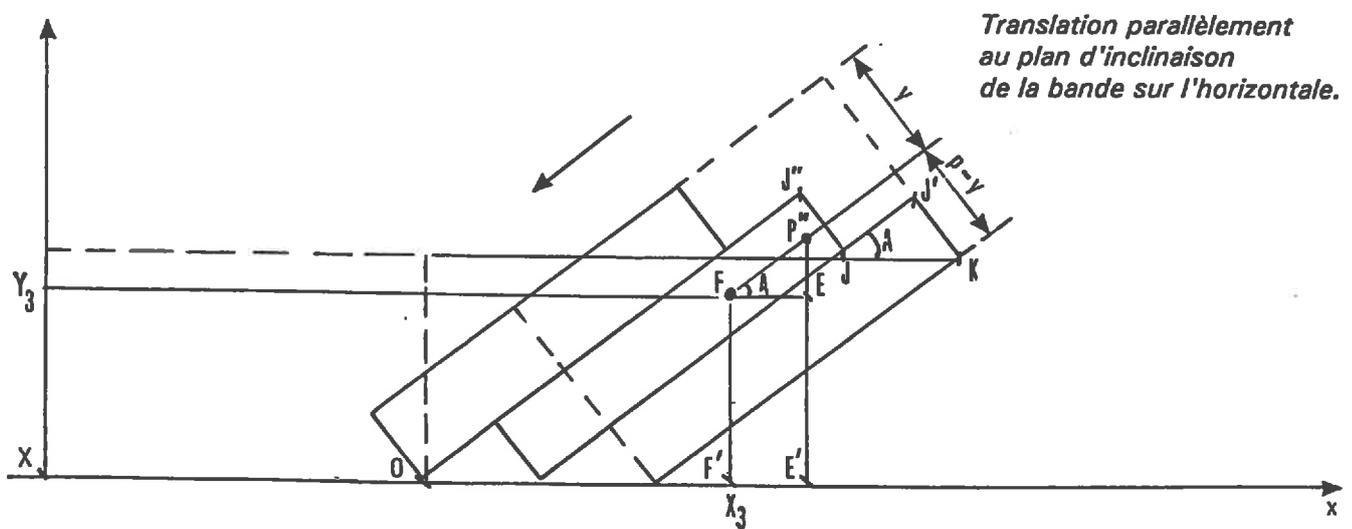
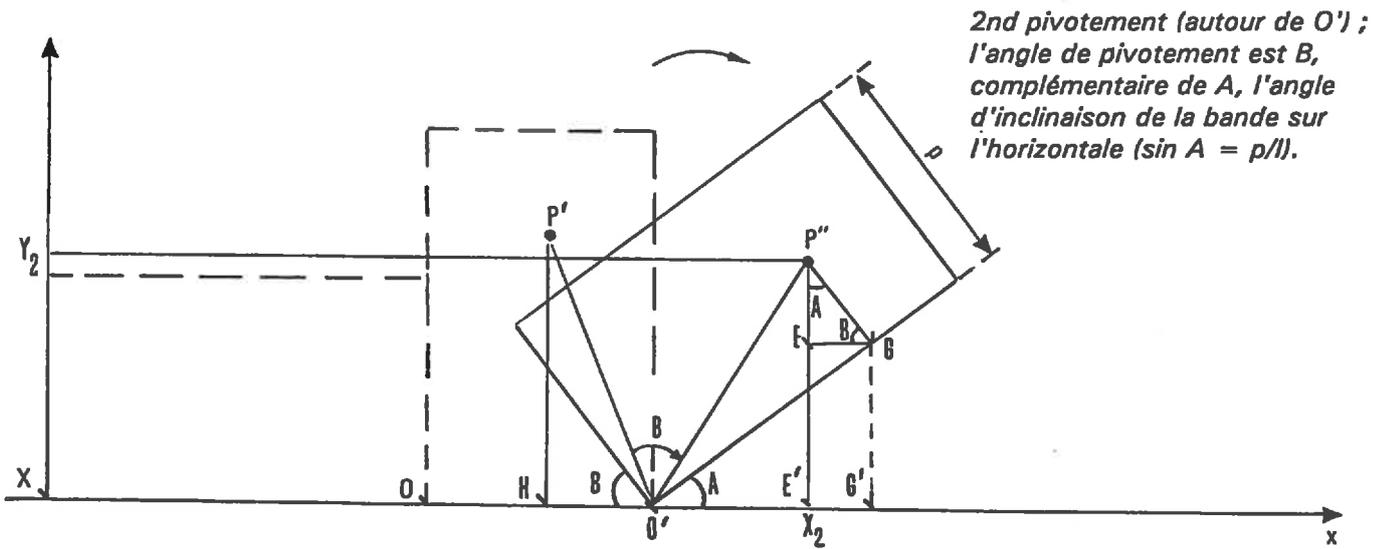
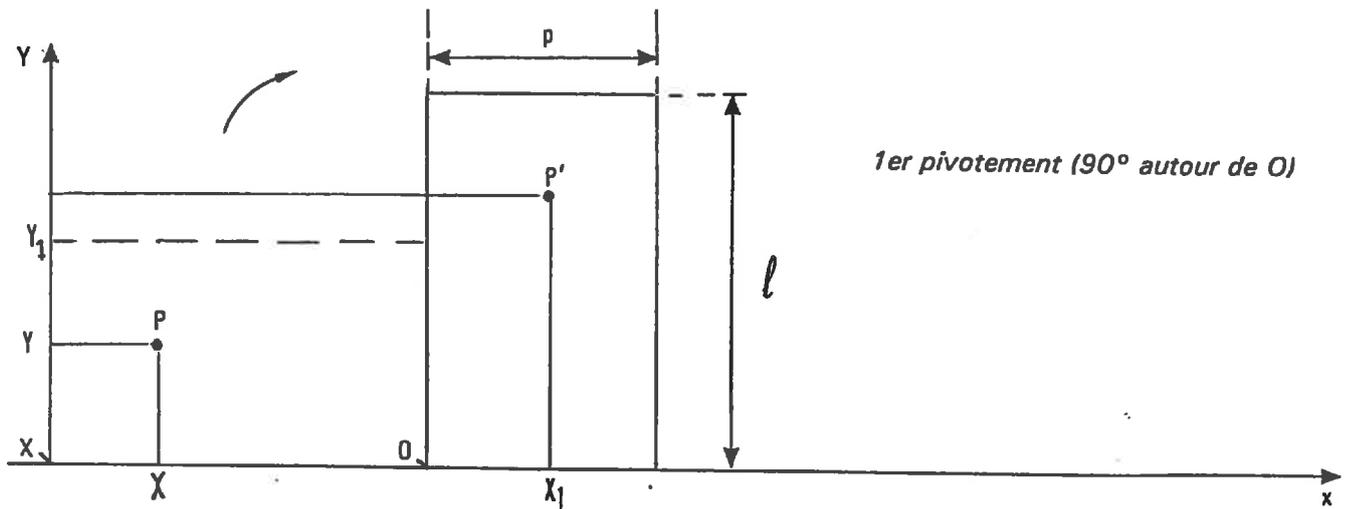


Figure A8-1 : Décomposition du mouvement de la bande de terre (cas d'un labour versant vers la droite)

3. Translation

La longueur du déplacement dépend du degré de découpage n (nombre de plans de cisaillement plus 1), et, pour un point donné, cette longueur dépend aussi du numéro du

rectangle élémentaire auquel il appartient ; soit i ce numéro. $i = 1 + E \left[\frac{p-y}{\frac{p}{n}} \right]$, où E est la partie entière (i vaut 1 pour le rectangle correspondant à la surface avant le labour).

