

# Modélisation du compactage sous l'effet des passages d'engins agricoles

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

(1) INRA, Unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons, Rue F. Christ, 02007 Laon Cedex, France

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

## RÉSUMÉ

Le compactage des sols par les engins agricoles modifie la structure du sol des couches travaillées et des couches sous-jacentes. Il peut de ce fait avoir des conséquences importantes sur la production végétale et l'environnement. Cet article est consacré à la modélisation du compactage en vue de prévoir son intensité en fonction des caractéristiques des engins agricoles et des conditions dans lesquelles ils sont utilisés. Il présente les différents modèles mécanistes disponibles dans la littérature et compare leurs performances. Les modèles de compactage prévoient la distribution des contraintes exercées par l'engin sur le sol et les modifications de structure qu'elles engendrent : l'augmentation de la masse volumique et la formation d'une ornière. Ils se décomposent en deux parties (i) un calcul des contraintes dans le sol à partir des caractéristiques de l'engin (charges, pneumatiques) (ii) une modélisation de la résistance mécanique du volume de sol sur lequel s'exercent ces contraintes à l'aide des relations contrainte-déformation mesurées en laboratoire. Les modèles pseudo-analytiques requièrent peu de paramètres. Ils ont été évalués pour une large gamme de conditions expérimentales au champ (type de sol, état hydrique et structural du sol) et s'avèrent satisfaisants dans des cas où le sol est de structure homogène. Les modèles basés sur la méthode des éléments finis (FEM) sont mieux adaptés pour traiter les sols hétérogènes. Cependant ils requièrent plus de paramètres et n'ont été testés que partiellement par des essais de laboratoire ou au champ avec des intensités faibles de tassement. Pour illustrer l'intérêt de la modélisation dans la gestion du risque de compactage lors des interventions culturales, deux simulations sont présentées : l'une analyse le compactage lors d'un chantier de récolte de betterave selon l'équipement utilisé, la seconde met en évidence l'effet du type de sol sur les délais d'intervention après une pluie lors des opérations de préparation de lit de semence au printemps.

## Mots clés

Compactage, modélisation, résistance mécanique

**SUMMARY****MODELLING SOIL COMPACTION DUE TO TRAFFIC**

Soil compaction by wheeling modifies the soil structure and consequently may affect crop production and the environment. When subsoil is concerned, it causes long-term damage to soil structure. This article is devoted to the modelisation of soil compaction and its application to compaction prevention. It presents the different mechanist models of soil compaction and their performances based on a bibliography analysis. Models predict stress distribution in the soil induced by farm vehicle and change in soil structure: increase in dry bulk density and rut depth formation. They include (i) calculation of stress distribution within the soil as function of the vehicle characteristics (load, wheels) (ii) modelisation of the soil mechanical strength based on mechanical laboratory tests. Pseudo-analytical models use a small number of parameters. They have been successfully evaluated in field conditions for homogeneous soils under a wide range of soil and water conditions. The models based on the Finite Element Method (FEM) have been shown to be more adequate for modelling heterogeneous soil structures. Nevertheless, these models require more mechanical parameters and have been evaluated under limited conditions in laboratory bins or in the field with low compaction intensities. Modelisation can be used to manage risk of soil compaction as illustrated by two examples: the first one deals with soil compaction during sugar beet harvest as function of machinery, the second one concerns the seed bed preparation operation during wet period. This last example analyses the delay that takes after a rain before entering the field with the sowing machine to avoid severe soil compaction depending on soil type (loess or chalky soil).

**Key-words**

Compaction, modelisation, mechanical strength

**RESUMEN****MODELIZACIÓN DE LA COMPACTACIÓN BAJO EL EFECTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA**

La compactación de suelos por la maquinaria agrícola modifica la estructura del suelo de los horizontes labrados y de las capas subyacentes. Por esta razón, puede haber consecuencias importantes sobre la producción vegetal y sobre el medio-ambiente. Este artículo está dedicado a la modelización de la compactación para prevenir su intensidad en función de las características de la maquinaria agrícola y de las condiciones de su utilización. Presenta diferentes modelos mecanistas disponibles en la literatura y compara sus resultados. Los modelos de compactación previenen la distribución de las tensiones ejercidas por la maquinaria sobre el suelo y las modificaciones de la estructura que van a provocar: el aumento de la masa volúmica y la formación de una rodada. Se descomponen en dos partes (i) un cálculo de fuerzas en el suelo a partir de las características de la maquina (cargas, neumáticos), (ii) una modelización de la resistencia mecánica del volumen de suelo sobre el que se están ejerciendo esas fuerzas por el intermedio de relaciones tensión-deformación medidas en el laboratorio. Los modelos seudo-analíticos requieren pocos parámetros. Han sido evaluados para una gran variedad de condiciones experimentales de campo (tipo de suelo, estado hídrico y estructura del suelo) y son satisfactorios cuando los suelos tiene una estructura homogénea. Los modelos basados sobre el método de elementos finitos (FEM) están mejor adaptados para tratar los suelos heterogéneos. Sin embargo requieren más parámetros y no han sido testados nada más que parcialmente con ensayos de laboratorio o de campo con bajas intensidades de compactación. Para ilustrar el interés de la modelización en la gestión del riesgo de compactación durante las intervenciones culturales, dos simulaciones son presentadas: una analiza la compactación durante una operación de cosecha de remolacha en función de la maquinaria utilizada, la segunda, permite hacer resaltar el efecto del tipo de suelo sobre el plazo de intervención después de una lluvia durante las operaciones de preparación de la capa de siembra en primavera.

**Palabras clave**

Compactación, modelización, resistencia mecánica del volumen

La diminution de la porosité du sol peut résulter de différents processus physiques, d'origine naturelle, comme la reprise en masse sous l'action des pluies ou d'origine anthropique, comme le compactage lié au passage des engins lors des interventions culturales. Cet article est consacré au compactage du sol par les engins agricoles. Le compactage se caractérise par une diminution de la porosité du sol sous la roue de l'engin et la formation d'une ornière en surface. Son intensité et sa fréquence sont déterminées, en fonction du type de sol, par le système de culture et les conditions climatiques (Boizard *et al.*, 2002). Il dépend de deux types de facteurs : les contraintes mécaniques appliquées par l'engin et la résistance mécanique du sol au moment du passage de l'engin. Le compactage du sol est un processus essentiel d'évolution de la structure de la couche travaillée et du sous-sol et donc a des conséquences importantes sur la production végétale et l'environnement (Soane et van Ouwerkerk, 1994). Il affecte l'implantation et le développement des cultures par son effet mécanique sur l'émergence (Dürr et Aubertot, 2000) et l'enracinement des plantes (Tardieu, 1988). Il augmente la stabilité physique du sol qui est un paramètre déterminant de l'érosion hydrique, il peut être à l'origine de volumes de sol anoxiques favorables à la dénitrification et donc à l'émission de gaz à effet de serre (Renault et Stengel, 1994). La création d'ornières s'avère en plus problématique pour les interventions culturales ultérieures. C'est pourquoi, le risque de compactage intervient dans la gestion des opérations de travail du sol.

