

Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement: principaux résultats du projet GESSOL-ADD DST

J. Roger-Estrade_{(1,2)*}, V. Adamiade₍₃₎, D. Arrouays₍₄₎, E. Baranger₍₅₎, M. Bartoli₍₆₎, H. Boizard₍₃₎, A. Brêthes₍₇₎, N. Brisson₍₈₎, Y. Capowiez₍₉₎, A. Chanzy₍₁₀₎, V. Chaplain₍₁₁₎, I. Cousin₍₁₂₎, P. Cosenza₍₁₃₎, K. Cui₍₃₎, YJ. Cui₍₁₄₎, S. Debuisson₍₁₅₎, P. Défossez₍₃₎, F. Gérard₍₁₆₎, P.-A. Jayet₍₅₎, J. Labreuche₍₁₇₎, C. Le Bas₍₄₎, Y. Lefèvre₍₁₆₎, J. Léonard₍₃₎, E. Lévêque₍₁₈₎, F. Lévêque₍₁₉₎, B. Mary₍₃₎, M. Mummen₍₁₀₎, J. Ranger₍₁₆₎, A. Tabbagh₍₁₃₎, J. Tabbagh₍₁₃₎, A.-M. Tang₍₁₄₎, D. Tessier₍₁₁₎ et G. Richard₍₁₂₎

- 1) AgroParisTech, Département SIAFEE, F-78850 Thiverval-Grignon - France
 - 2) INRA - UMR 0211 Agronomie - BP 01 - 78850 Thiverval-Grignon - France
 - 3) INRA - US 1158 Agro-Impact - Pôle du Griffon - 180, rue Pierre-Gilles de Gennes - 02000 Barenton-Bugny - France
 - 4) INRA - US 1106 INFOSOL -2163, Avenue de la Pomme de Pin - CS 40001 Ardon - 45075 Orléans Cedex 2 - France
 - 5) INRA - UMR 0210 Economie Publique - Avenue Lucien Brétignières- BP 01 - 78850 Thiverval-Grignon - France
 - 6) ONF - 2, avenue St Mandé 75012 Paris - France
 - 7) ONF - Parc technologique Orléans Charbonnière -100, boulevard de la Salle - BP 18 - 45760 Boigny-sur-Bionne - France
 - 8) INRA-US 1116 AgroClim - Domaine Saint-Paul - Site Agroparc - 84914 Avignon Cedex 9 - France
 - 9) INRA-UR 1115 PSH Plantes et Systèmes de Culture Horticoles - Domaine Saint-Paul - Site Agroparc 84914 Avignon Cedex 9 France
 - 10) INRA-UMR 1114 EMMAH Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes - Domaine Saint-Paul Site Agroparc 84914 Avignon Cedex 9 - France
 - 11) INRA-UR 0251 PESSAC Physico-chimie et Ecotoxicologie des Sols d'Agrosystèmes Contaminés - RD 10 78026 Versailles Cedex - France
 - 12) INRA-UR 272 Science du Sol -2163, Avenue de la Pomme de Pin - CS 40001 Ardon - 45075 Orléans Cedex 2 - France
 - 13) UPMC - UMR 7619 SISYPHE - 4 place Jussieu - 75252 Paris Cedex 05
 - 14) CERMES - Laboratoire NAVIER, UMR 8205 ENPC-LCPC - Cité Descartes - 6-8, avenue Blaise Pascal, Champs-sur-Marne, 77455 Marne-la-Vallée Cedex - France
 - 15) CIVC - 5, rue Henri Martin, BP 135 - 51204 Epernay Cedex - France
 - 16) INRA-UR 1138 BEF Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers - Centre de Nancy - 54280 Champenoux - France
 - 17) ARVALIS Institut du Végétal - Station Expérimentale - 91720 Boigneville - France
 - 18) ITB - 45 rue de Naples 75008 Paris - France
 - 19) Université de la Rochelle, ILE, UMR 6250, 2 rue Olympe de Gouges, 17 000 La Rochelle- France
- * Auteur correspondant : estrade@grignon.inra.fr