Par construction, on a : $J'K = \frac{p}{n}$ et $JK = \frac{l}{n}$.

Pour un point donné, la distance de translation est $P''F = (n-i)JJ' = (n-i) \frac{l}{n} \cos A$.

donc :

$$\begin{cases} x_3 = x_2 - F'E' = x_2 - FE = x_2 - P''F \cos A = x_2 - (i-1) \frac{l}{n} \cos^2 A \\ y_3 = y_2 - P''E = y_2 - P''F \sin A = y_2 - (i-1) \frac{l}{n} \cos A \sin A \end{cases}$$

et, finalement :

$$\begin{cases} x_3 = (l-p)(1-\sin A) - (l+y)\sin A + (l-x)\cos A - (i-1) \frac{l}{n} \cos^2 A \\ y_3 = (l+p)\cos A - (l+y)\cos A + (l-x)\sin A - (i-1) \frac{l}{n} \cos A \sin A \end{cases}$$

avec :

l, p = longueur, largeur de travail

$$\sin A = \frac{p}{l} \text{ et } \cos A = \sqrt{1 - \frac{p^2}{l^2}}$$

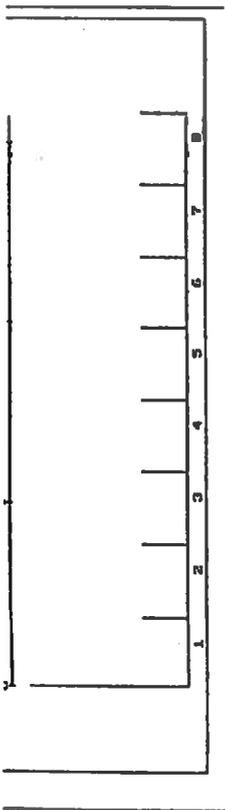
$$i = 1 + E \left[\frac{p-y}{\frac{p}{n}} \right]$$

ANNEXE 9

SORTIES GRAPHIQUES DU PROGRAMME POINT A POINT

(SCENARIOS 2 A 10 DU TABLEAU IV-7, P 157)

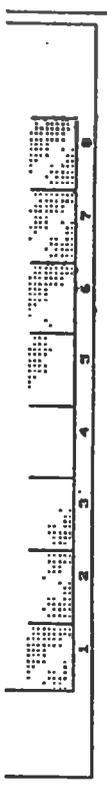
SCENARIO N°2



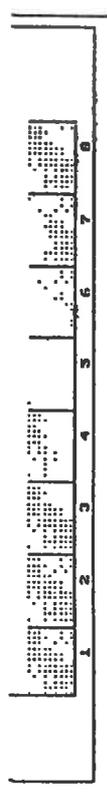
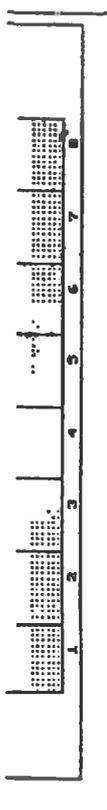
après implantation
du blé
année 3