Le contexte agricole actuel tend à une simplification des opérations de travail du sol et un accroissement des charges des engins. On diminue les opérations de travail du sol qui visent à régénérer la porosité du sol. Parallèlement le risque de compactage sévère est très élevé dans les systèmes de production avec présence de cultures industrielles comme la betterave. Ces fortes intensités de tassement sont imputables aux charges croissantes des engins et aux conditions dans lesquelles ils sont utilisés. Se pose alors la question de la prévention du compactage en fonction des équipements utilisés et de l'état physique du sol. Afin de gérer le risque de compactage lors des opérations culturales, on peut avoir recours à une modélisation qui intègre les caractéristiques des engins et l'évolution de la résistance mécanique du sol en fonction des conditions climatiques.

Cet article se propose dans une première partie de passer en revue les différents modèles de compactage en explicitant leur structure et en analysant l'évaluation qui en a été faite dans la littérature. Dans une seconde partie, des simulations de compactage réalisées à l'aide de l'un de ces modèles sont présentées pour illustrer ce que la modélisation peut apporter en matière de prévention du compactage.

## LES MODÈLES DE COMPACTAGE ET LEURS PERFORMANCES A L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

### Caractéristiques générales des modèles de compactage

L'engin agricole exerce sur le sol une charge mécanique qui est décrite par des contraintes mécaniques. Généralement, elles sont caractérisées par les trois contraintes principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  invariantes lors d'un changement de repère (*figure 1*). Lorsque l'on suppose une axisymétrie ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ), on représente également les contraintes à l'aide de la contrainte moyenne notée  $p$  associée à une compression isotrope et de la contrainte déviatorique notée  $q$  associée à un cisaillement (Atkinson et Bransby, 1978) :

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (1)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

L'action du pneumatique sur le sol est représentée par l'aire de contact entre le sol et la roue et par la distribution des contraintes qui s'exercent sur cette surface. Celles-ci se répartissent de façon inhomogène à l'interface sol-pneumatique. De nombreux travaux portent sur les relations entre les caractéristiques géométriques du pneumatique et la répartition des contraintes verticales de compression et de cisaillement à la surface du sol (Gupta et Raper, 1994). On observe en général que les contraintes verticales décroissent à mesure que l'on s'éloigne de l'axe central du pneu. La plupart des modèles de compactage ne considèrent que les contraintes verticales exercées par l'engin en négligeant les contraintes de cisaillement.

La réponse du sol à ces contraintes est quantifiée par les variations de sa porosité. On considère que le sol est un milieu isotrope et, selon les auteurs, on calcule la masse volumique du sol  $\rho_d$ , l'indice des vides  $e$  ou la déformation volumique  $\mathcal{E}_v$  du sol :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_v = - \frac{(e - e_0)}{e_d} \quad (2)$$

où  $\rho_s$  est la masse volumique du solide et  $e_0$  l'indice des vides initial. Le compactage s'accompagne de déformations élastiques, plastiques et de fractures dans le sol. Ces déformations sont caractéristiques du comportement mécanique complexe d'un sol non saturé. Ce comportement est décrit à l'aide des relations entre contraintes et déformations mesurées sur des volumes élémentaires de sol par des essais de laboratoire (oedomètre, machine à cisailier, triaxial) (Bardet, 1997).

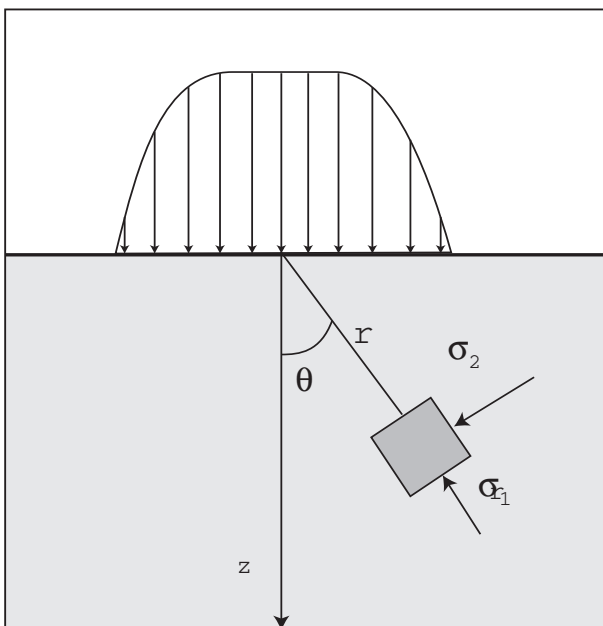
**Tableau 1** - Classification des modèles mécanistes de compactage des sols cultivés**Table 1** - Classification of the mechanist models of soil compaction

Modèles	Pseudo-analytiques	FEM
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Module de distribution des contraintes en surface</li> <li>• Module de propagation des contraintes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Répartition inhomogène des contraintes à la surface</li> <li>• Calcul pseudo-analytique de la distribution des contraintes 1D-2D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Répartition inhomogène des contraintes à la surface<sup>(1)</sup></li> <li>• Calcul numérique du champ de déplacement 2D-3D</li> </ul>
Module de comportement mécanique (nombre de paramètres)	Modèles logarithmiques (2)	Modèles pseudo-élastiques (3) Modèles Cam-clay (6) Modèles hydro-mécaniques (18)

(1) Hormis les travaux de Gysi et al. (2001), les simulations FEM de compactage de la littérature ont été réalisées pour des distributions des contraintes uniformes en surface (Défossez and Richard, 2002).