RÉSUMÉ

La dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement lors des passages d'engins est une préoccupation importante des acteurs de l'agriculture et de la forêt. Mais au-delà de ce cercle, elle concerne également tous ceux qui se préoccupent des conséquences environnementales de l'agriculture et de la gestion forestière. En effet, le tassement des sols modifie a des conséquences lourdes sur plusieurs processus tels que l'érosion hydrique, la dénitrification, le stockage du carbone, la préservation de la biodiversité, la production. Dans ce cadre, le projet DST (Dégradation physique des Sols agricoles et forestiers liée au Tassement) proposait cinq volets de recherche: impact, prévision, prévention, suivi et cartographie du tassement en France métropolitaine. Il a reposé sur l'utilisation de modèles de tassement des sols et de fonctionnement du système sol/plante pour étudier les conséquences sur les cultures et l'environnement, *via* la modification des propriétés (stockage, transfert, mécaniques) des sols. Ce projet transversal, associant des laboratoires de recherche travaillant en agriculture, en géophysique ou en génie civil et des organismes professionnels, s'est aussi appuyé sur des expérimentations variées, en laboratoire et sur le terrain. Les principaux résultats sont présentés dans cet article. Ils concernent: (i) l'impact du tassement, avec la mise en évidence d'un seuil d'indice des vides en sol limoneux (0,15 m³.m³ dans les sols limoneux), au-delà duquel les performances des cultures et les propriétés hydrodynamiques sont à coup sûr affectées, (ii) la modélisation, le projet ayant débouché sur la mise au point d'un modèle 2-D de prévision de la déformation des sols, (iii) le suivi, avec l'évaluation de méthodes géophysiques, non destructrices, permettant la cartographie des zones tassées, (iv) la prévention, à travers le développement d'un outil de prévision de l'humidité du sol et des jours disponibles et, (v) la cartographie des zones à risques en France.

Mots clés

Sol, tassement, modélisation, prévention, cartographie, conséquences agri-environnementales, méthodes géophysiques.

SUMMARY

PHYSICAL DEGRADATION OF AGRICULTURAL AND FOREST SOILS DUE TO COMPACTION

Physical degradation of agricultural and forest soils due to compaction is an important concern for the actors in agriculture, forest and environment. Many questions are still pending on the importance of this degradation, the evaluation of its impact on environment, the effect of changes of climate and practices, its natural remediation. The DST (Agricultural and Forest Soil Degradation induced by Compaction?) project has proposed a research action on soil compaction in metropolitan France in order to: quantify the impacts of soil compaction on important soil environmental functions; identify the conditions leading to compaction; prevent the occurrence of these conditions; monitor the evolution of soil structure after compaction. The project was structured in five working packages: impact, prediction, prevention, follow-up and cartography. It was based on modelling (hydrology, soil deformation, soil-crop interactions models) to study the occurrence of compaction and its impacts on crop growth and the environment. It also aimed at developing non-destructive methods to monitor soil structure deformation. The project associated research laboratories working in agriculture, geophysics or civil engineering and extension services members and was also based on field and laboratory experimentations, performed in various conditions (field crops, vineyards, forests). Mains results concerned: (i) impacts of compaction, as we demonstrated the existence of a threshold value for the structural void ratio (0,15 m³.m³ in loamy soils) beyond which crop performances and hydrological properties are systematically affected; (ii) modelling, with a 2-D model of soil deformation; (iii) compaction assessment, based on non-destructive geophysical methods; (iv) prevention of compaction, with a predictive model of soil water content and (v) mapping of compaction risks in France, based on the knowledge acquired during the project.

Key-words

Soil compaction, mapping, monitoring, modelling, geophysical methods, environmental impact.