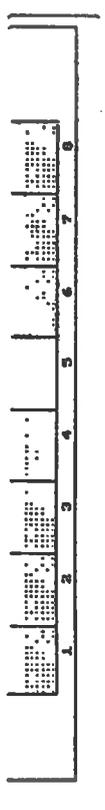
après labour gauche
année 4



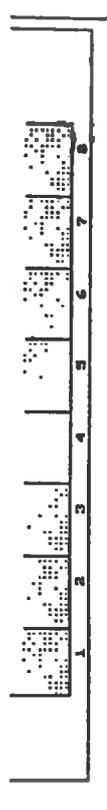
après implantation
du pois
année 4



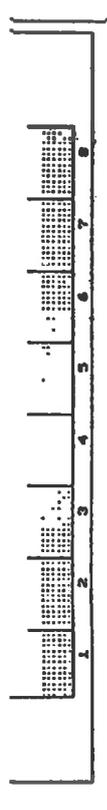
après labour gauche
année 5



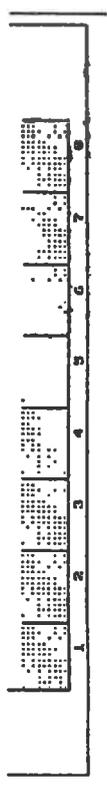
après implantation
du blé
année 5



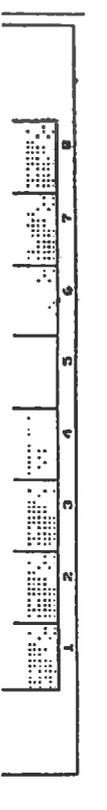
après labour droite
année 6



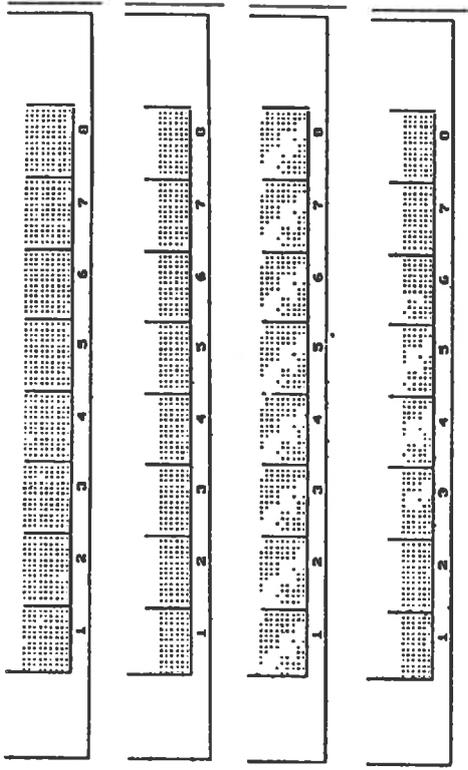
après implantation
du blé
année 6



après labour gauche
année 7



après implantation
du blé
année 7

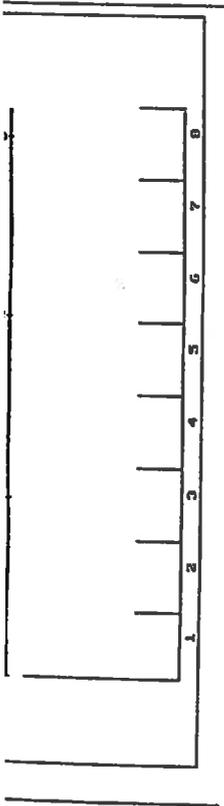


après récolte tournesol
année 8

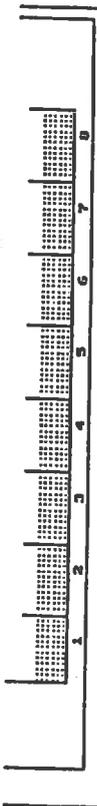
après déchaumage
année 8

après labour gauche
année 8

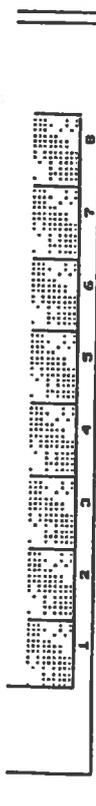
après implantation
du blé
année 8



après récolte
du tournesol et
enfouissement
année 3



après labour
droite
année 3



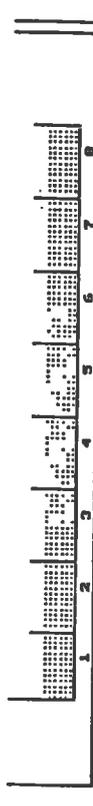
après implantation
du blé
année 3



après
labour gauche
année 4



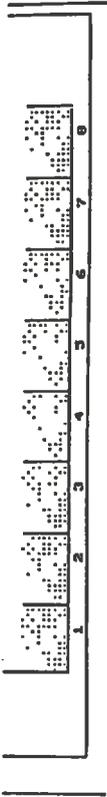
après implantation
du blé
année 4



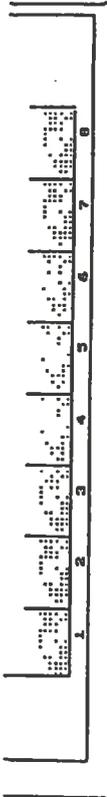
après
labour droit
année 5



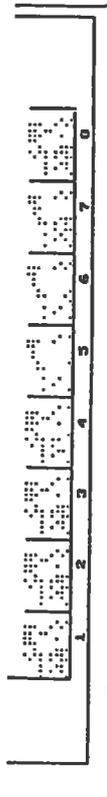
après implantation
du blé
année 5



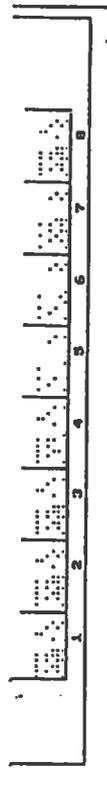
après
labour gauche
année 6



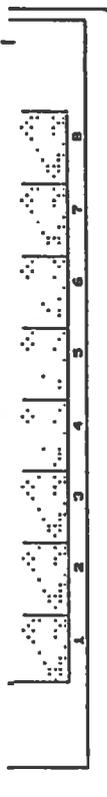
après implantation
de l'escourgeon
année 6



après
labour droit
année 7



après implantation
du coiza
année 7



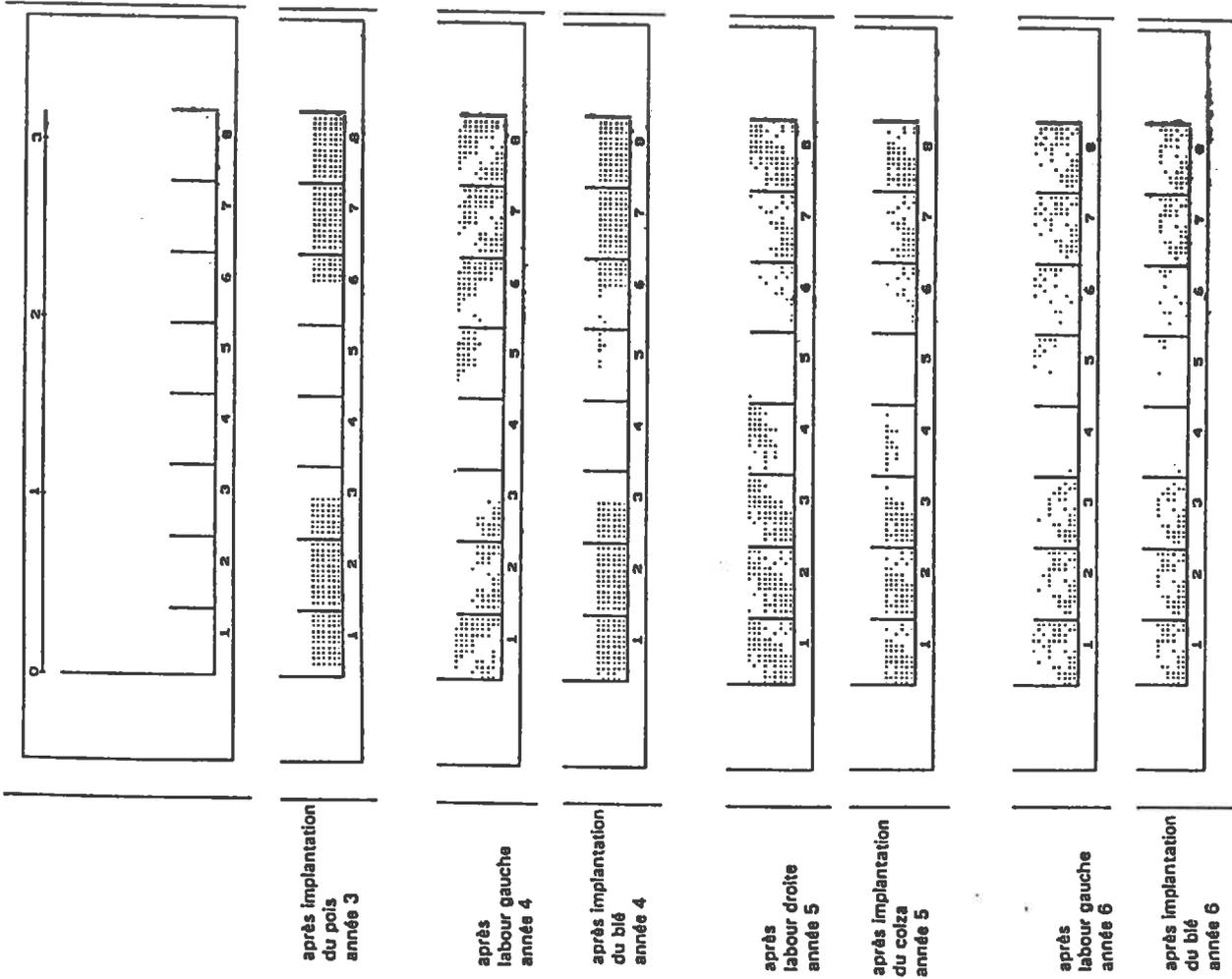
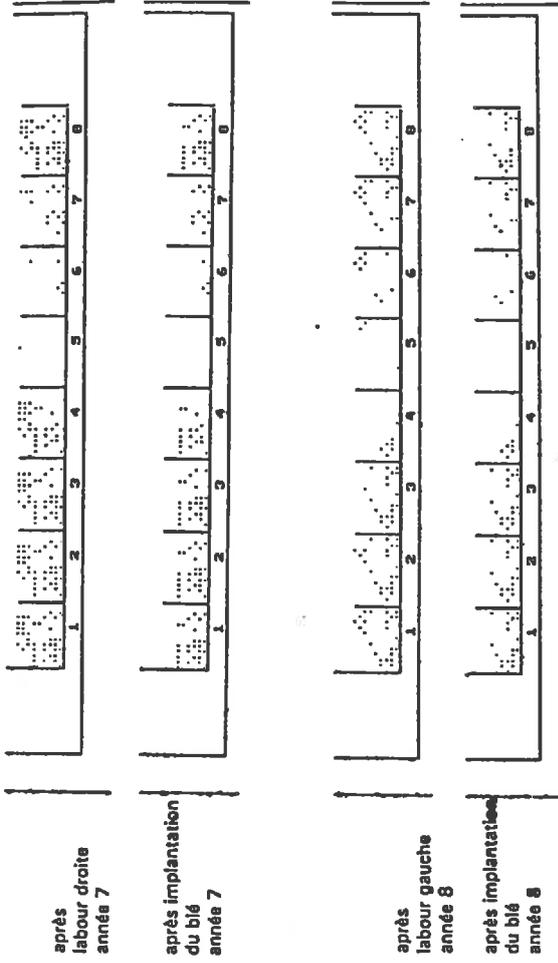
après
labour gauche
année 8