**Figure 1** - Représentation bidimensionnelle des contraintes exercées par un pneumatique sur un sol selon le modèle de Söhne (1953). Les contraintes verticales qu'applique le pneumatique à la surface du sol se propagent dans le sol ; il s'exerce alors sur un volume de sol élémentaire des contraintes principales  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ . La distribution des contraintes à la surface du sol suit une parabole de degré 4 qui représente le cas d'un sol ferme ( $\xi=5$ ) dans le modèle de Söhne (1953).

**Figure 1** - Two dimensional stressed exerted by wheel and acting on soil following the model of Söhne (1953). The vertical stresses exerted by wheel propagate through the soil. Stresses on a soil volume element are represented by the principal stresses  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ . The stress distribution at soil surface represents the fourth order holding for firm soil ( $\xi=5$ ) according to Söhne (1953).



La structure des modèles de compactage peut se décomposer en deux parties (tableau 1). La première partie calcule les contraintes exercées par l'engin à la surface du sol et leur propagation dans le sol. La seconde partie calcule l'évolution du volume du sol en fonction des contraintes mécaniques appliquées à partir d'une formalisation de la résistance mécanique du sol à l'aide des relations entre contraintes et déformations mesurées par des essais mécaniques de laboratoire. Différentes revues bibliographiques des modèles de compactage ont été proposées (Soane et al., 1981a, 1981b; Gupta et Allmaras, 1987; Schafer et al., 1991; Schafer et al., 1992; Gupta et Raper, 1994; O'Sullivan et Simota, 1995; Horn et al., 1998, Défossez et Richard, 2002). Les modèles de compactage se distinguent principalement par la procédure de calcul utilisée pour estimer la distribution des contraintes dans le sol : une procédure pseudo-analytique ou une procédure numérique basée sur la méthode des éléments finis (FEM). Ils se distinguent également par les relations entre contraintes et déformations utilisées pour modéliser la résistance mécanique du sol et qui représentent d'une façon plus ou moins complexe le comportement du sol (tableau 1).

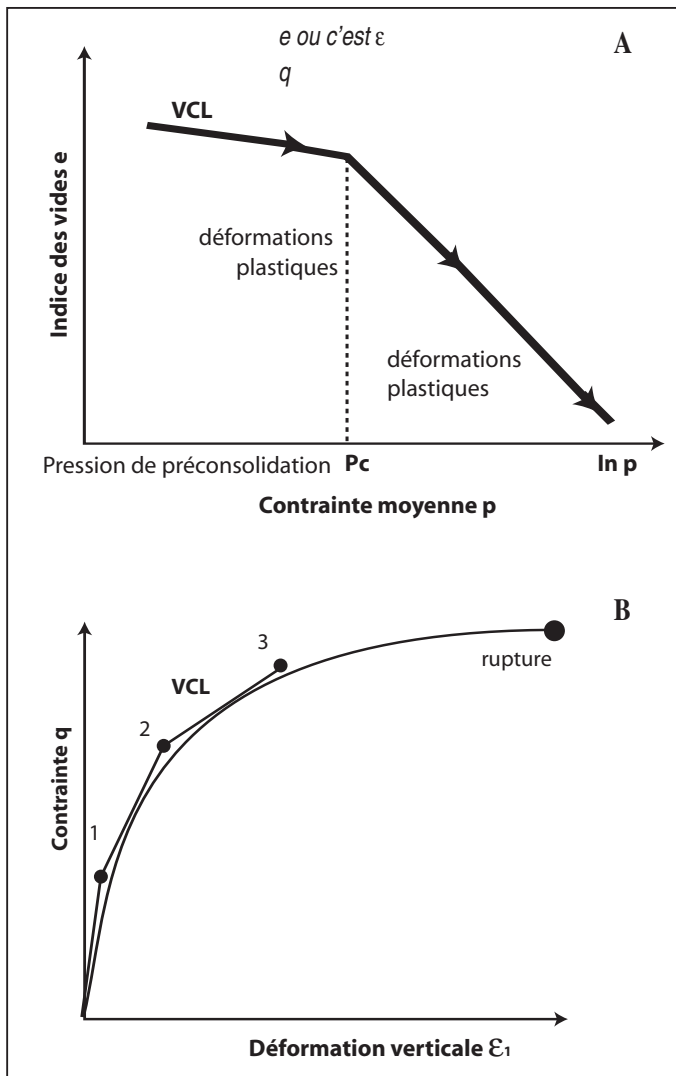
## Les modèles pseudo-analytiques

Les modèles pseudo-analytiques sont basés sur l'approche de Söhne (1953) qui considère uniquement les composantes verticales  $\sigma_z$  des contraintes. Leur répartition à l'interface de contact pneumatique/sol est inhomogène. Dans cette approche, on suppose que les contraintes  $\sigma_z$  à la surface du sol se répartissent selon une parabole dont le degré dépend de la teneur en eau du sol. Pour un sol très humide, la distribution est une parabole du second degré. Pour un sol sec, elle est de degré 16. Le cas extrême est un sol très sec que l'on peut assimiler à un milieu très peu déformable élastique, la contrainte est alors homogène (figure 1). Söhne (1953) considère dans tous les cas que l'aire de contact est de forme elliptique.

Le calcul de la propagation des contraintes dans le sol repose sur la solution exacte pour une force ponctuelle  $P$  appliquée à la surface d'un sol supposé parfaitement élastique, isotrope et semi-infi-

**Figure 2** - Modèles de comportement mécanique d'un sol à partir des relations entre contraintes et déformations mesurées par des essais mécaniques de laboratoire sur des volumes de sol élémentaires. La figure 2a représente le modèle logarithmique qui décrit les déformations élastiques et plastiques du sol à partir de la relation entre l'indice des vides  $e$  et la pression moyenne  $p$ . La figure 2b représente le modèle pseudo-élastique qui décrit le sol par analogie à la théorie élastique à l'aide de la relation entre contrainte déviatorique  $q$  et déformation verticale  $\varepsilon_1$ .

