

# SISOL : Un modèle d'évolution de l'état structural des couches de sol cultivées

J. Roger-Estrade<sup>(1)</sup>, G. Richard<sup>(2)</sup>, H. Boizard<sup>(3)</sup>, P. Défossez<sup>(2)</sup>, H. Manichon<sup>(4)</sup> et J. Caneill<sup>(5)</sup>

(1) INA P-G, UMR d'Agronomie INRA-INA P-G, BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon

(2) INRA, Unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons, rue F. Christ, F-02007 Laon Cedex

(3) INRA, Unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons, F-80200 Estrées-Mons

(4) CIRAD, av. Agropolis, F-34398 Montpellier cedex 05

(5) ENESAD, Département Agronomie-Environnement, 26 boulevard Docteur Petitjean, BP 87999, 21079 Dijon cedex.

## RÉSUMÉ

La mise au point de règles d'aide à la décision en matière de travail du sol ou l'évaluation de l'effet des systèmes de culture sur l'évolution de la composante physique de la fertilité des sols requièrent des modèles permettant d'évaluer l'effet des outils, de la circulation des engins et des agents naturels sur la structure du sol. L'objet de cet article est la présentation d'un tel modèle qui permet de simuler sur un pas de temps qui est celui de l'opération culturale, l'évolution d'un indicateur de l'effet des systèmes de culture sur la structure du sol : la proportion de volume de sol fortement compacté (d'état interne  $\Delta$ ) dans la couche labourée. Ce modèle, baptisé SISOL, repose sur des hypothèses d'évolution de la proportion de zones tassées dans les couches de sol travaillées sous l'effet combiné du retournement par la charrue, du tassement par les roues des engins et de la fragmentation par les outils de reprise du labour et le climat. Son évaluation sur un essai de longue durée a montré que si les courbes d'évolution de la teneur en  $\Delta$  étaient correctement prédites (sur une période de simulation de sept ans), le modèle pouvait être amélioré en prenant mieux en compte la disparition des zones  $\Delta$  sous l'effet du climat et de la faune du sol. Même si son extension à d'autres types de sol que les limons argileux du Bassin Parisien est souhaitable, ce modèle peut, en l'état, être utilisé pour comparer l'effet sur l'évolution de la structure du sol de différents choix techniques (dates d'interventions, types d'équipement, modalités de travail du sol, successions de cultures...).

## Mots clés

Structure du sol, travail du sol, labour, compactage, système de culture, modélisation.

## SUMMARY

### **SISOL : a model to simulate the changes with time in tilled soil structure**

*The optimisation of tillage practices requires the evaluation of the long term effects of cropping on changes in soil structure. We present in this paper a model that simulates changes in soil structure in the tilled horizons of cultivated fields. The indicator of soil structure that we have modelled is based on a morphological description of the structure which allows a quantitative evaluation of the percentage of seve-*

rely compacted zones and clods in the tilled layer of a soil profile. The model takes into account the spatial variation of the structure induced by traffic and tillage. Severely compacted zones are created under wheel tracks; they are cut and transferred during ploughing and disappear when fragmented into fine soil during secondary tillage or by weathering. The model was evaluated over seven years in a field trial on a loamy soil in three experimental plots, where the crop sequences and field operations induced contrasted changes in the percentage of severely compacted zones and clods. However, some variations from one year to the next were poorly predicted. The sensitivity analysis did not suggest any modification of the parameter values but showed that the performance of the model could be improved if the fragmentation due to weathering and secondary tillage was more precisely described in the model. Nevertheless the present version of the model and the corresponding simulation program (SISOL) can be used to compare the effects of different technical choices on the changes in tilled soil structure.

**Key-words**

Soil structure, tillage, ploughing, compaction, cropping system, model

**RESUMEN****SISOL: UN MODELO DE EVOLUCIÓN DEL ESTADO ESTRUCTURAL DE LAS CAPAS CULTIVADAS DEL SUELO**

La puesta a punto de reglas de ayuda a la decisión en materia de manejo de suelo o la evaluación del efecto de sistemas de cultivo sobre la evolución de la componente física de la fertilidad de suelos requieren modelos permitiendo estimar el efecto de los utensilios, de la circulación de la maquinaria y de los agentes naturales sobre la estructura del suelo. El objeto de este artículo es la presentación de este modelo permitiendo la simulación de la evolución de un indicador del efecto de los sistemas de cultivo sobre la estructura del suelo en un lapso de tiempo correspondiente a la operación cultural: la proporción de elementos de estado interno  $\Delta$  en la capa labrada. Este modelo, bautizado SISOL, reposa sobre hipótesis de evolución de la proporción de zonas comprimidas en las capas de suelo trabajadas bajo el efecto combinado de la inversión por el arado, del apisonamiento por las ruedas de la maquinaria y de la fragmentación por los utensilios de labranza y el clima. Su evaluación sobre un ensayo de larga duración ha mostrado que bien que las curvas de evolución de la cantidad de  $\Delta$  estaban correctamente descritas (en un periodo de simulación de 7 años), el modelo podría ser mejorado considerando mejor la desaparición de zonas  $\Delta$  bajo el efecto del clima y de la fauna del suelo. La extensión de este modelo a otros suelos diferentes de los limos arcillosos de la Cuenca Parisina es deseable, pero, este modelo puede actualmente ser utilizado para comparar el efecto de la evolución de la estructura del suelo de diferentes alternativas técnicas (fechas de las intervenciones, tipo de material, modalidades de manejo del suelo, sucesiones de cultivos...).

**Palabras clave**

Estructura del suelo, manejo del suelo, labranza, compactación, sistema de cultivo, modelización.

L'évaluation des effets à moyen et long termes des systèmes de culture sur la structure du sol est une composante essentielle de la mise au point de systèmes de culture durables. L'élaboration de références sur l'effet des pratiques culturales sur les états du sol a longtemps reposé sur des méthodes d'ajustement empirique, nécessitant de nombreuses expérimentations ou observations en situations agricoles (Manichon, 1982). Cette manière d'agir apparaît maintenant mal adaptée au contexte actuel des recherches agronomiques : d'une part le rythme d'apparition des innovations technologiques s'est fortement accru et la nécessité de modifier les pratiques culturales se fait plus urgente (Meynard, 1998) ; d'autre part ce type d'études ne permet que rarement d'évaluer soit les effets à long terme des systèmes de culture sur l'état du sol, soit les répercussions des états créés sur le fonctionnement des cultures ou l'environnement. La modélisation est devenue indispensable pour atteindre l'ensemble de ces objectifs.

La structure des couches de sol cultivées évolue en permanence sous l'effet du climat, du peuplement végétal et des actions de l'agriculteur, qui agit sur cette partie du sol directement par ses techniques culturales ou la circulation des engins agricoles et indirectement par le choix des successions de cultures qui détermine le calendrier d'occupation de la parcelle. Cette caractéristique du sol présente, le plus souvent, une forte variabilité spatiale. Cette variabilité tient en partie au fait que les contraintes mécaniques qui s'appliquent sur le sol n'affectent pas, en général, la totalité de la couche de sol travaillée. (le compactage s'exerce ainsi au droit du passage des roues des engins agricoles, les outils de travail du sol n'opèrent pas tous à la même profondeur, l'effet du climat sur le sol est maximal au voisinage de l'interface entre celui-ci et l'atmosphère, etc...). Il en résulte une variabilité importante de la structure au sein des couches de sol travaillées et, partant, une forte variabilité spatiale des conditions locales de fonctionnement (infiltration de l'eau, activité biologique, aération...) qu'il est important d'appréhender pour prendre en compte les effets de ce fonctionnement sur l'environnement. S'il existe dans la littérature beaucoup de modèles qui prévoient les modifications de la structure sous l'effet de l'un ou l'autre de ces différents processus, aucun ne porte sur la prévision à moyen ou long terme de l'évolution de la structure du sol sous l'effet combiné de ces processus, en tenant compte de la variabilité spatiale de la structure à l'échelle du profil cultural. Dans les essais au champ de longue durée, les recherches portent essentiellement sur l'évolution de la constitution du matériau (teneur en matière organique par exemple - Kay *et al.*, 1988), dont on suppose que le rôle est déterminant sur le comportement mécanique du sol. D'autre part, 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 (Gupta et Raper, 1994). Il apparaît très difficile d'utiliser les modèles qui en sont issus en les enchaînant dans un modèle global d'évolution où alternent fragmentation, compactage et déplacement du sol, les variables d'état de ces modèles méca-

nistes sont de natures très différentes (Gupta et Larson, 1982).