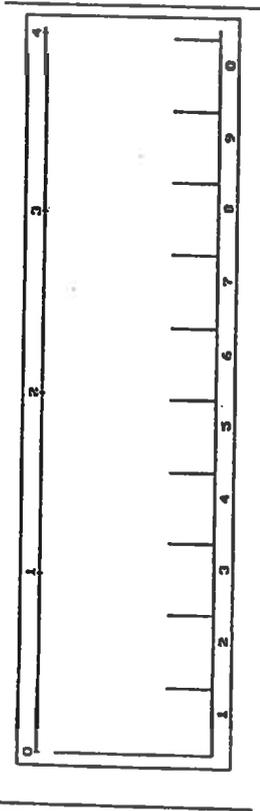
après implantation
du blé
année 8

SCENARIO N° 3

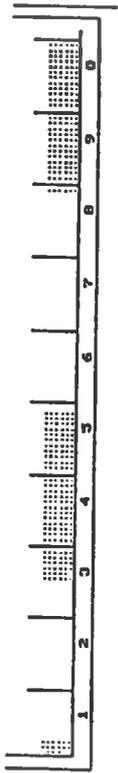
SCENARIO N°4



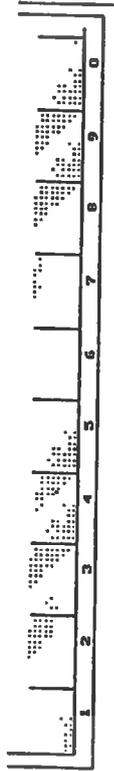
SCENARIO N°5



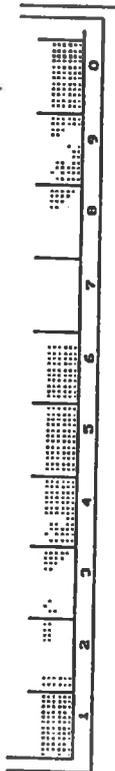
après implantation
du blé
année 3



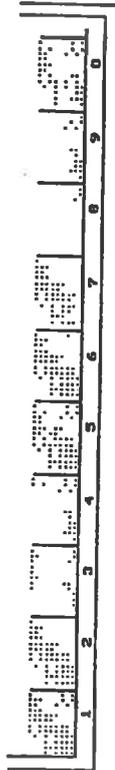
après
labour gauche
année 4



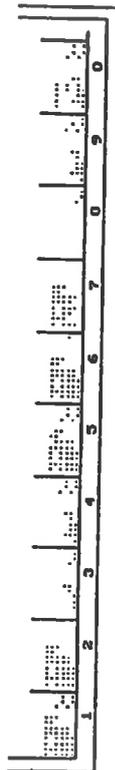
après implantation
du blé
année 4



après
labour droite
année 5



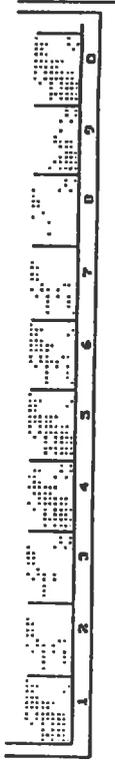
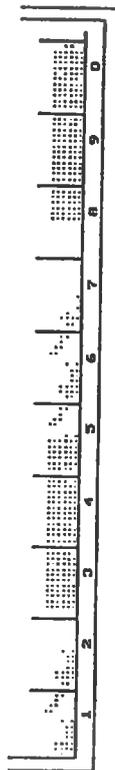
après implantation
du blé
année 5