**Figure 2** - Models for soil mechanics behaviour established from the stress-strain relationships measured on elementary volume by using laboratory mechanical tests. The figure 2a represents the relation between the void ratio  $e$  and the mean pressure  $p$  of the logarithmic model that describes the elastic and plastic deformation of the soil. The figure 2b represents the relation between the deviatoric stress  $q$  and the vertical strain  $\varepsilon_1$  of the pseudo-elastic model which represents the soil behaviour by analogy with the elastic theory.



ni (Boussinesq, 1885). Pour tenir compte du caractère plastique des déformations d'un sol, cette solution a été pondérée par un facteur empirique  $\xi$  dit de concentration des contraintes (Fröhlich, 1934) dont la valeur varie de 4 à 6 selon la masse volumique et la teneur en eau du sol. Le calcul de Söhne (1953) consiste à décomposer l'action du pneumatique en une somme de forces ponctuelles sur toute la surface de contact. La contrainte en un point du sol est alors la résultante de chacune de ces forces (figure 1).

Le calcul de Söhne fournit un profil 2D des contraintes verticales dans le sol. On peut estimer l'augmentation de masse volumique du sol que ces contraintes provoquent en introduisant un module de comportement mécanique de type logarithmique (Gupta et Raper, 1994). Le modèle logarithmique est illustré figure 2a. Il décrit les déformations du sol par un régime de déformations élastiques à faibles contraintes et un régime plastique au-delà de la pression de préconsolidation  $p_c$  où apparaissent des déformations plus importantes et irréversibles qui suivent la VCL (« Virgin Curve Line »). L'avantage des modèles pseudo-analytiques est qu'ils nécessitent peu de paramètres que l'on peut eux-mêmes faire dépendre de l'état physique du sol (l'état hydrique ou structural).

Les modèles pseudo-analytiques ont été évalués à l'aide d'essais de roulement avec des engins agricoles sur des parcelles cultivées pour une large gamme de sol (limon, craie...) et d'état du sol (hydrique et structural) (Défossez et Richard, 2002). Les contraintes moyennes appliquées en surface étaient importantes (jusqu'à 320 kPa), de sorte que l'augmentation de masse volumique pouvait atteindre jusqu'à 0,38 Mg m<sup>-3</sup>. Évalués sur la base d'une comparaison entre un profil 1 D de masse volumique simulé et mesuré après compactage, ces modèles s'avèrent satisfaisants pour prévoir le compactage de couches de sol de structure homogène: la différence entre les simulations et les observations est de l'ordre de 0,09 Mg.m<sup>-3</sup> pour des couches de sol de structure homogène avant le passage de l'engin (sol récemment labouré avec peu de mottes). Les écarts entre le modèle et les observations s'accroissent pour des profils de sol présentant initialement beaucoup de mottes.

## Les modèles FEM

Les modèles FEM reposent sur la méthode des éléments finis (Zienkiewics, 1971). Contrairement aux modèles pseudo-analytiques, les modèles FEM estiment les déformations verticales ou volumiques mais également les déformations de cisaillement du

sol. Les modèles FEM de la littérature diffèrent selon le module de comportement mécanique qu'ils utilisent : pseudo-élastique Cam-clay, ou hydro-mécanique (Défossez et Richard, 2002). Le module pseudo-élastique tient compte du caractère non-linéaire des déformations d'un sol agricole (*figure 2b*). En théorie élastique, les relations contrainte-déformation sont linéaires et font intervenir des modules élastiques constants caractéristiques de la résistance mécanique du matériau. Le module pseudo-élastique reprend le formalisme de la théorie élastique mais il introduit des modules dont la valeur dépend du niveau de contrainte : le module dit tangent  $E_t$  qui relie la contrainte déviatorique  $q$  et la déformation verticale  $\varepsilon_v$  diminue avec  $q$  (*figure 2b*). Le modèle Cam-clay est basé sur la théorie de l'état critique (par exemple Atkinson et Bransby, 1978). Cette théorie tridimensionnelle unifie différents aspects du comportement mécanique du sol mis en évidence expérimentalement : des déformations réversibles (élastiques), des déformations permanentes (plastiques), des seuils de plasticité et l'existence d'un état critique du sol pour lequel les déformations de cisaillement s'effectuent sans changement de volume. La dernière génération de modèles couple les processus mécaniques et hydriques dans des sols non saturés. Basés sur la théorie des contraintes effectives (Bishop, 1959), ils décrivent les interactions entre les déformations du sol résultant des contraintes mécaniques et les transferts d'eau du sol (Horn *et al.*, 1998; Richards, 1992). Bien que les modèles FEM permettent de traiter la distribution inhomogène des contraintes appliquées en surface par un pneumatique, peu d'auteurs ont simulé des distributions de contraintes verticales inhomogènes (Gysi *et al.*, 2001), la plupart considèrent la contrainte verticale comme uniforme à la surface du sol.

Jusqu'à présent, les modèles FEM ont été testés pour une gamme limitée de conditions expérimentales (Défossez et Richard, 2002) : les sols étaient essentiellement des sables, les pressions moyennes au sol étaient au maximum de 240 kPa et les intensités de compactage observées étaient relativement faibles ( $0,08 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Ces modèles étant plus complexes que les modèles pseudo-analytiques, différents tests intermédiaires ont été menés préalablement aux tests de roulement en parcelles cultivées. Ainsi, pour des essais de charges contrôlées en laboratoire sur des boîtes de sol de l'ordre du  $\text{m}^3$ , les modèles pseudo-élastiques et Cam-clay semblent satisfaisants. Par exemple, pour la masse volumique, l'écart entre simulations et observations est en moyenne de  $0,08 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  pour des tests de laboratoire. Ces écarts sont comparables à ceux obtenus avec les modèles pseudo-analytiques pour des sols à structure homogène. L'application des modèles pseudo-élastiques et Cam-clay à l'échelle de la parcelle n'a été que partiellement étudiée : seules de faibles intensités de tassement ont été examinées (Défossez et Richard, 2002). Les premiers tests au champ d'un modèle hydro-mécanique donnent des résultats incompatibles avec les observations qui remettent en cause le module de comportement mécanique (Défossez et Richard,

2002).

## Conclusion

Actuellement, les modèles FEM pseudo-élastiques et Cam-clay semblent bien adaptés pour simuler le compactage des sols agricoles. Contrairement aux modèles pseudo-analytiques, ils doivent permettre de traiter des couches de sols dont la structure est hétérogène. Cependant, il est nécessaire au préalable de les évaluer en grandeur réelle pour des situations où le compactage est réellement préjudiciable. Les modèles pseudo-analytiques quant à eux ont été évalués pour une large gamme de conditions expérimentales et donnent des estimations des tassements satisfaisantes dans la limite des sols de structure homogène (Défossez et Richard, 2002).