L'objectif de ce papier est de présenter un modèle d'évolution de l'état structural du profil cultural développé par les unités d'agronomie de Grignon et de Laon-Reims-Mons qui prend en charge la variabilité spatiale de la structure à l'échelle de la parcelle cultivée et qui intègre l'effet des différents processus d'évolution. Ce travail a débouché sur la conception d'un programme, baptisé SISOL (Simulation de l'évolution de la Structure des Sols Labourés), qui permet de simuler l'évolution à moyen et long terme d'un indicateur de l'effet des systèmes de culture sur la structure des horizons travaillés : leur teneur en éléments structuraux dont la porosité structurale est nulle (état interne  $\Delta$ , Manichon, 1982). Dans une première partie, nous présenterons les hypothèses à partir desquelles nous avons construit ce modèle et décrirons le principe de son fonctionnement. Dans une seconde partie, nous présenterons les résultats de son évaluation sur 3 parcelles de l'essai de longue durée mené sur le domaine expérimental de l'unité d'agronomie de Laon Reims Mons, dans un sol limoneux de Picardie.

## PRÉSENTATION DU MODÈLE

### L'indicateur de l'effet des systèmes de culture sur la structure

Les travaux sur l'étude de l'évolution de la structure du sol menés par nos équipes reposent sur la méthode de caractérisation de la structure proposée par Manichon (1982). Son utilisation en France depuis une vingtaine d'années a permis, grâce à un recueil systématisé et objectif d'informations sur la structure du sol et ses déterminants acquises lors d'enquêtes agronomiques, de comparer de très nombreuses observations recueillies sur une large gamme de systèmes de culture et de types de sol. Ces informations ont progressivement, et de manière collective, contribué à l'élaboration d'un corps d'hypothèses sur l'évolution de l'état structural du profil cultural sous l'effet des systèmes de culture sur lequel repose le travail de modélisation qui fait l'objet de cet article. Elles ont également conduit à proposer un indicateur de ces effets sur la structure qui permet d'en quantifier l'évolution : la teneur en  $\Delta$  des horizons travaillés (Manichon et Roger-Estrade, 1990). Le choix d'un indicateur basé sur l'état interne  $\Delta$ , de préférence aux autres types d'état interne (ou à la mesure de la proportion relative des différents types d'état et de la terre fine), repose essentiellement sur deux hypothèses :

1. La présence de  $\Delta$  dans la couche travaillée peut être associée sans ambiguïté aux tassements sévères d'origine anthropique entraînant la disparition quasi totale de l'espace poral structural. L'origine des autres types d'état ou de la terre fine ne peut en effet être attribuée à un seul mécanisme d'évolution de la structure. Cette hypothèse, nécessaire pour que l'indicateur puisse être considéré comme révélateur des effets de compactage liés au système de culture ou à son mode de conduite, paraît raisonnable

dans la gamme des textures rencontrées le plus souvent dans les sols cultivés des régions tempérées.

2. L'état  $\Delta$  présente une certaine stabilité temporelle, du moins dans la partie de l'horizon travaillé située sous l'horizon de reprise. Cette hypothèse est déterminante vis-à-vis de la capacité de l'indicateur à jouer un rôle de révélateur des effets cumulatifs du système de culture sur la structure du sol (de jouer un rôle de « mémoire » des effets de tassement). Elle est étayée par plusieurs observations au champ ayant montré la persistance du  $\Delta$  sur des périodes de l'ordre de quelques années (Manichon et Sebillotte, 1975 ; Manichon, 1982). Elle est également confortée par les résultats de Coulomb *et al.* (1993) qui montrent que le labour n'entraîne pas de variation importante de la proportion de  $\Delta$  au sein de l'horizon de sol compris entre le lit de semence et le fond de labour et que cette opération, si elle diminue le calibre des éléments  $\Delta$ , n'exerce pas une action de fragmentation suffisamment intense pour les faire disparaître (en les transformant en terre fine).

## Hypothèses sur les mécanismes d'évolution de la teneur en $\Delta$

La teneur en  $\Delta$  évolue, dans l'horizon travaillé, sous l'effet de trois processus : création, transfert et disparition. Cet indicateur permet donc de quantifier le solde du bilan des actions de compactage (qui créent du  $\Delta$ ) et de fragmentation (qui diminuent la proportion de  $\Delta$  en transformant les mottes en terre fine) qui s'exercent sur la couche travaillée. Lorsque le travail du sol comprend un labour, cette opération influence également fortement l'évolution de l'indicateur. La charrue mélange des volumes d'états structuraux différents et diminue le calibre des volumes de sol tassés créés par les passages de roues. De plus, cette opération, en retournant le sol, remonte près de la surface des éléments d'état interne  $\Delta$ , les soumettant à l'action de fragmentation des agents climatiques et des outils de reprise.

Dans le modèle, les hypothèses faites sur ces trois processus sont les suivantes :

1. La création de mottes d'état interne  $\Delta$  est anthropique : elle est due aux tassements par les roues des engins agricoles. Pour un type de sol donné, la quantité de  $\Delta$  créée est plus ou moins importante suivant les conditions d'humidité et les caractéristiques de la contrainte mécanique appliquée.

2. C'est la fragmentation puis le basculement latéral par la charrue des volumes tassés qui entraînent l'apparition de mottes  $\Delta$  dans les parties du profil situées hors des passages de roue postérieurs au labour. Ce transfert de  $\Delta$  entre compartiments du profil s'effectue alternativement, d'un labour à l'autre, vers la droite et vers la gauche.

3. Lors des reprises, la nature des outils utilisés entraîne une fragmentation intense au sein de l'horizon H1. Dans cet horizon, les mottes  $\Delta$  disparaissent, étant transformées en terre fine par les outils de reprise du labour. Cette action de fragmentation est renforcée par celle des agents climatiques, maximale dans cet hori-

zon au contact de l'atmosphère, y compris dans des situations où la teneur en argile est de l'ordre de 20 %.

## Structure du modèle

Dans le programme SISOL, la face d'observation du profil cultural est représentée comme un ensemble de quadrats répartis sur une grille de maille carrée 1 cm x 1 cm (*figure 1*). Chacun est défini par ses coordonnées et un état interne pouvant avoir deux modalités :  $\Delta$  et non- $\Delta$ . Lors de chaque opération culturale, une partie des quadrats est modifiée (*tableau 1*) : modification de la position, sans changement d'état (lors du labour) ou modification de l'état sans changement de position (forcé à  $\Delta$  dans les zones tassées, sous les passages de roues ; forcé à non- $\Delta$  dans l'horizon de surface, fortement fragmenté par les outils de reprise et le climat). Le principal intérêt d'une telle structure de modèle est qu'elle offre la possibilité de faire varier la proportion des quadrats qui sont, sous les passages de roues, forcés à l'état  $\Delta$ . Pour prévoir cette proportion, nous avons utilisé des relations, établies sur le type de sol du domaine expérimental d'Estrées-Mons, liant les caractéristiques de la contrainte appliquée (charge sur essieu et largeur d'appui au sol) et l'humidité du sol à l'importance du volume de  $\Delta$  créé sous les roues.

Les modèles de compactage dont on dispose à l'heure actuelle ne se prêtaient pas directement à cet objectif (Défossez *et al.*, 2004). C'est pourquoi nous avons choisi une attitude plus pragmatique en établissant ces relations à partir d'observations réalisées dans le cadre du dispositif expérimental d'Estrées-Mons. Celui-ci se prêtait particulièrement bien à une telle approche : les conditions d'humidité lors des opérations culturales couvrent une gamme étendue (du point de flétrissement permanent jusqu'à la capacité au champ) et les matériels employés représentent la quasi totalité des conditions de compactage (charge sur essieu, largeur d'appui au sol) que l'on peut rencontrer en situation de grande culture (Richard *et al.*, 1999). Après avoir sélectionné des situations pour lesquelles la teneur en  $\Delta$  était presque nulle avant le passage de la roue, l'humidité au moment du passage a été mesurée, ainsi que la taille de la zone  $\Delta$  créée lors du roulement, en utilisant une méthode basée sur l'analyse d'images (*cf. infra*). Les relations ont été établies à partir de la taille relative de la zone  $\Delta$ , calculée en faisant le rapport entre la surface de la zone  $\Delta$  et une surface de référence déterminée par le produit de la largeur maximale du pneumatique et la profondeur de travail. Les tassements affectant la partie du sol située sous le fond de labour n'ont pas été pris en compte. Les opérations analysées ont été classées en 3 groupes, en fonction de l'intensité de la contrainte mécanique appliquée au sol (Roger-Estrade *et al.*, 2000). Les contraintes les plus faibles étaient appliquées par un premier groupe d'opérations comprenant le déchaumage et la préparation du lit de semences. Les contraintes les plus fortes étaient dues aux passages de engins utilisés pour la récolte (moissonneuses, remorques, arracheuse de betteraves), du fait principalement de la très forte charge sur essieu. Enfin, les opérations de semis des cultures de printemps entraînaient un niveau de contrainte intermédiaire, en raison

de l'utilisation de pneumatiques étroits. Les résultats sont présentés à la *figure 2*. On constate que la création des zones  $\Delta$  débute à partir d'un seuil d'humidité variable suivant le type d'opération. Le volume créé croît ensuite avec l'humidité.