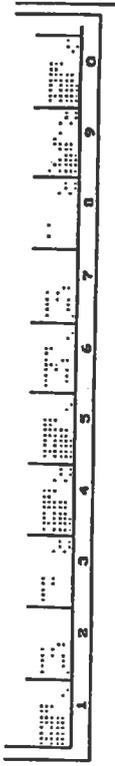
après
labour gauche
année 6



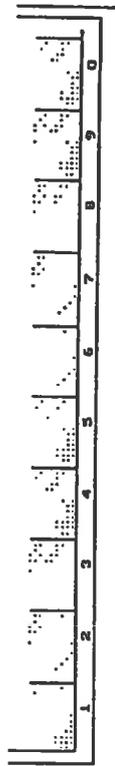
après implantation
du blé
année 6



après
labour droite
année 7



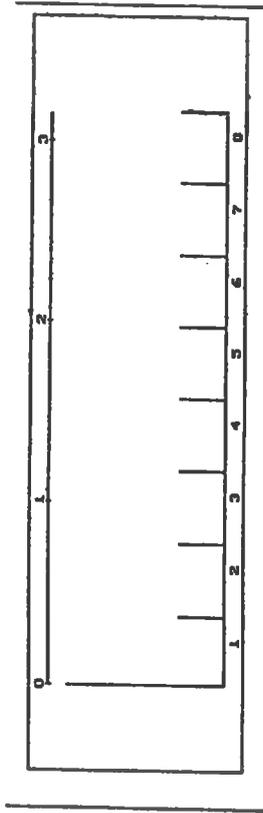
après implantation
du blé
année 7



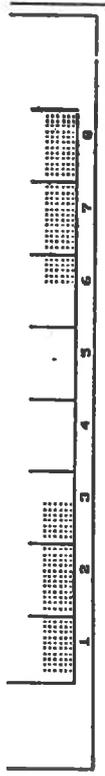
après
labour gauche
année 8



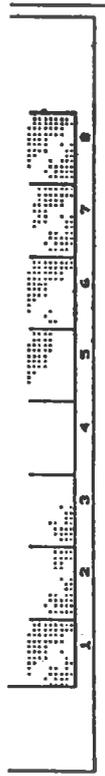
après implantation
du blé
année 8



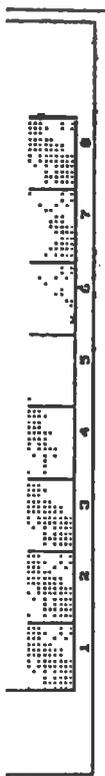
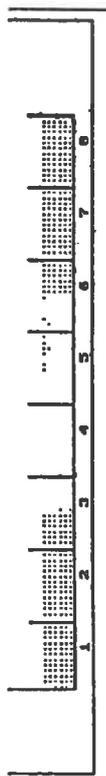
après implantation
du blé
année 3