## PRÉVENTION DU COMPACTAGE : UN EXEMPLE D'APPLICATION AVEC LE MODÈLE COMPSOIL

Le modèle COMPSOIL proposé par O'Sullivan *et al.* (1999) est un modèle pseudo-analytique. Son évaluation est présentée dans O'Sullivan *et al.* (1999) et Défossez *et al.* (2003) : COMPSOIL fournit une bonne estimation de la valeur moyenne de la masse volumique du sol (écart maximum entre simulation et expérience de  $0,09 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Par contre des différences plus importantes entre simulations et mesures ont été obtenues pour la prévision des ornières et la forme du profil de masse volumique avec la profondeur. La gamme des conditions pour lesquelles le modèle donne ces résultats inclut différents types de sols (limons, craie), des teneurs en eau du sol variées ( $0,18$  à  $0,27 \text{ g g}^{-1}$ ), des pressions moyennes au sol allant de 40 à 100 kPa et des intensités maximales de compactage de  $0,38 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Nous avons réalisé deux types d'application du modèle à la prévention du compactage. La première concerne le choix des équipements d'un chantier de récolte de betterave sucrière, la seconde, le choix du jour d'intervention pour préparer le lit de semence au printemps en fonction la teneur en eau.

## Choix des équipements : simulation de deux chantiers de récoltes de betterave

La récolte de betterave est une opération culturale présentant un risque de compactage élevé (Boizard *et al.*, 2002) : les chantiers de récolte se déroulent à l'automne avec des équipements lourds. Les dates de récoltes sont généralement fixées par la sucrerie, ce qui laisse peu de latitude à l'agriculteur pour choisir un jour d'intervention où les teneurs en eau du sol sont peu dégradantes pour la structure. De plus, dans le contexte actuel de réduction des charges de mécanisation et de main d'œuvre, les agriculteurs ont tendance à s'équiper d'arracheuses intégrales qui remplacent le système traditionnel composé d'une automotrice arracheuse-chargeuse suivie d'un tracteur et de sa remorque. Les arracheuses intégrales sont équi-

**Tableau 2 - Caractéristiques des sols utilisés pour les simulations****Table 2 - Soils characteristics used for simulation of soil compaction**

	Limons	Craie
<b>Texture</b>		
Nomenclature FAO	Luvisol Orthique	Rendzina
Argile (g.kg <sup>-1</sup> )	169	95
Limon (g.kg <sup>-1</sup> )	757	150
Sable (g.kg <sup>-1</sup> )	49	28
Matières organiques (g.kg <sup>-1</sup> )	26,7	36
CaCO <sub>3</sub> (g.kg <sup>-1</sup> )	3	690
<b>Propriétés physiques<sup>1</sup></b>		
Teneur en eau massique à $\psi=-40$ kPa <sup>2</sup>	0,261 gg <sup>-1</sup>	0,246 gg <sup>-1</sup>
Teneur en eau massique à $\psi=-100$ kPa	0,239 gg <sup>-1</sup>	0,219 gg <sup>-1</sup>
Teneur en eau massique à $\psi=-300$ kPa	0,219 gg <sup>-1</sup>	0,201 gg <sup>-1</sup>
Densité texturale <sup>3</sup> à $\psi=-100$ kPa	$\rho_t = 1,63 \text{ Mg.m}^{-3}$	$\rho_t = 1,67 \text{ Mg.m}^{-3}$
Masse volumique seuil <sup>4</sup> à $e_s = 0.27$	$\rho_d^{\Delta} = 1,40 \text{ Mg.m}^{-3}$	$\rho_d^{\Delta} = 1,43 \text{ Mg.m}^{-3}$

(1) Ces caractéristiques ont été déterminées à partir des courbes retrait – gonflement (Sillon et al., 2003)

(2) 1 m d'eau équivaut à 10 kPa

(3) D'après l'analyse du système de porosité proposée par Stengel (1979), l'espace poral peut être décomposé en (i) espace poral textural lié à la nature des particules élémentaires qui le compose et à la teneur en eau du sol et en (ii) espace poral structural lié à l'histoire du matériau (travail du sol, agent climatique, activité biologique).

(4) Seuil qui correspond à un indice des vides structural  $e_s = 0.27$  en dessous duquel le sol est majoritairement dans un état interne "delta" c'est à dire sans porosité visible à l'œil nu (Manichon, 1987).

**Tableau 3 - Caractéristiques des équipements utilisés dans les simulations****Table 3 - Equipment characteristics used for simulation of soil compaction**

Chantier	Engin	Poids total de l'engin chargé (t)	Nombre d'essieux	Caractéristiques des pneumatiques par essieu			
				Marque	Nomenclature	Dimensions diamètre / largeur (mm)	Pression de gonflage (kPa)
<b>CHANTIER DE RÉCOLTE DE BETTERAVE</b>							
<b>Intégral</b>	« Ropa »	55	3	Michelin	800_65 R 32	1853/800	190
				Michelin	1050/50 R 32 TL	1863/1080	200
				Michelin	1050/50 R 32 TL	1863 / 1080	200
<b>Conventionnel</b>	Automotrice Matrot	15.28	2	Kleber	650/75 R 35	1852 / 650	250
				Michelin	12.4 R 36	1450/315	250
	Tracteur	6.5	2	Kleber	480/70R28	1420/484	200
				Michelin	600/65R38 TL	1745/591	200
	Remorque	22	2	Michelin	550_65 R 24	1312/550	200
				Michelin	550_65 R 24	1312/550	200
<b>CHANTIER DE PRÉPARATION DE LIT DE SEMENCE</b>							
	Tracteur	5.5	2	Michelin	19.5LR24	1320/495	60
				Michelin	650/75R32	1789/645	60

pées de pneumatiques larges qui permettent de supporter les charges très importantes de ces engins (55 t). Nous avons utilisé le modèle COMPSOIL pour comparer deux types de chantiers, l'un composé d'une arracheuse intégrale et l'autre d'un système traditionnel.