Pour établir les relations paramétrées dans SISOL, nous avons considéré que la section de la zone  $\Delta$  créée sous la roue était rectangulaire. Cette section est le produit de la largeur par la profondeur de la zone créée sous la roue, toutes deux croissant linéairement avec l'humidité moyenne de la couche labourée. La largeur croît avec l'humidité lorsque celle-ci dépasse un certain seuil, appelé  $W_0$ , caractéristique du groupe d'opérations considéré; elle est maximale (égale à la largeur du pneumatique) pour un seuil d'humidité appelé  $W_{fl}$  qui dépend lui aussi du groupe d'opérations considéré. La profondeur croît également à partir de  $W_0$  et atteint sa valeur maximale (égale à la profondeur de labour) pour un seuil d'humidité appelé  $W_{fd}$ , qui dépend également du groupe d'opérations considéré. Les

courbes obtenues en multipliant les deux relations linéaires ont été portées sur le graphe de la *figure 2b*. On constate qu'elles ajustent relativement bien les points expérimentaux.

Les équations utilisées dans la procédure de calcul du déplacement des quadrats lors du labour sont issues d'une analyse du modèle de retournement du sol par la charrue publié par Roger-Estrade *et al.* (2000), dont le principe est présenté à la *figure 3*. Le mouvement latéral de la bande de terre découpée par la charrue comprend deux rotations successives dans un plan perpendiculaire au sens d'avancement de l'outil. Ce mouvement cesse lorsque la bande de terre repose sur la dernière bande découpée au passage précédent. L'angle d'inclinaison de la bande de terre est alors tel que son sinus est égal au rapport profondeur sur largeur de labour. Pour modéliser la fragmentation de la bande de terre lors de ce mouvement, nous l'avons divisé en rectangles plus petits glissant le long d'un axe parallèle à l'inclinaison de la bande jusqu'au fond de labour.

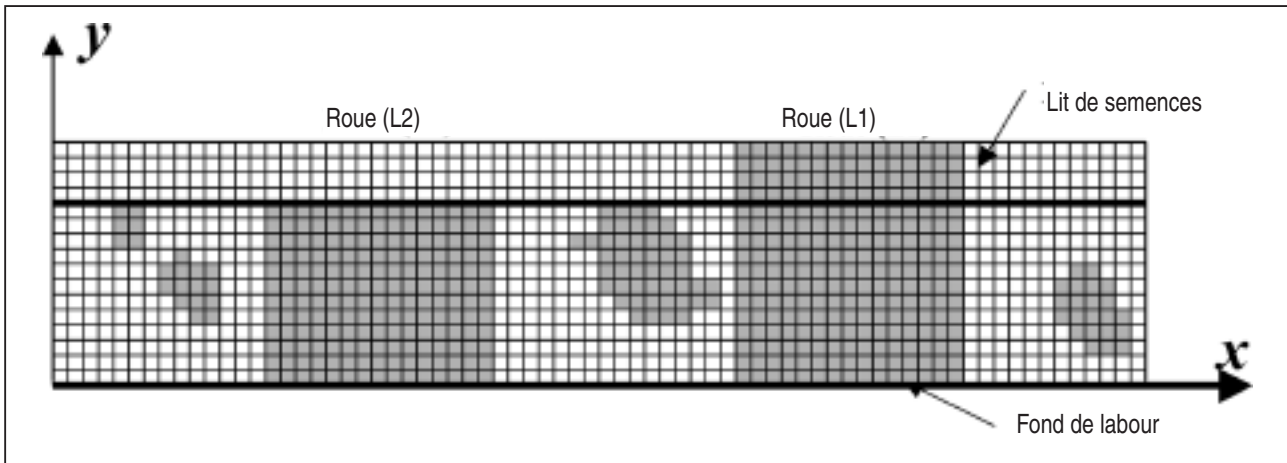
**Figure 1** - Dans le modèle SISOL, la face d'observation du profil cultural est représentée, comme un ensemble de quadrats régulièrement répartis sur une maille carrée de 1 cm x 1 cm. Chaque quadrat est défini par ses coordonnées et une structure:  $\Delta$  (en noir sur le schéma) ou non- $\Delta$  (en blanc).

Roue L2: passage effectué lors de la préparation du lit de semences; roue L1: passage effectué au semis.

**Figure 1** - The observation face of a soil pit is represented in the SISOL model as a set of pixels.

Each of them is defined by its co-ordinates and a structure  $\Delta$  (in black) or non- $\Delta$  (in white).

Roue L2: wheel track corresponding to a secondary tillage operation; roue L1: wheel track at sowing.



**Tableau 1** - Règles pour le changement d'état des quadrats à chaque opération culturale.

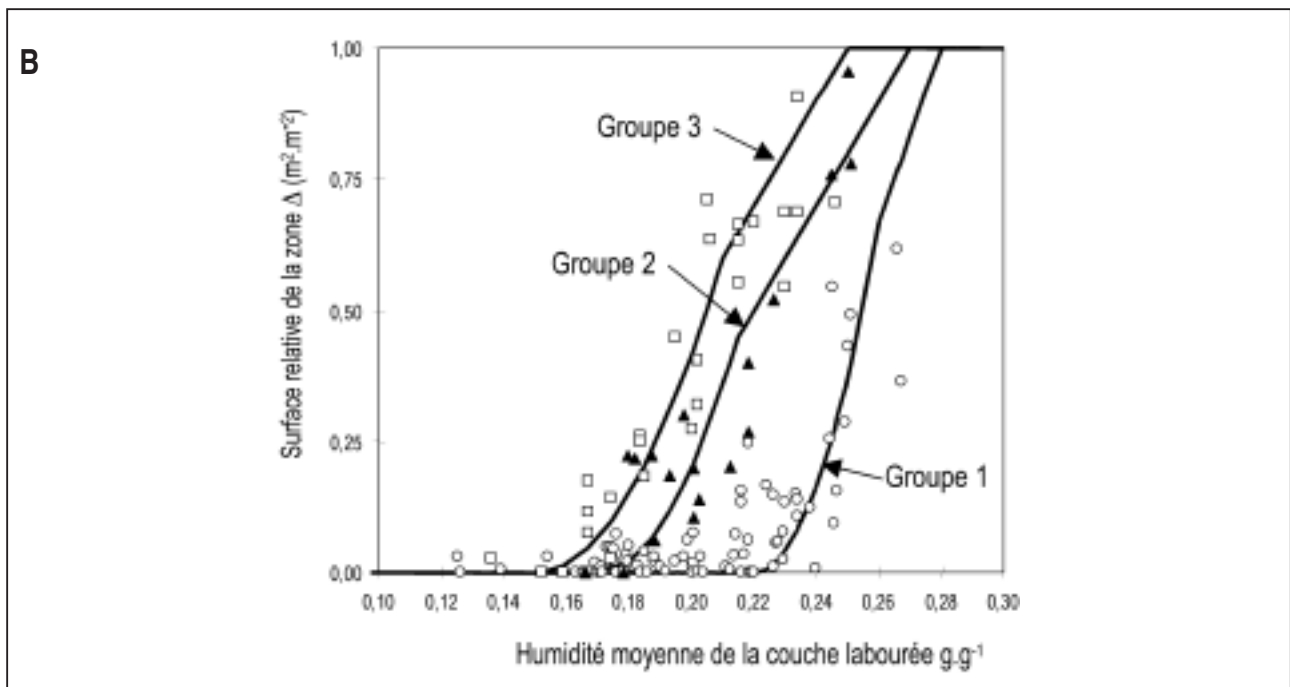
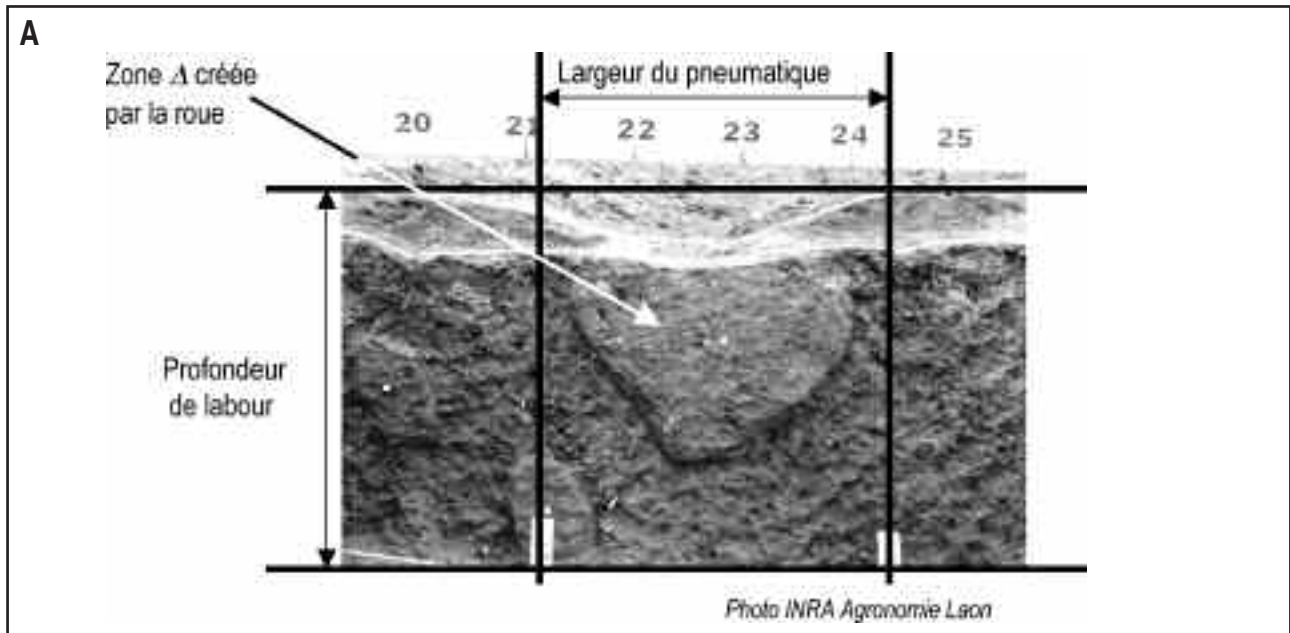
**Table 1** - Changes in the quadrat structure after each cultivation operation as they are simulated by SISOL.