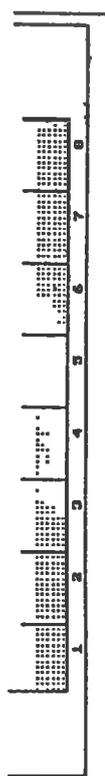
après labour gauche
année 4



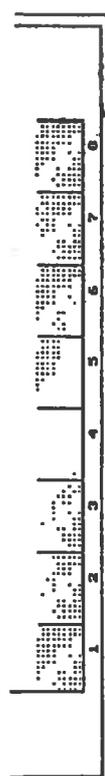
après implantation
du blé
année 4



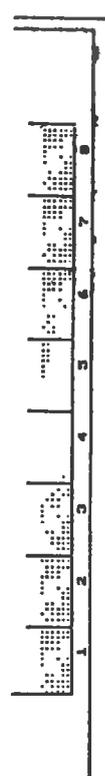
après labour droite
année 5



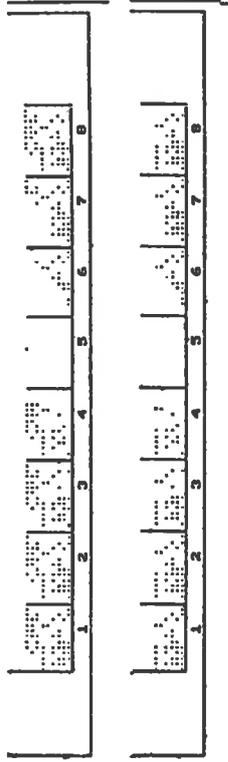
après implantation
du pois
année 5



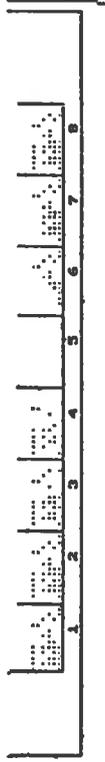
après labour gauche
année 6



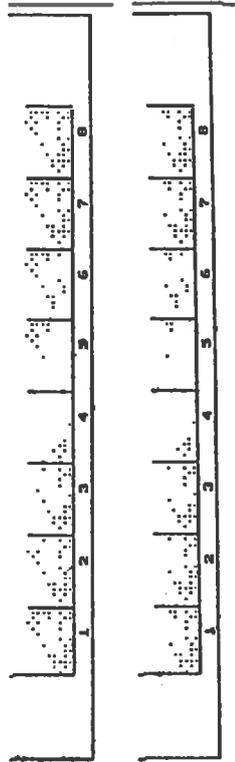
après implantation
du blé
année 6



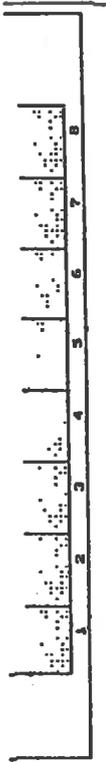
après labour droite
année 7



après implantation
du blé
année 7



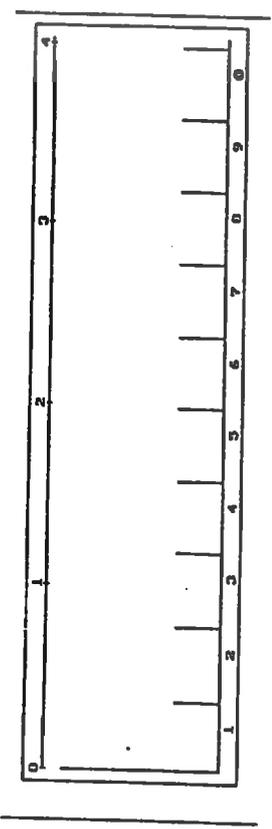
après labour gauche
année 8



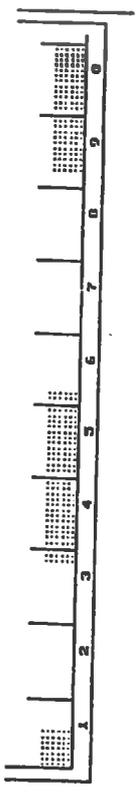
après implantation
du blé
année 8

SCENARIO N°6

SCENARIO N°7



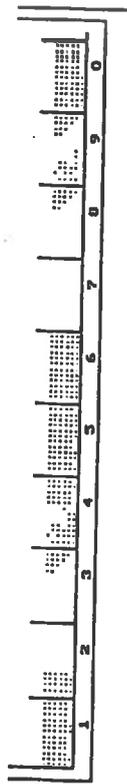
après implantation du blé année 3



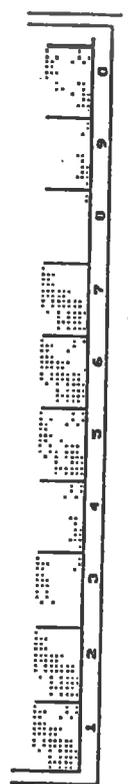
après labour gauche année 4



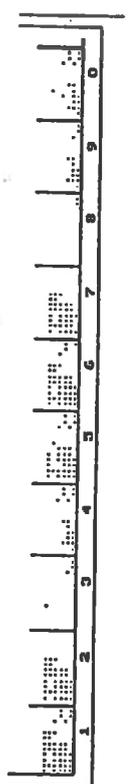
après implantation du blé année 4



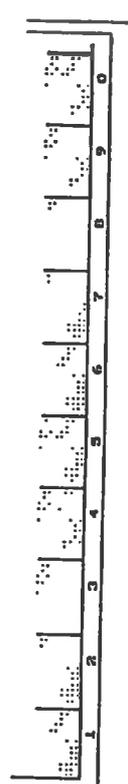
après labour droite année 5



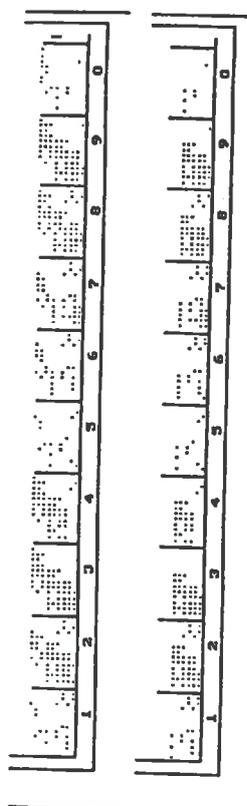
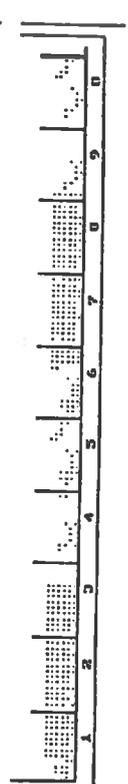
après implantation du blé année 5



après labour gauche année 6

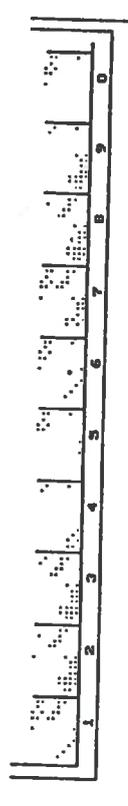


après implantation du blé année 6



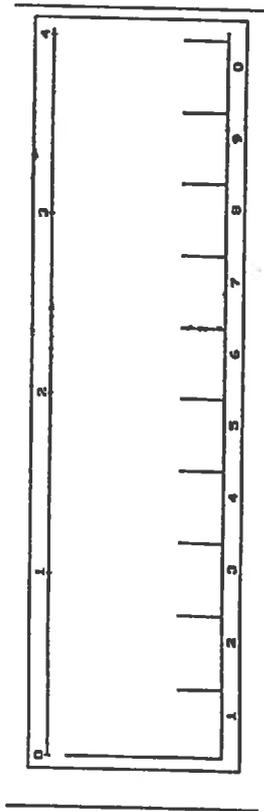
après labour droite année 7

après implantation du blé année 7

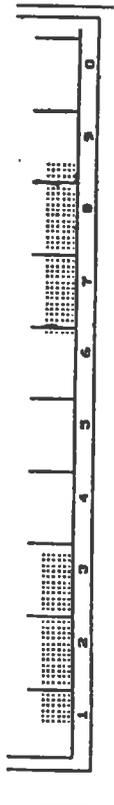


après labour gauche année 8

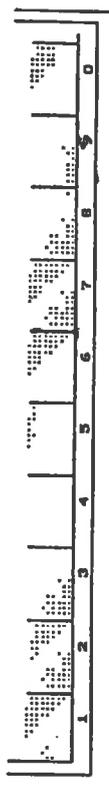
après implantation du blé année 8



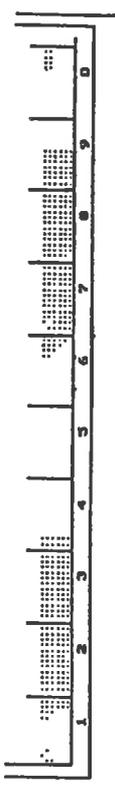
après implantation
du blé
année 3



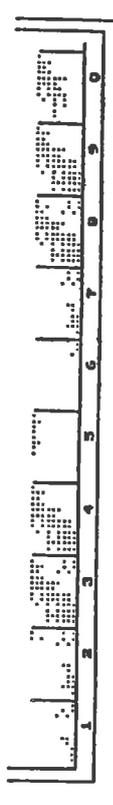
après
labour gauche
année 4



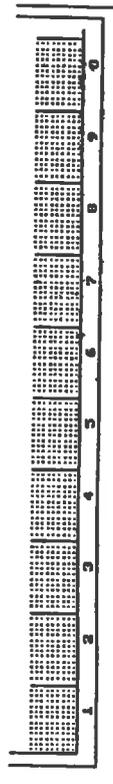
après implantation
du blé
année 4



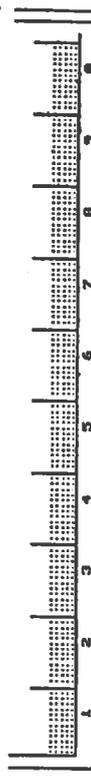
après
labour droite
année 5



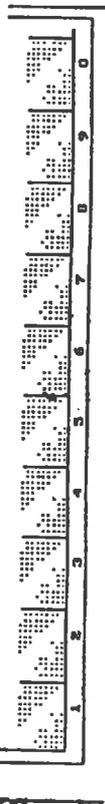
après implantation
du maïs ensilage
année 5