Des simulations ont été réalisées pour une parcelle de sol de limon (*tableau 2*) pour les deux chantiers présentés *tableau 3*. On a simulé le passage successif des roues en un même point de la parcelle à l'aide de COMPSOIL en introduisant un état initial du sol observé effectivement sur cette parcelle (Défossez *et al.*, 2003), à savoir un profil de masse volumique initial  $\rho_d(z)$  dont la valeur moyenne sur l'horizon 0-30 cm est  $1,2 \text{ Mg.m}^{-3}$  et un profil de teneur en eau massique  $w(z)$  dont la valeur moyenne sur l'horizon 0-30 cm est  $0,23 \text{ g.g}^{-1}$ . Les paramètres mécaniques du sol de limon ont été mesurés en fonction de la teneur en eau du sol par des essais triaxiaux (Défossez *et al.*, 2003). Le modèle estime les contraintes en surface et l'aire de contact à partir des caractéristiques des engins, puis les contraintes selon l'axe central du pneu. Il calcule alors le profil de masse volumique après compactage en fonction de la valeur de la contrainte et des paramètres mécaniques à chaque profondeur. La *figure 3a* présente une comparaison entre les simulations obtenues pour les deux chantiers: l'arracheuse intégrale provoque un tassement du sol plus important que le système conventionnel ( $+ 0,062 \text{ Mg.m}^{-3}$ ). D'après le modèle, la pression verticale moyenne maximale appliquée à l'interface pneumatique-sol est équivalente pour les deux systèmes (112 kPa pour l'arracheuse intégrale, 113 kPa pour le système conventionnel): l'arracheuse intégrale applique des charges par pneumatique plus importantes, de l'ordre de 9,2 t contre environ 5,5 t pour la remorque conventionnelle, mais en contre partie cette charge s'applique sur une plus grande surface de contact en rapport avec les dimensions des pneumatiques. Cependant le modèle tient compte de la répartition de la pression à l'interface sol-pneumatique qui est maximale au centre du pneu (*figure 1*), de sorte que, bien que les pressions en moyenne soient comparables dans les deux systèmes, la pression qui s'exerce au centre du pneu est, elle, plus importante pour l'arracheuse intégrale. Ainsi, d'après le modèle, la contrainte verticale sous la surface (à 2 cm de profondeur) à l'aplomb de la roue est au maximum de 200 kPa pour le système intégral et de 180 kPa pour le système conventionnel. Un raisonnement basé uniquement sur la pression moyenne au sol ne suffit pas pour comparer les deux types de chantiers en terme de risque de compactage, il faut également prendre en compte la répartition inhomogène des pressions à l'interface sol/pneumatique. Le modèle COMPSOIL permet également d'analyser l'effet de chaque train de pneumatiques: la *figure 3b* montre que la remorque induit un tassement important que l'on pourrait chercher à réduire, par exemple en équipant la remorque de pneumatiques plus larges. Pour une analyse plus fine des deux chantiers, il faudrait notamment introduire la répartition de la charge totale de l'engin entre les différents trains de pneumatiques et tenir compte du report de la charge de la remorque sur le tracteur. L'analyse de sensibilité du modèle a montré qu'une erreur de 10 %

sur la répartition des charges entre les différents trains de pneumatiques induit une incertitude sur les valeurs simulées de l'ordre de  $\pm 0,015 \text{ Mg.m}^{-3}$ . Ces simulations illustrent ainsi l'aide que le modèle COMPSOIL peut fournir en matière de choix d'équipement.

## Choix des jours d'intervention : simulations en fonction de l'état hydrique du sol

Les chantiers de préparation de lit de semence peuvent engendrer des tassements de la couche travaillée sous-jacente au lit de semence (Boizard *et al.*, 2002). Les opérations de fragmentation du lit des semences ne nécessitent pas de lourds engins. Les risques de compactage sont en fait principalement liés à la teneur en eau du sol qui rend les sols plus ou moins déformables. Ainsi, après une période pluvieuse au printemps, le ressuyage du sol, c'est-à-dire l'évolution de la teneur en eau du sol, joue un rôle important dans le choix des dates d'intervention dans les parcelles. Après une pluie, le délai d'intervention est lié à l'évolution journalière du profil de teneur en eau du sol. Celle-ci découle des propriétés hydrodynamiques du sol qui déterminent l'évolution du potentiel hydrique  $\psi$  du sol en fonction du temps:  $\psi = 0$  lorsque le sol est saturé,  $\psi$  devient négatif et décroît à mesure que le sol se dessèche (Sillon *et al.*, 2003). À l'aide du modèle COMPSOIL, nous avons analysé l'effet du type de sol sur le délai d'intervention déterminé selon le risque de compactage.