Etat avant opération	Etat après		
	une opération de préparation du lit de semences	une opération entraînant un tassement	un labour
$\Delta$	non $\Delta$	$\Delta$	$\Delta$
non $\Delta$	non $\Delta$	$\Delta$	non $\Delta$



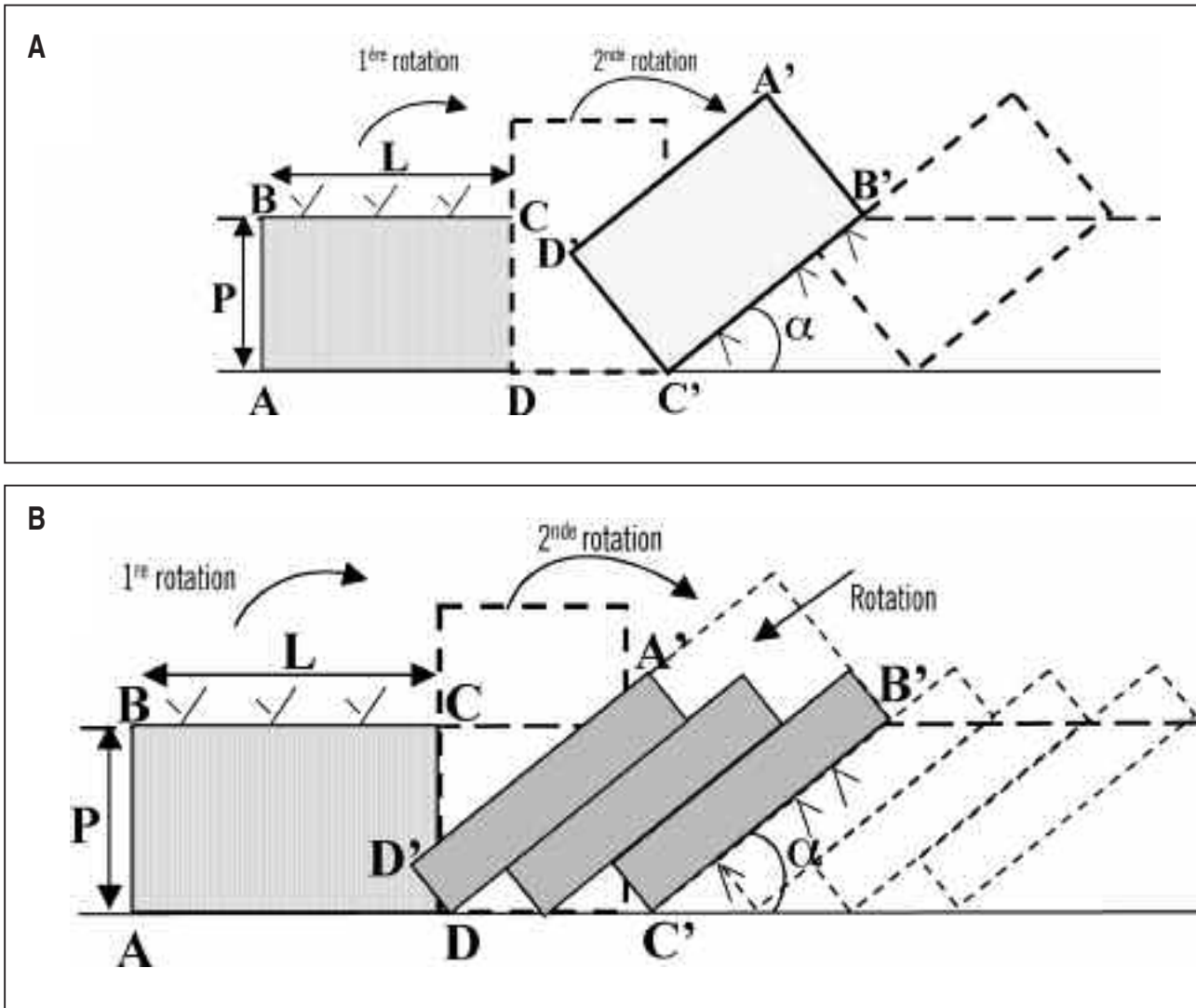
**Figure 2** - Principe de l'évaluation de la taille relative de la zone tassée sous la roue (a) et variation de cette taille relative en fonction de la teneur en eau moyenne de la couche labourée (b). Les traits pleins correspondent aux ajustements réalisés pour établir la relation entre la taille relative de la zone  $\Delta$  et l'humidité moyenne de la couche labourée pour chaque groupe d'opérations. Types d'opérations : groupe 1 = déchaumage et préparation du lit de semences ; groupe 2 = broyage des pailles et semis des cultures de printemps ; groupe 3 = récoltes.

**Figure 2** - Principle for the evaluation of the relative size of the compacted zone under the wheel track (a) and variation of this relative size as a function of the mean water content of the tilled horizons (b). Plain lines on the graph correspond to the relationships between the relative size of the  $\Delta$  zone and the mean water content of the tilled horizon, fitted to the experimental data shown on the graph. Cultivation operation were divided in three groups : group 1 = stubble breaking and secondary tillage ; group 2 = chopping and sowing of spring crops ; group 3 = harvesting.



**Figure 3** - Schéma du principe du modèle de retournement de la bande de terre découpée par la charrue. La bande découpée est représentée en section dans un plan perpendiculaire au sens d'avancement de la charrue. Le mouvement comprend deux rotations successives (a), puis une translation (b) qui simule l'effondrement de la terre en fond de raie, après retournement (exemple avec deux plans de cisaillement découpant la bande). A', B', C', D' : position des points A, B, C et  $\Delta$  après retournement; P = Profondeur de labour, L = Largeur de labour.

**Figure 3** - Soil movement during ploughing explained as a succession of a rotation of the whole furrow (a) followed by a breakup into slides and their translation (b). Example with three slides. A', B', C', D' : location of dots A, B, C et  $\Delta$  after rotation of the furrow; P = ploughing depth; L = ploughing width.



Le nombre de plans élémentaires divisant la bande de terre a été choisi suffisamment grand pour que la couche labourée retrouve après labour son épaisseur initiale (à partir d'un nombre de l'ordre d'une dizaine de plans de cisaillement, la dimension des crêtes au sommet du profil et celle des vides près du fond de labour devient négligeable). Ceci était indispensable pour pouvoir enchaîner la simulation des effets sur le sol des opérations successives de l'itinéraire

technique. Cela revient à prendre en compte dans la modélisation du labour lui-même, le phénomène de diminution de volume de la bande de terre consécutif au foisonnement occasionné par le labour qui, dans la réalité, s'effectue durant les mois qui suivent cette opération. Ce découpage de la bande de labour ne modifie pas la proportion de quadrats d'état interne  $\Delta$ . En revanche, ce choix de modélisation pénalise l'utilisation du modèle pour simuler d'autres

caractéristiques de la structure que la teneur en  $\Delta$  (par exemple la taille des éléments structuraux  $\Delta$ ).