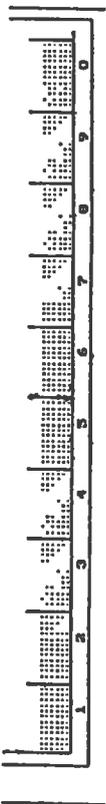
après récolte du
maïs ensilage
année 6



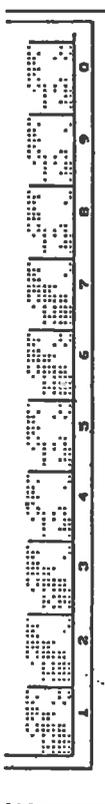
après
enfouissement
année 6



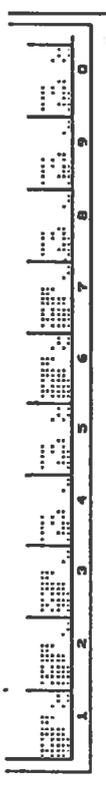
après
labour gauche
année 6



après implantation
du blé
année 6



après
labour droite
année 7

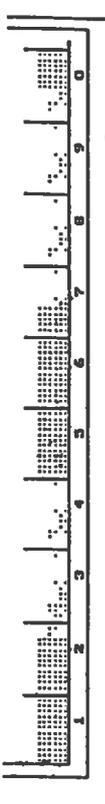


après implantation
du blé
année 7

48

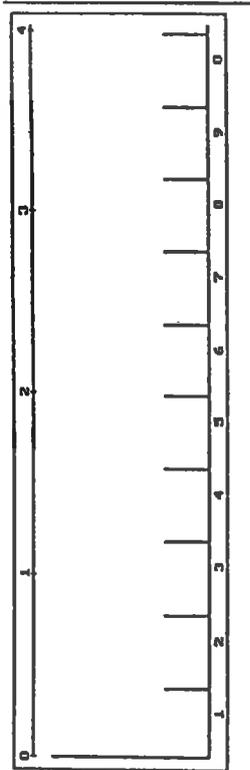


après
labour gauche
année 8

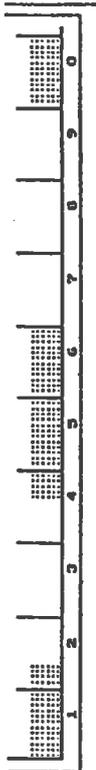


après implantation
du blé
année 8

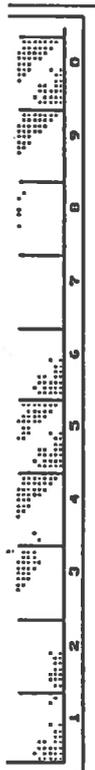
SCENARIO N°8



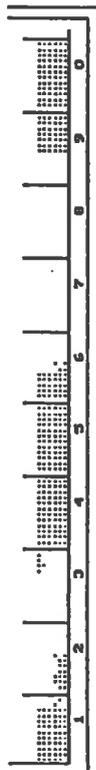
après implantation
du blé
année 3



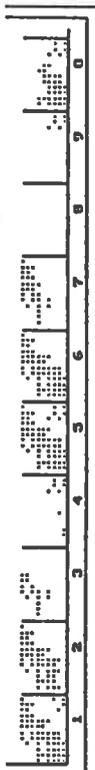
après
labour gauche
année 4



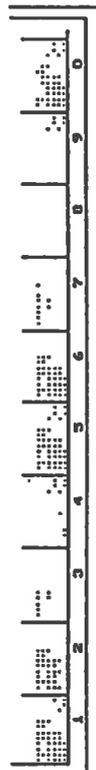
après implantation
du blé
année 4



après
labour droite
année 5



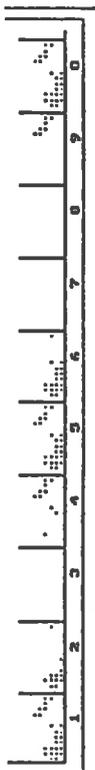
après implantation
du blé
année 5



après
labour gauche
année 6



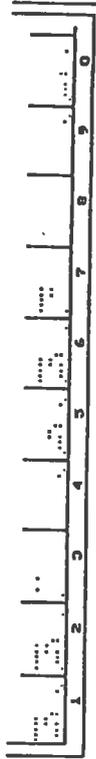
après implantation
du blé
année 6



après
labour droite
année 7



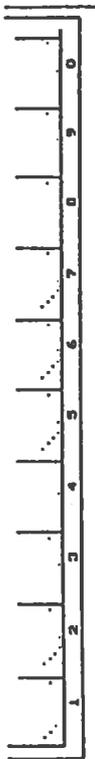
après implantation
du blé
année 7

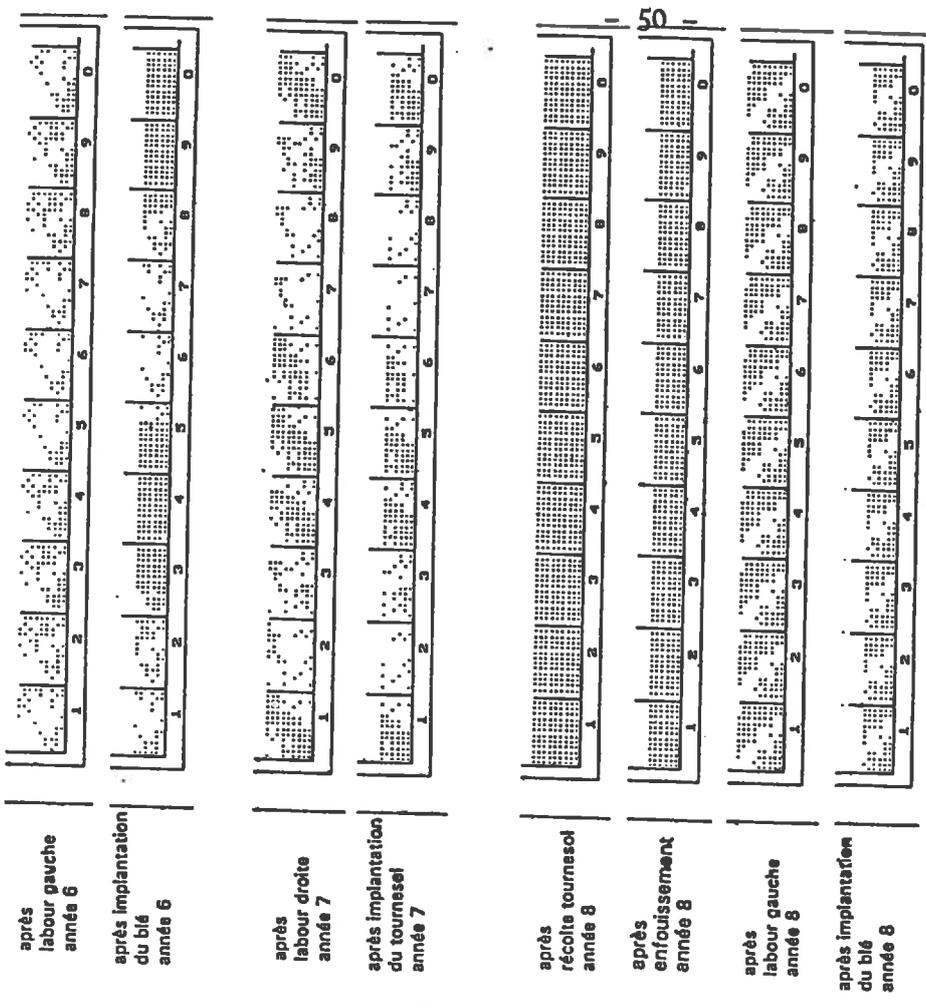
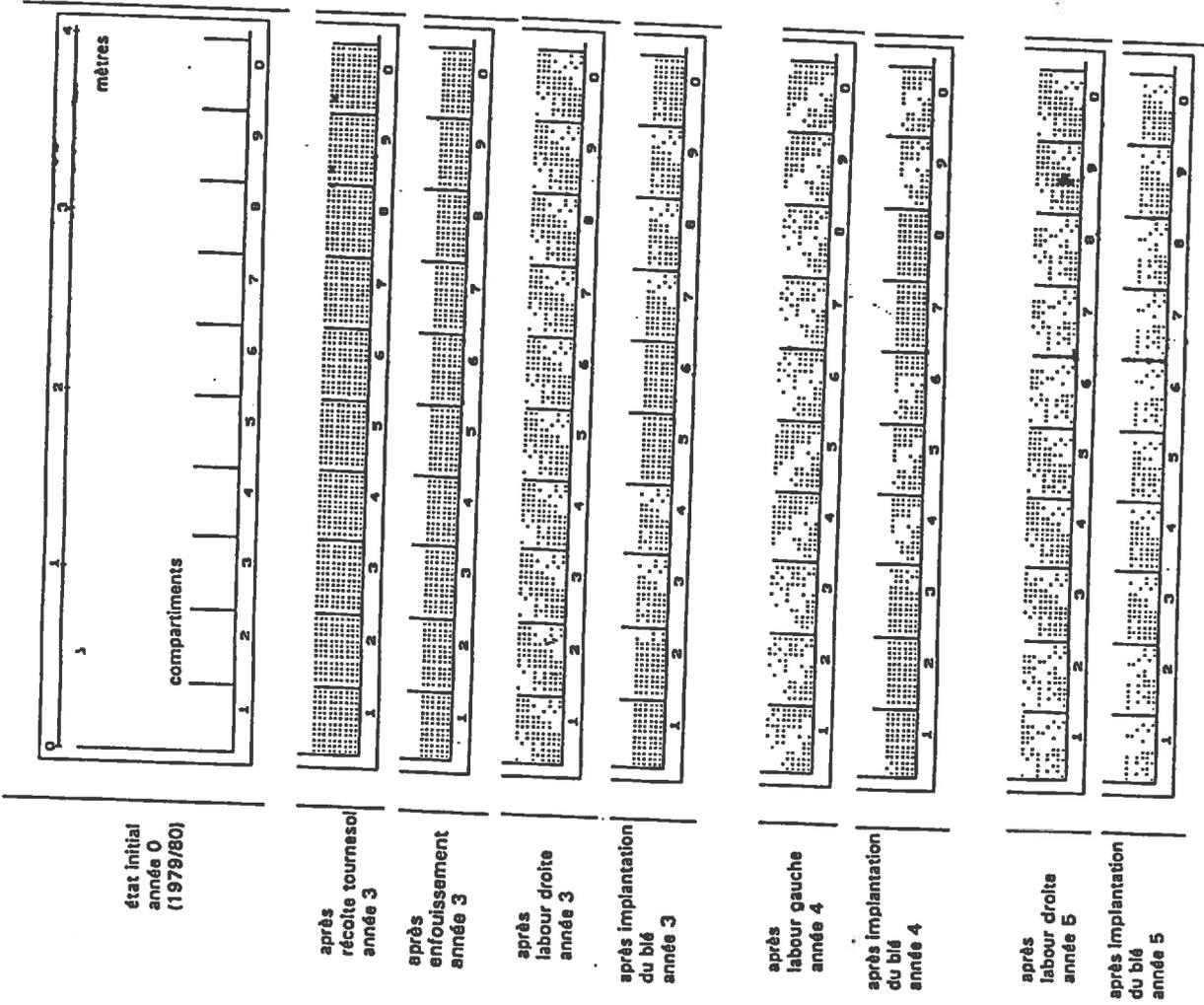


après
labour gauche
année 8



après implantation
du blé
année 8





SCENARIO N°10

RESUME

L'objectif de ce travail est la mise au point d'un modèle permettant de simuler l'accumulation dans le temps des effets précédents successifs des systèmes de culture sur la structure du sol.

Dans une première partie, nous exposons les choix méthodologiques qui nous ont conduit à proposer un indicateur de l'effet à long terme des systèmes de culture sur l'état structural. Cet indicateur est défini par la proportion de mottes d'état interne Δ , mesurée dans la partie du profil la mieux à même de révéler les effets cumulatifs des systèmes de culture.

Dans la seconde partie, nous présentons les valeurs obtenues dans quatre situations expérimentales très contrôlées, caractérisées par des systèmes de culture contrastés quant à leurs effets sur la structure du sol. Ces résultats montrent que l'indicateur proposé permet de différencier les systèmes de culture sur la base de leurs effets à long terme sur la structure du sol, et nous conduisent à proposer d'en simuler l'évolution à l'aide d'un modèle compartimental.