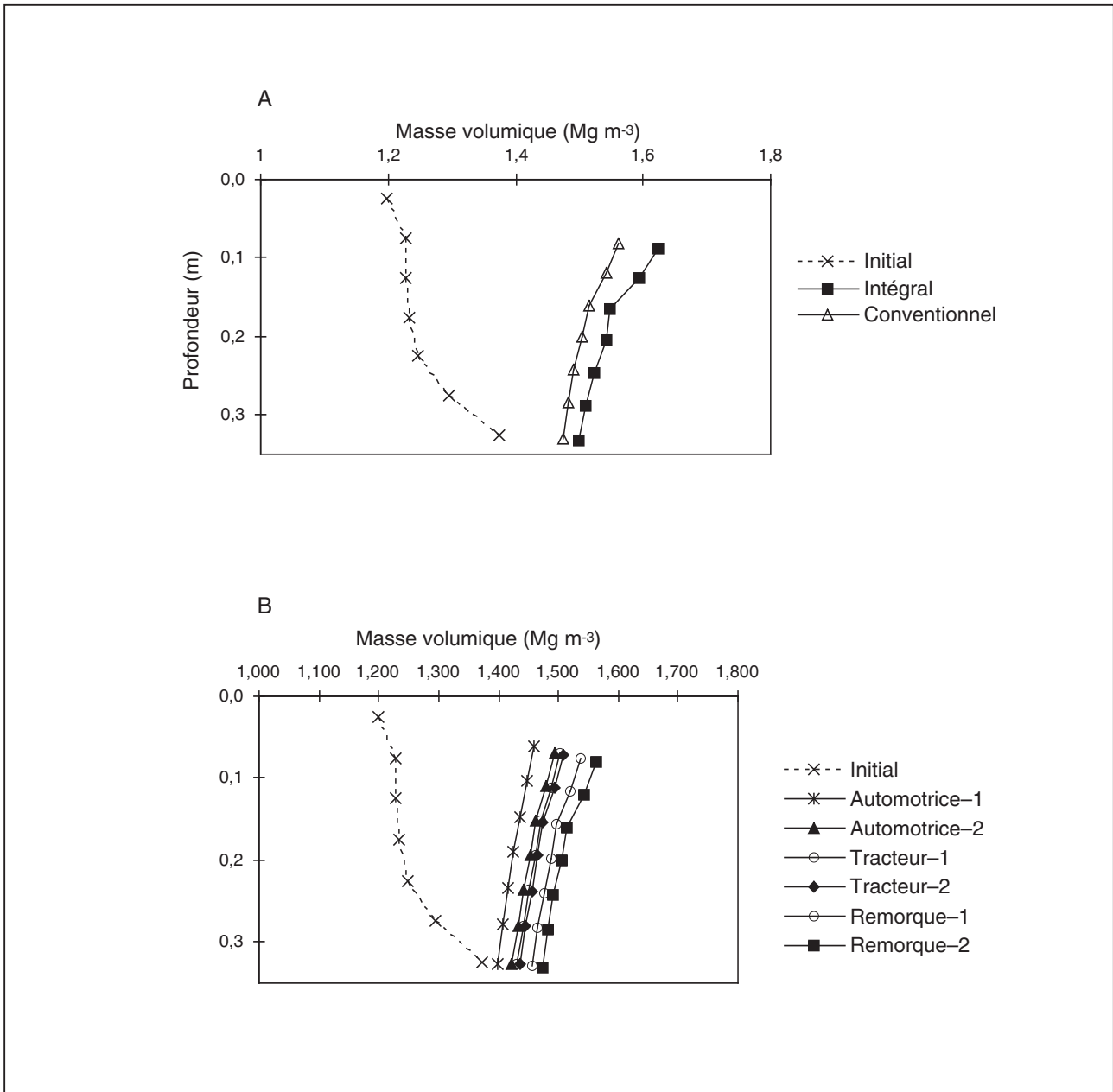
Des simulations de roulement d'engin ont été réalisées pour deux types de sols, un limon et un sol de craie, pour trois états hydriques du sol au cours d'une période de ressuyage de la couche travaillée:  $\psi = -40, -100$  puis  $-300 \text{ kPa}$  (*tableau 1*). Les simulations ont été réalisées pour des profils initiaux de masse volumique dont la valeur moyenne sur l'horizon 0-30 cm est  $1,04 \text{ Mg.m}^{-3}$  (Défossez *et al.*, 2003). Les paramètres mécaniques de ces deux sols ont été mesurés par des essais triaxiaux pour les différentes teneurs en eau correspondant aux potentiels hydriques  $-40, -100$  puis  $-300 \text{ kPa}$  comme indiqué sur le *tableau 2* (Défossez *et al.*, 2003). Les caractéristiques des équipements étaient celles d'un chantier de préparation de lit de semence (*tableau 3*). On a considéré que le compactage était sévère lorsque la structure de la couche travaillée tassée atteignait un état interne « delta » pour lequel on n'observe plus de porosité à l'œil nu (Manichon, 1987). Dans ce cas, des études ont montré que l'indice structural du sol est proche de 0,2 (Roger-Estrade *et al.*, 2003), ce qui correspond pour le limon et le sol de craie à des masses volumiques respectivement de  $1,40$  et  $1,43 \text{ Mg.m}^{-3}$  (*tableau 2*). Le *tableau 4* présente les valeurs moyennes de masse volumique simulées de la couche tassée pour les deux types de sols et selon le potentiel hydrique du sol. On constate que le risque de compactage diffère selon le type de sol: dans le sol de craie il est possible d'intervenir dès que le potentiel hydrique du sol est à  $-40 \text{ kPa}$  ( $\rho_d < 1,43 \text{ Mg.m}^{-3}$ ) tandis que dans le limon il faudra attendre qu'il soit à  $-300 \text{ kPa}$  pour éviter un compactage sévère du sol ( $\rho_d < 1,4 \text{ Mg.m}^{-3}$ ).

Ces simulations illustrent les possibilités qu'offre la modélisation du compactage pour prévenir une dégradation du sol lors des chan-



**Figure 3** - Simulations par le modèle COMPSOIL du compactage lors de récolte de betterave en sol de limon ( $w = 0.23 \text{ gg}^{-1}$ ). La figure 3a présente une comparaison entre deux chantiers de récoltes, l'un conventionnel composé d'une automotrice de 15 t et d'une remorque de 22 t tractée et l'autre d'une arracheuse intégrale de 55 t. La figure 3b présente l'effet de chaque train de pneumatiques du chantier conventionnel.

**Figure 3** - Simulations with COMPSOIL model for soil compaction at sugar beet harvesting in loess soil ( $w = 0.23 \text{ gg}^{-1}$ ). The figure 3a compares two harvesting equipment, the first usual one is composed by a tractor of 15 t and a trailer of 22 t, and the second one is an integral harvester of 55 t. The figure 3b presents the effects of each wheel/axle unit for the usual equipment.



**Tableau 4** - Simulations de compactage selon les conditions hydriques du sol pour deux types de sols**Table 4** - Soil compaction simulations as function of the soil hydraulic conditions for two soils

Potentiel de l'eau dans le sol	Masse volumique simulée de la couche de sol (0-30 cm) après compactage <sup>1</sup>	
	Limon	Craie
-40 kPa	$\rho_b = 1,415 \text{ Mg m}^{-3}$	$\rho_b = 1,362 \text{ Mg m}^{-3}$
-100 kPa	$\rho_b = 1,4 \text{ Mg m}^{-3}$	$\rho_b = 1,297 \text{ Mg m}^{-3}$
-300 kPa	$\rho_b = 1,395 \text{ Mg m}^{-3}$	$\rho_b = 1,272 \text{ Mg m}^{-3}$

(1) moyenne des valeurs simulées par le modèle COMPSOIL pour la couche de sol 0-30 cm

tiers de préparation de lit de semence selon les conditions climatiques. Cependant, pour quantifier le délai en terme de nombre de jours, il faudrait maintenant estimer l'évolution du potentiel hydrique du sol en fonction du temps à partir des propriétés hydrodynamiques, qui dépendent du type de sol et de sa structure, et des conditions climatiques (Sillon *et al.*, 2003).