Pour simuler la disparition du  $\Delta$ , nous avons considéré qu'elle était maximale dans l'horizon de surface, dont l'épaisseur est égale à la profondeur de travail des outils de reprise : tous les quadrats sont forcés à l'état interne non- $\Delta$  dans cet horizon, lors des opérations de reprise du labour, quelles que soient les conditions d'humidité. Là encore, cette attitude revient à attribuer à l'opération de reprise elle-même une action de fragmentation qui est due non seulement à celle, brutale, des outils de reprise, mais également à l'action, plus progressive, du climat (alternances humectation-dessiccation, gel-dégel).

L'organigramme du modèle SISOL est présenté à la *figure 4*. La localisation initiale des zones d'état interne  $\Delta$  est lue par le programme comme un tableau de quadrats dont la taille dépend de celle du profil modélisé. Chaque pas du modèle correspond à une opération culturale. A chaque étape les caractéristiques de l'équipement utilisé (charge sur essieu, largeur de travail et des pneumatiques, profondeur de travail...) sont lues dans un fichier ainsi que les conditions d'humidité lors du passage. Lors des opérations de reprises du labour, les quadrats situés dans l'horizon de surface correspondant à la profondeur de travail sont forcés à l'état non- $\Delta$ . A chaque étape, la teneur en  $\Delta$  est évaluée par la proportion de quadrats dont l'état interne est  $\Delta$ . Enfin, le programme fournit une carte de la répartition des points d'état interne  $\Delta$  dont quatre exemples sont présentés à la *figure 5*.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Estimation de la teneur en $\Delta$ dans l'essai de Mons.

Le modèle a été évalué en comparant ses sorties aux mesures de teneur en  $\Delta$  de la couche labourée effectuées sur 3 parcelles de l'essai de longue durée de Mons, situé sur un sol de limon profond et qui compare 3 systèmes de culture dont on attend des effets très contrastés sur l'évolution de l'état structural. Cet essai et les caractéristiques du sol sur lequel il est implanté sont décrits en détail dans l'article Boizard *et al.* (2004). Trois parcelles ont été retenues, une par système de culture, qui n'appartenaient pas au jeu des parcelles ayant servi à mettre au point le module de compactage de SISOL. Dans ces parcelles, dénommées PI, PII et PIII en fonction du numéro du système de culture auquel elles appartenaient, la teneur en  $\Delta$  a été évaluée tous les ans quelques jours après le semis de chaque culture de la succession. Pour ce faire, on a creusé dans chaque parcelle une fosse d'observation (3 m de largeur et 0,6 m de profondeur), perpendiculaire au sens de travail et de circulation des engins, localisée dans la parcelle de manière à éviter les passages de roues effectués lors des opérations de traitement et de fertilisation (ces passages sont situés tous les 24 m). Sur la face d'ob-

des engins, localisée dans la parcelle de manière à éviter les passages de roues effectués lors des opérations de traitement et de fertilisation (ces passages sont situés tous les 24 m). Sur la face d'observation, préparée de manière à être aussi plane que possible, les zones  $\Delta$  ont été délimitées au couteau pour faciliter leur repérage sur les photographies. La face a ensuite été photographiée tous les 6,5 cm en utilisant un appareil muni d'un objectif à faible distorsion (Nikkon 50 mm), situé à environ 1,3 m de la face d'observation. Ceci a permis l'interprétation stéréoscopique des images à partir de laquelle on a dessiné manuellement des cartes des zones  $\Delta$ . L'utilisation d'un logiciel d'analyse d'image (VISILOG®) a permis de calculer, sur ces cartes, le rapport de la surface cumulée des zones  $\Delta$  à la surface totale de la partie de l'horizon labouré située entre le lit de semence et le fond de labour. Afin d'estimer la précision de cette estimation, 9 profils ont été réalisés dans une même parcelle en 1994. La précision de la mesure a été assimilée au coefficient de variation des 9 mesures de teneur en  $\Delta$  (22 %). En 1990, date de mise en place de l'essai, la teneur en  $\Delta$  était, dans chacune des trois parcelles, égale à 18,5 %. Durant toute la période d'étude, les positions par rapport au bord de la parcelle de tous les passages de roues ont été systématiquement mesurées et enregistrées dans un fichier paramètre. La précision de ce positionnement est de l'ordre de 10 cm. De même on a mesuré et enregistré, à chaque intervention, la teneur en eau massique moyenne de la couche labourée (4 profils hydriques par parcelle, établis par pas de 5 cm de 0 à 30 cm de profondeur).

### Simulations

Les simulations ont été effectuées sur une période de 7 ans, de 1990 à 1997. Durant ce laps de temps, 34, 31 et 32 opérations culturales ont été pratiquées respectivement sur les parcelles PI, PII et PIII. Les caractéristiques des équipements utilisés figurent dans Boizard *et al.* (2004). Les profils ayant servi à évaluer la teneur en  $\Delta$  sur le terrain étant positionnés en dehors des passages de roues lors des opérations de traitement, ces opérations n'ont pas été prises en compte dans les simulations. Celles-ci ont commencé avec le semis des premières cultures de l'essai en 1990 (pois en PI, betterave sucrière en PII et maïs en PIII) et se sont terminées en 1997, les trois parcelles étant alors en blé. La carte de structure initiale a été déduite de l'observation faite en 1990. Les positions par rapport au bord de la parcelle des passages successifs de charrue n'ayant pas été localisées sur l'essai, elles ont été tirées au sort à chaque labour.