Dans la troisième partie de ce travail, le test de sensibilité du modèle aux principales hypothèses qui lui sont sous-jacentes nous a conduit à améliorer les principes de son fonctionnement et à proposer un programme informatique permettant d'étudier l'évolution de l'état structural de la couche labourée en la simulant par un réseau de points disposés sur une maille carrée de deux centimètres de côté et repérés par leur état interne, delta ou non delta. Ce programme permet de simuler des situations plus proches de la réalité de la pratique agricole que ne l'étaient les parcelles expérimentales étudiées précédemment. Nous en avons confronté les sorties à des observations de profil conduites sur un réseau de 55 parcelles d'agriculteurs. Les résultats obtenus montrent que l'on peut considérer le modèle comme un outil opérationnel de diagnostic et de pronostic de l'évolution de l'état structural au champ. Enfin, en procédant par simulation, nous avons montré que l'indicateur proposé apparaissait pertinent pour différencier les systèmes de culture au travers de leurs effets cumulatifs sur l'état structural du profil.

Mots clés : Effets cumulatifs, systèmes de culture, profil cultural, structure du sol, labour, modélisation.

SUMMARY

We propose in this work a simulation model of the evolution of soil structure in the Ap layer under the influence of cropping systems and climate.

In the first part, we propose an index of the cropping system effect on soil structure. This index is defined by the proportion of compacted clods (Δ clods) evaluated in the part of the soil profile which have not been submitted to compaction or fragmentation action after ploughing.

In the second part, the index has been measured in four experimental plots where cropping systems induced contrasted effects on soil structure. The values found confirmed the ability of the index to differentiate the cropping systems. This leads us to propose to simulate the index evolution with a compartmental model.

In the third part, a sensibility analysis showed that the model was strong towards the main hypothesis made. This study lead to an improvement of the simulation model, and we propose a computer programm to simulate soil structure evolution in the Ap layer. The last part of this work, is a validation of the model, by comparison of the computer modelization with soil profile observations made on the field. We show that an utilisation of the model to simulate structure evolution in field conditions is possible.

These results lead to different possible utilisations of this model : for field diagnosis, for simulation studies of soil behaviour and for the conception of tools and new ways of soil management.

Key words : Cropping system, soil structure, ploughing, modelization, soil management.