## CONCLUSIONS

Prévoir l'intensité du compactage d'un sol sous le passage d'un engin agricole implique de modéliser (i) les contraintes appliquées par l'engin à la surface du sol et leur propagation dans le sol, (ii) la résistance mécanique de la couche de sol à l'aide des relations contrainte-déformation. Parmi les modèles actuels, les modèles pseudo-analytiques ont été évalués pour une large gamme de conditions au champ. Pour des couches de sols homogènes jusqu'à 50 cm, ils permettent de prévoir des intensités de compactage de l'ordre de  $0,3 \text{ Mg m}^{-3}$  avec une incertitude de l'ordre de  $0,05 \text{ Mg m}^{-3}$ . Les modèles FEM sont plus adaptés à des sols de structure hétérogène. Cependant ils n'ont pas été testés jusqu'à présent en grandeur réelle pour des intensités de compactage préjudiciables pour la production végétale et l'environnement. La modélisation du compactage est un outil permettant d'apprécier le risque de compactage. On pourrait ainsi l'utiliser pour choisir des engins ou des conditions physiques du sol qui favori-

## BIBLIOGRAPHIE

- Atkinson J.H., Bransby P.L., 1978 - The mechanics of soils. An Introduction to Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill, London.
- Bardet J.P., 1997 - Experimental soil mechanics, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Bishop A.W., 1959 - The principle of effective stress. Teknisk Ukeblad 106/39, pp. 859-863.
- Boizard H. Richard G., Roger-Estrade J., Dürr C., Boiffin J., 2002 - Cumulative effect of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France, Soil Till. Res., 64, pp. 149-164
- Boussinesq J., 1885 - Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Gauthier-Villars, Paris, France, 30 pp.
- Défossez P., Richard G., 2002 - Compaction of tilled topsoil due to traffic: a review of models tested in field conditions. Soil Till. Res. 67, pp. 41-64.
- Défossez P., Richard G., Boizard H., O'Sullivan M., 2003 - Modelling change in soil compaction due to traffic as function of soil water content, Geoderma, 116, pp. 89-105.
- Dürr C., Aubertot J.N., 2000 - Emergence of seedling of sugar beet (*Beta Vulgaris* L.) as affected by aggregate size, roughness and position of aggregates in the seedbed. Plant Soil 219, pp. 211-220.
- Fröhlich O. K., 1934 - Druckverteilung im Baugrunde. (Distribution des contraintes dans les sols sous fondation). Springer, Wien, Austria, 178 pp. (en allemand).
- Gupta S.C., Allmaras R.R., 1987 - Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. Adv. in Soil Sci. 6, pp. 66-100.
- Gupta S.C., Raper R. L., 1994 - Prediction of soil compaction under vehicle. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C., (Eds.), Soil Compaction in Crop Production, Developments in Angicultural Engineering, 11, Elsevier Amsterdam, pp. 53-71.
- Gysi M., Maeder V., Weisskopf P., 2001 - Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles Trans. ASAE 44 (6), pp. 1385-1389.
- Horn R., Richards B.G., Gräsele W., Baumgartl T., Wiermann C., 1998 - Theoretical principles for modelling soil strength and wheeling effects - a review -. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 161(4), pp. 333-346.
- 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, pp. 39-52.
- O'Sullivan M.F., Henshall J.K., Dicson J.W., 1999 - A simplified method for estimating soil compaction, Soil Till. Res. 49, pp. 325-335.
- O'Sullivan M.F., Simota C., 1995 - Modelling the environmental impacts of soil compaction: a review. Soil Till. Res. 35, pp. 69-84.
- Renault P., Stengel, P., 1994 - Modelling oxygen diffusion in aggregated soils. I. Anareobiosis inside the aggregates. Soil Sci. Soc. Am. J. 58, pp. 1017-1023.
- Richards B.G., 1992 - Modelling interactive load-deformation and flow processes in soils, including unsaturated and swelling soils. Proc. 6th. Aust-NZ Conf.

- paction : a review. *Soil Till. Res.* 35, pp. 69-84.
- Renault P., Stengel, P., 1994 - Modelling oxygen diffusion in aggregated soils. I. Anareobiosis inside the aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, pp. 1017-1023.
- Richards B.G., 1992 - Modelling interactive load-deformation and flow processes in soils, including unsaturated and swelling soils. *Proc. 6th. Aust-NZ Conf. On Geomechanics*, pp. 18-17.
- Roger-Estrade J., Richard G., Caneill J., Boizard H., Coquet Y., Défossez P., Manichon H., 2003 - Morphological characterisation of soil structure in tilled fields. From a diagnostic method to the modelling of structural changes over time, *Soil Till. Res.*, sous presse.
- Schafer R.L., Bailey, A.C., Jhonson, C.E., Raper, R.L., 1991 - A rationale for modelling soil compaction behaviour: an engineering mechanics approach. *Trans. ASAE* 34 (4), pp. 1609-1617.
- Schlafer R.L., Johnson, C.E., Koolen, A.J., Gupta, S.C., Horn, R., 1992 - Future research needs in soil compaction. *Trans. ASAE* 35(6), pp. 1761-1770.
- Sillon J. F., Richard, G., Cousin, I., 2003 - Tillage and traffic effects on soil hydraulic properties and evaporation, *Geoderma*, 116, pp. 29-46.
- Soane B.D., Blackwell, P.S., Dickson, J.W., Painter, D.J., 1981a - Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil Till. Res.* 1, pp. 207-237.
- Soane B.D., Blackwell, P.S., Dickson, J.W., Painter, D.J., 1981b - Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Compaction under tyres and other running gear. *Soil Till. Res.* 1, pp. 373-400.
- Soane B.D., van Ouwerkerk, C., 1994 - Soil Compaction Problems in World Agriculture. *In: B.D. Soane, C. van Ouwerkerk (Eds.), Soil Compaction and Crop Production, Developments in Agricultural Engineering*, 11, Elsevier, Amsterdam, pp.1-21.
- Söhne W., 1953 - Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. (Distribution des contraintes et des déformations du sol sous la roue d'un engin agricole). *Grundlagen Landtechnik* 5, pp. 373-400 (en allemand).
- Stengel P., 1979 - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*. *Annales Agronomiques (FRA)* 30 (1), pp. 27-51.
- Tardieu F., 1988 - Analysis of the spatial variability of maize root density. I Effect of wheels compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant Soil* 107, pp. 259-266.
- Zienkiewics O. C., 1971 - *The finite element method in engineering science*. McGraw-Hill, London, 285 p.