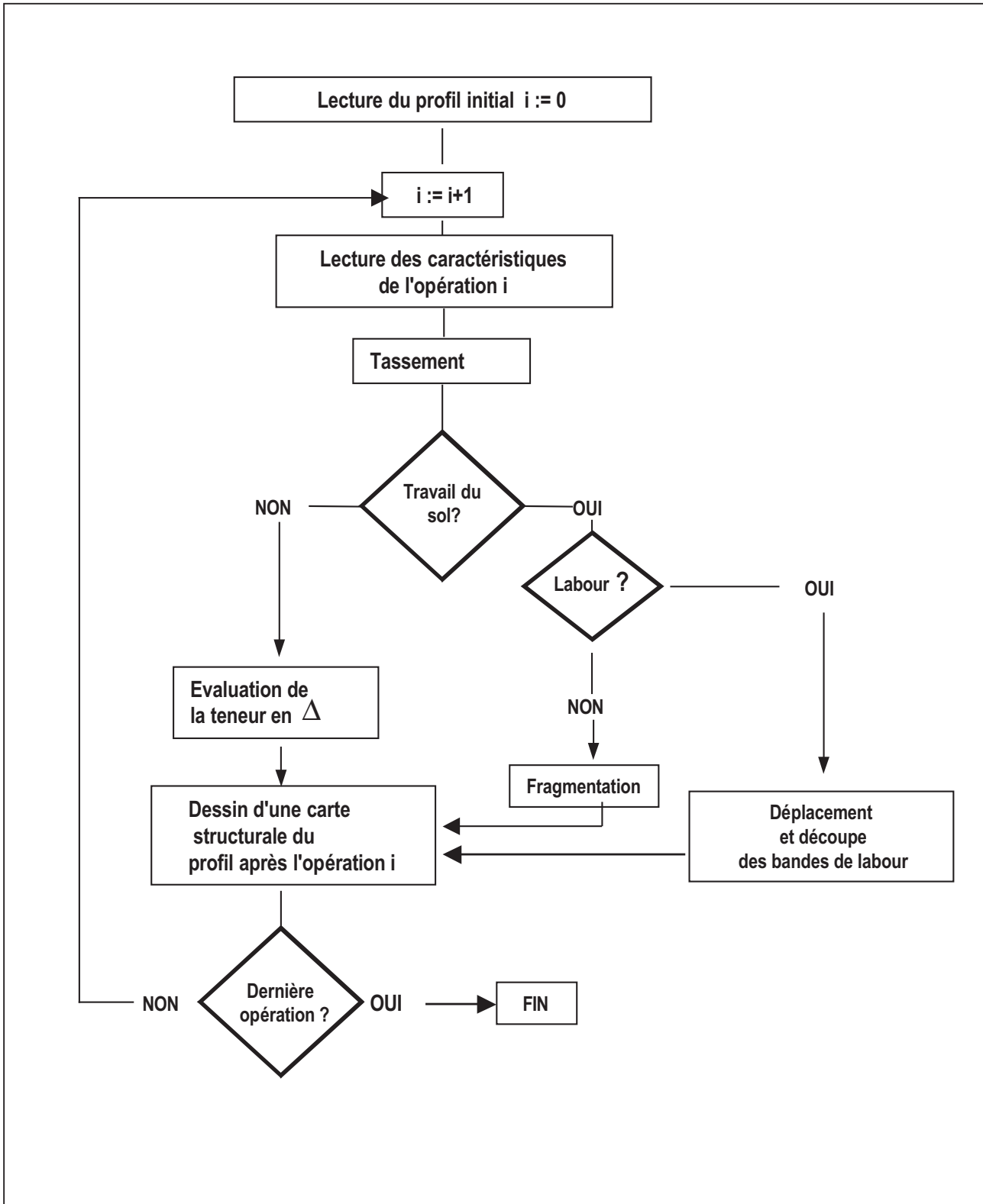
### Évaluation du modèle

Une première évaluation a porté sur le sous-modèle de compactage. Les relations présentées à la *figure 2* ont été évaluées d'abord séparément pour chaque groupe d'opérations puis globalement sur l'ensemble des observations expérimentales. Pour l'évaluation globale du modèle SISOL, nous disposons, sur chacune des parcelles, de 7 valeurs observées (une valeur par an, calculée sur le profil cultural observé au semis de chaque culture de la succes-



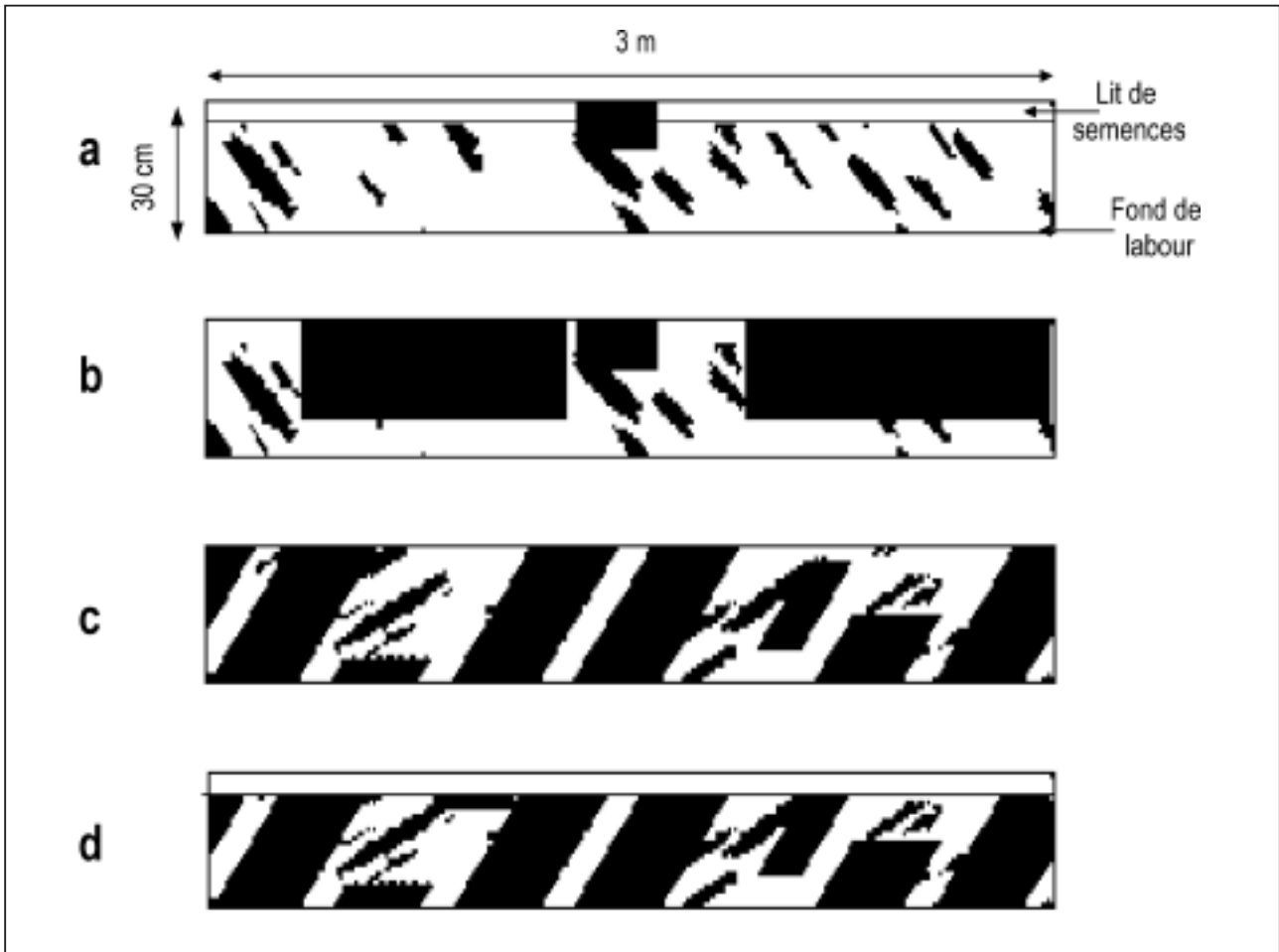
Figure 4 - Organigramme du programme SISOL.

Figure 4 - SISOL flow chart.



**Figure 5** - Exemples de cartes structurales produites par le modèle : évolution de la proportion et de la localisation des quadrats  $\Delta$  après 4 opérations culturales : (a) Semis de betterave. Tassement modéré par les roues du tracteur tirant le semoir ; (b) Récolte de la betterave. Tassements importants par les roues de l'arracheuse et les remorques ; (c) Labour. Fragmentation et déplacement des volumes tassés lors de la récolte de la betterave ; (d) : préparation du lit de semences pour le blé. Pas de tassement, création d'un nouveau lit de semences. Les quadrats  $\Delta$  sont en noir (une carte comprend 9 000 quadrats).

**Figure 5** - Examples of structural maps drawn by the program : simulated changes of the percentage and location of the  $\Delta$  pixels in the tilled horizon, after four cultivation operations : (a) sugar beet sowing. Moderate compaction during sowing ; (b) sugar beet harvest. Heavy compaction by the harvester and the trailers ; (c) ploughing. Fragmentation and displacement of the compacted soil volumes during the sugar beet harvest ; (d) secondary tillage before wheat sowing. No compaction and creation of a new seed bed.  $\Delta$  pixels are in black (one map comprises 9000 pixels).



sion), soit 21 observations au total. Les critères statistiques utilisés pour évaluer les performances du modèle sont (Smith *et al.*, 1996) :

Dans ces équations,  $n$  est le nombre d'observations,  $O_i$  représente - l'erreur quadratique moyenne : (1)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}$$

- l'efficacité de modélisation :

(2)

$$MEF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

- le coefficient de corrélation : (3)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

mètres, nous avons étudié l'effet d'une variation des valeurs des seuils d'humidités au compactage ( $W_0$  et  $W_{fd}$ ) et de la profondeur de reprise, sur l'efficacité de modélisation (MEF).

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les valeurs des critères statistiques retenus pour évaluer le sous-modèle de compactage ainsi que les performances globales du modèle SISOL, sont présentées au *tableau 2*. La performance plus faible du sous-modèle de compactage pour les points du premier groupe d'opérations (déchaumage et préparation du lit de semences) s'explique par la plus forte variabilité des valeurs faibles (< 20 %) de la proportion de  $\Delta$  créée sous les roues. Sur l'ensemble des trois parcelles, les valeurs de la RMSE, de la MEF et du coefficient de corrélation ( $r$ ) sont satisfaisantes. Concernant la prévision de la teneur en  $\Delta$ , la RMSE (10 % environ) est légèrement supérieure à l'écart-type des valeurs mesurées (6 %); les valeurs de  $r$  et de l'efficacité de modélisation traduisent à la fois une coïncidence et une association correcte des valeurs simulées aux valeurs observées (Smith *et al.*, 1996).

La tendance d'évolution de la teneur en  $\Delta$  a été correctement simulée par le programme, dans les trois parcelles retenues pour son évaluation (*figure 6*). Ce pourcentage est resté, dans la parcelle PI, inférieur à celui mesuré dans les deux autres parcelles tout au long de

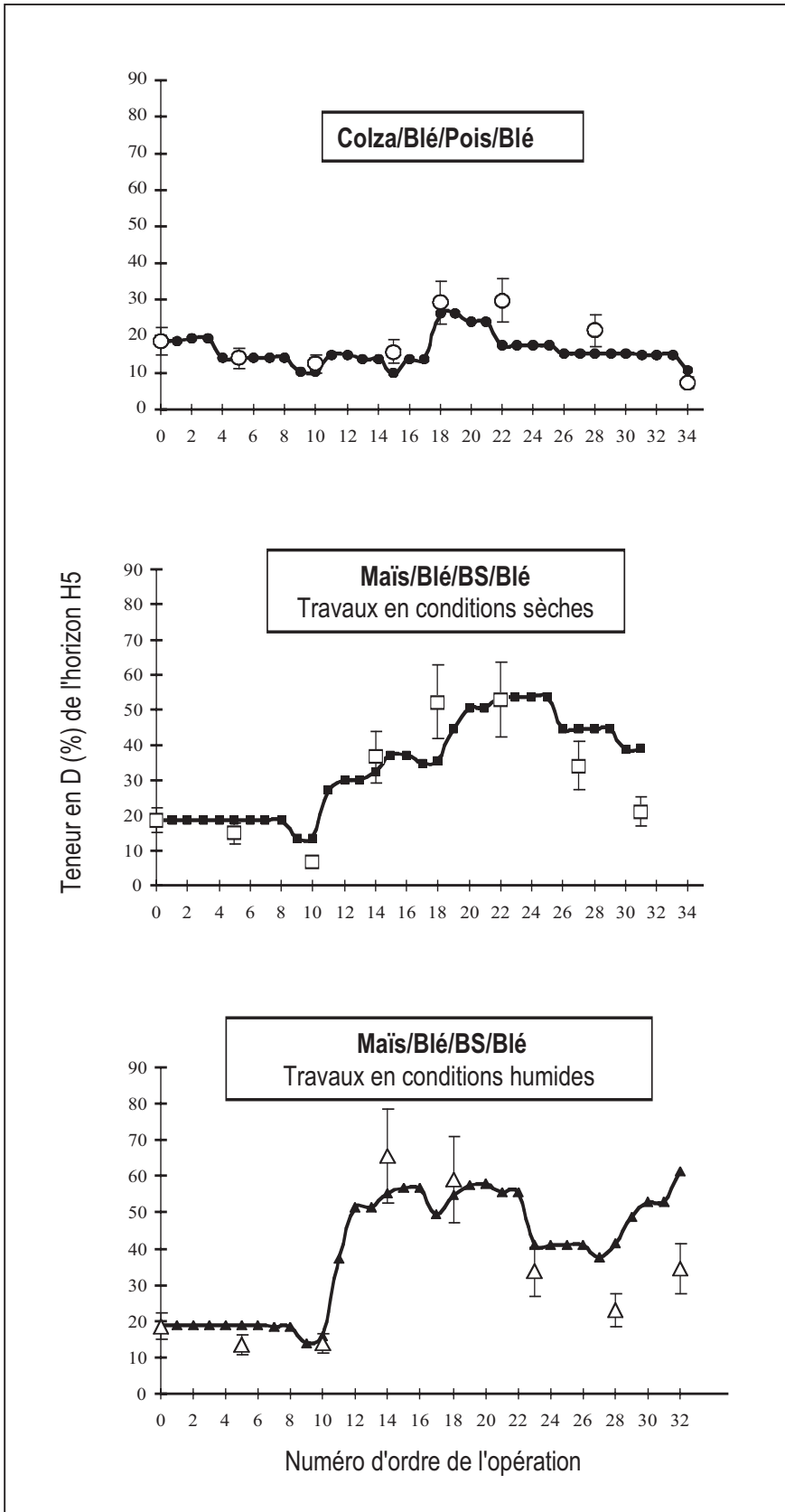
la période de simulation. Dans les parcelles PII et PIII, après une période de stabilité pendant les 2 premières années de l'expérimentation, liées à des conditions sèches lors des interventions culturales, le pourcentage augmente avant de diminuer à nouveau pour atteindre une valeur minimale légèrement supérieure à la valeur initiale. Dans la parcelle PIII, la teneur en  $\Delta$  augmente à nouveau la dernière année de la simulation. Ces caractéristiques de l'évolution de l'indicateur, très différentes entre parcelles, ont été reproduites par le programme. Ce dernier a toutefois sous-estimé les valeurs maximales atteintes dans les parcelles PII et PIII, et minimisé la chute des teneurs en  $\Delta$  durant les deux dernières années de la simulation.

Les résultats de l'analyse de sensibilité aux valeurs des principaux paramètres du modèle sont présentés à la *figure 7*. Nous avons testé l'effet sur l'efficacité de modélisation d'une variation des paramètres du sous-modèle de compactage (seuils d'humidité  $W_0$  et  $W_{fd}$ ) et du paramètre fixant la profondeur de travail lors des opérations de reprise du labour ( $r$ ). Une augmentation des seuils d'humidité au compactage se traduit par une diminution de la quantité de  $\Delta$  créé par le tassement; l'augmentation de la profondeur de reprise se traduit par un taux de disparition du  $\Delta$  plus élevé. Ces résultats suggèrent qu'une augmentation de la valeur de ces différents paramètres améliorerait les performances globales du modèle. Cependant, une analyse plus fine montre qu'une modification des seuils d'humidité dans le sous-modèle de compactage diminue ses performances propres; par ailleurs, la valeur de  $r$  a été mesurée avec soin à chaque opération de reprise, et il n'apparaît pas justifié de la diminuer pour mieux ajuster les valeurs simulées aux observations. Ces remarques suggèrent plutôt que c'est par construction que le modèle a tendance à sous-estimer la diminution de la teneur en mottes  $\Delta$ : la disparition du  $\Delta$ , liée aux processus mécaniques de fragmentation (par les outils) et de fissuration (par le climat et la faune)

**Tableau 2** - Evaluation du sous-modèle de compactage et du modèle SISOL : valeur de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), du coefficient de corrélation ( $r$ ) et de l'efficacité de modélisation (MEF).

**Table 2** - Evaluation of the compaction sub-model and the SISOL model.

	RMSE (%)	r	MEF
<b>Sous-modèle de compactage<sup>a</sup></b>			
Groupe d'opération N° 1 (n = 22)	14	0,77	0,36
Groupe d'opération N° 2 (n = 18)	12	0,97	0,80
Groupe d'opération N° 3 (n = 25)	11	0,94	0,83
Toutes opérations (n = 65)	12	0,90	0,76
<b>Modèle SISOL<sup>b</sup></b>			
Parcelle PI (n = 7)	9	0,96	0,85
Parcelle PII (n = 7)	11	0,75	0,57
Parcelle PIII (n = 7)	6	0,72	0,50
Ensemble des parcelles (n = 21)	9	0,88	0,74

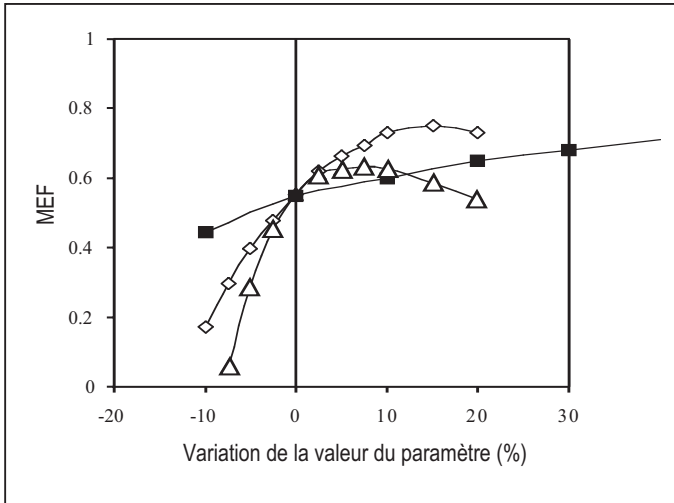


**Figure 6** - Test du modèle sur les parcelles du domaine expérimental d'Estrées-Mons : comparaison des évolutions de la teneur en  $\Delta$  (symboles de petite taille) avec les valeurs mesurées après le semis de chaque culture de la succession (symboles de grande taille).

**Figure 6** - Evaluation of the model using experimental results from the Estrées-Mons field trial : comparison between the time changes in the percentage of  $\Delta$  areas simulated by the model (small symbols) and measured values (big symbols).

**Figure 7** - Effet de la variation de la valeur des trois paramètres du modèle sur l'efficacité de modélisation.  $\Delta = W_0$ ;  $\blacksquare = W_{fi}$ ;  $\diamond = r$  (profondeur de reprise).

**Figure 7** - Effect of the variation of three parameters of the model upon the modelling efficiency.  $\Delta = W_0$ ;  $\blacksquare = W_{fi}$ ;  $\diamond = r$  (secondary tillage depth).



n'est prise en compte que de manière très simple, en faisant l'hypothèse que cette disparition est totale dans l'horizon fragmenté par les outils de reprise. Si la fragmentation lors de la reprise elle-même ne fait pas disparaître tout le  $\Delta$  de cet horizon, on peut penser qu'en cours de culture, l'effet du climat complète l'action des outils et fait disparaître tout le  $\Delta$  situé dans l'horizon de reprise. Cependant, cette action climatique (éventuellement renforcée par celle de la faune) affecte probablement aussi une partie du profil située plus profondément, dans la partie supérieure de l'horizon labouré non repris. La profondeur atteinte varie probablement avec les conditions climatiques (intensité du gel hivernal et/ou de la dessiccation pendant l'été...).

## CONCLUSION

Utilisant une description simplifiée des processus mécaniques impliqués dans l'évolution de l'état structural du profil cultural, le modèle proposé permet de décrire de manière relativement satisfaisante l'évolution de la teneur en  $\Delta$  au sein des horizons labourés. Ces premiers résultats mettent en évidence l'importance que joue le tassement, particulièrement lors des opérations de récolte et d'implantation des cultures, sur l'évolution de la structure. Mais ils confirment également que la seule modélisation du compactage ne suffit pas à rendre compte des variations de l'indicateur, comme le laissait présager les résultats obtenus en enquête ou dans les situations expérimentales de Grignon.

Ce modèle, bien qu'inféodé aux conditions à partir desquelles il a été construit, peut en l'état être utilisé pour étudier l'effet à moyen et long terme sur la structure d'un certain nombre de changements techniques (suppres-

sion occasionnelle du labour, règle d'emploi des outils, largeur et profondeur de travail...). Il représente également un outil prometteur pour l'étude de la variabilité spatiale de la structure du sol. En effet, cette approche présente l'avantage sur celles qui sont basées sur les outils de la géostatistique (Goovaerts, 1992), de pouvoir relier la variabilité observée aux actes techniques qui en sont, pour partie, responsables.

Néanmoins, plusieurs améliorations peuvent lui être apportées. Deux pistes de travail sont, à l'heure actuelle, envisagées. La première concerne l'amélioration de la modélisation des processus mécaniques pris en compte. Les efforts de modélisation ont jusqu'à présent porté sur les deux processus majeurs d'évolution de la structure, liés à l'activité anthropique : le déplacement et le compactage. L'analyse des performances du modèle, mais également le souci de pouvoir en étendre l'utilisation à des situations moins anthropisées, invitent à progresser dans la modélisation des processus de fragmentation et de fissuration sous l'effet des agents naturels (climat, racines, faune). Des travaux existent sur ce thème (Hallaire, 1987 ; Stengel et Bourlet, 1987) qui méritent d'être poursuivis en utilisant les nouvelles méthodes désormais accessibles (tomographie, Spanne *et al.*, 1994 ; Heijs *et al.*, 1995) ou en développant des approches théoriques innovantes (fractales, Rieu et Sposito, 1991). La seconde porte sur l'extension du domaine d'application à d'autres sols que celui sur lequel le modèle a été calé. En effet, et ceci est tout particulièrement vrai pour le sous-modèle de compactage, les paramètres utilisés correspondent aux caractéristiques (texture, teneur en matières organiques) du sol de la station expérimentale d'Estrées-Mons. Pour envisager l'application à d'autres situations, il faut étendre la paramétrisation à d'autres types de sol, dont le comportement mécanique (résistance au tassement, aptitude à la fragmentation) est différent. Il apparaît difficile d'envisager la voie de l'expérimentation, longue et coûteuse, sans l'associer à la modélisation. Nous envisageons ainsi d'adapter à la prévision de la teneur en  $\Delta$  des modèles existants (par exemple Kirby *et al.*, 1997 ou O'Sullivan *et al.*, 1999), avant d'envisager un reparamétrage pour d'autres types de sol.

## BIBLIOGRAPHIE

Boizard H., Richard G., Défossez P., Roger-Estrade J., Boiffin J., 2004 - Etude de l'effet à moyen et long terme des systèmes de culture sur



- la structure d'un sol limoneux-argileux du Nord du Bassin Parisien : les enseignements de l'essai de longue durée d'Estrée-Mons (80). *Etude et Gestion des Sols*, V11 n°1.
- Coulomb I., Caneill J., Manichon H., 1993 - Comportement du sol au labour II : évolution de l'état structural au cours du labour. *Agronomie*, 13, 45-56.
- Défossez P., Richard G., Boizard H., Roger-Estrade J., 2004 - Modélisation du compactage sous l'effet des passages d'engins agricoles. A paraître dans *Etude et Gestion des Sols*.
- Goovaerts P., 1992 - Factorial kriging analysis : a useful tool for exploring the structure of multivariate spatial soil information. *J. Soil Sci.*, 43, 597-619.
- Gupta S.C., Larson W.E., 1982 - Modeling soil mechanical behavior during tillage. *In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes*, P. Unger, D.M. Van Doren Jr, F.D. Whisler, E.L. Skidmore (Eds). American Society of Agronomy, Madison, USA, Spec. Public. 44, pp. 151-178.
- Gupta S.C., Raper R.L., 1994 - Prediction of soil compaction under vehicles. *In: Soil compaction and crop production*, B.D. Soane, C. van Ouwerkerk (Eds). Elsevier, Amsterdam, pp. 71-90.
- Hallaire V., 1987 - Méthodes de mesure du retrait vertical d'un sol argileux. *In: Soil Compaction and Regeneration*, G. Monnier, M.J. Goss (Eds). Balkema, Rotterdam/Boston, pp. 85-94.
- Heijs A., De Lange J., Schoute J.F.T., Bouma J., 1995 - Computed tomography as a tool for non destructive analysis of flow patterns in macroporous clay soils. *Geoderma*, 64, 1873-196.
- 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.
- Kirby J.M., Blunden B.G., Trein C.R., 1997 - Simulating soil deformation using a critical state-model : II. Soil compaction beneath tyres and tracks. *Eur. J. Soil. Sci.*, 48, 59-70.
- Manichon H., 1982 - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse INA P-G, Paris. 214 p.
- Manichon H., Sebillotte M., 1975 - Analyse et prévision des conséquences des passages successifs de différents outils sur le profil cultural. *Bull. Tech. Inf.* 302/303, 569-577.
- Manichon H., Sebillotte M., 1975 - Analyse et prévision des conséquences des passages successifs de différents outils sur le profil cultural. *Bull. Tech. Inf.* 302/303, 569-577.
- Manichon H., Roger-Estrade J., 1990 - Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. *In: Les systèmes de culture*, L. Combe, D. Picard (Eds). INRA, Paris, pp. 27-55.
- Meynard J.M., 1998 - La modélisation du fonctionnement de l'agrosystème, base de la mise au point d'itinéraires techniques et de systèmes de culture. *In: La conduite du champ cultivé : points de vue d'agronomes*. A. Biarnès (Ed.). ORSTOM, Paris. pp 30-54.
- Ney B., 1987 - Fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante cultivés. I. Analyse expérimentale des fonctionnements hydriques associés à deux états structuraux en vertisol irrigué. *Agronomie* 7, 247-256.
- O'Sullivan M.F., Henshall J.K., Dickson J.W., 1999 - A simplified method for estimating soil compaction. *Soil Till. Res.* 51, 151-160.
- Richard G., Boizard H., Roger-Estrade J., Boiffin J., Guérif J. 1999 - Field study of soil compaction due to traffic : pore space and morphological analysis. *Soil, Tillage Res.*, 51, 151-160.
- Rieu M., Sposito G., 1991 - Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 1231-1238.
- Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., Boiffin J., Caneill J., Manichon H., 2000 - Modelling structural changes in tilled topsoil over time as a function of cropping systems. *Eur. J. Soil Sci.*, 51, 455-474.
- Spanne P., Thovert J.F., Jacquin C.J., Lindquist W.B., Jones K.W., Adler P.M., 1994 - Synchrotron computed microtomography of porous media: topology and transport. *Phys. Rev. Let.* 73, 2001-2004.
- Smith J., Smith P., Addiscot T., 1996 - Quantitative method to evaluate and compare Soil Organic Matter (SOM) models. *In: Evaluation of Soil Organic Matter Models*, D.S. Powlson, P. Smith, J. Smith (Eds). Springer-Verlag, Berlin. pp. 181-199.
- Stengel P., Bourlet M., 1987 - Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage : effet de l'humectation. *In: Soil Compaction and Regeneration*, G. Monnier, M.J. Goss (Eds). Balkema, Rotterdam/Boston. pp. 95-110.