RESUMEN

EL PROYECTO GESSOL DST: DEGRADACIÓN FÍSICA DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS Y FORESTALES LIGADA A LA COMPACTACIÓN

*La degradación física de los suelos agrícolas y forestales ligada a la compactación durante los pasajes de maquinarias está una preocupación importante de los actores de la agricultura y de la gestión forestal. Pero más allá de este círculo, concierne igualmente todos los que se preocupan de las consecuencias ambientales de la agricultura y de la gestión forestal. En efecto, la compactación de los suelos modifica sus propiedades y así varias funciones importantes para los procesos tales que erosión hídrica, desnitrificación, almacenamiento del carbono, preservación de la biodiversidad. En este cuadro, el proyecto DST propuso cinco direcciones de investigación: impacto, previsión, prevención, seguimiento y cartografía de la compactación. Se basó en la utilización de modelos de compactación de los suelos y de funcionamiento del sistema para estudiar las consecuencias sobre los cultivos y el medio ambiente, *via* la modificación de las propiedades (almacenamiento, transferencia, mecánicas) de los suelos. Este proyecto transversal, que asocia laboratorios de*

investigación que trabajan en agricultura, geofísica, o ingeniera civil y los organismos profesionales, se apoyo también sobre experimentaciones variadas, en laboratorio y en el campo. En este artículo se presenta los principales resultados que conciernen: (i) el impacto de la compactación, con la puesta en evidencia de un umbral de índice de vacíos en suelo limoso, más allá del cual las performances de los cultivos y las propiedades hidrodinámicas están, desde luego, impactadas, (ii) la modelización, el proyecto desemboco sobre la realización de un modelo 2-D de previsión de la deformación de los suelos, (iii) el seguimiento, con la evaluación de métodos geofísicos, no destructivos que permiten la cartografía de las zonas compactadas, (iv) la prevención, a través del desarrollo de una herramienta de previsión de la humedad del suelo y de los días disponibles y (v) la cartografía de las zonas con riesgos en Francia.

Palabras clave

Suelo, compactación, modelización, prevención, cartografía, consecuencias agri-ambientales, métodos geofísicos.

INTRODUCTION

Le tassement des sols, est, si l'on excepte le cas des prairies sur-pâturées, dû à la mécanisation des activités agricoles et forestières qui impliquent des passages d'engins lourds en conditions humides. Ce phénomène est, avec l'érosion, un processus majeur de dégradation physique des sols en Europe. Une superficie de 33 millions d'hectares serait actuellement concernée, soit 4 % des terres (Van Ouwerkerk et Soane, 1995), contre 12 % pour l'érosion hydrique.

L'impact du tassement des sols varie fortement suivant le type de système de culture ou forestier. En grande culture, les pressions exercées sont faibles (30 kPa) lors du semis ou de la préparation du sol. Elles sont très fortes lors des récoltes et de leur transport (150 voire 200 kPa). Dans les vignobles, les pressions sont moyennes (60 kPa) à fortes (100 kPa), mais certains gros porteurs peuvent présenter des pressions très fortes (280 kPa). En forêts, les engins utilisés exercent des pressions moyennes (60 kPa) à très fortes (190 kPa) pour abattre ou débiter le bois (Rapport à paraître sur l'état des sols de France, établi à l'initiative du GIS Sol).

Depuis quelques années, on assiste à un renouvellement de l'intérêt porté à ce problème. En effet, cette dégradation de la qualité des sols agricoles est un risque qui concerne désormais l'ensemble des sols français (du fait de la généralisation de la mécanisation en vignoble et en forêt) et qui entraîne, outre une baisse de la production, un accroissement des impacts environnementaux de l'agriculture: accroissement du lessivage des nitrates, des émissions de protoxyde d'azote (N_2O) (Bessou *et al.*, 2010) participant au changement climatique, du ruissellement et de l'érosion des sols.

Par ailleurs, les évolutions actuelles des systèmes de culture remettent le tassement au cœur des préoccupations. Ainsi, on observe en grande culture, une tendance à la diminution du travail du sol, motivée par le souci de baisser les coûts de production et les charges de mécanisation, pour protéger les sols de l'érosion ou afin de favoriser le stockage du carbone en diminuant la vitesse de minéralisation de la matière organique. Or, cela n'est possible sans prendre trop de risques qu'en maî-

trisant le tassement des sols. En effet, en simplifiant le travail du sol, on limite les possibilités de régénérer la structure grâce à la fragmentation par les outils. Enfin, des inquiétudes existent concernant l'irréversibilité de la dégradation des sols sous l'effet de la répétition des interventions en conditions humides.

Or, prévenir le tassement reste délicat. Les agriculteurs et les exploitants forestiers peuvent envisager des mesures assez radicales, comme la mise en place du cloisonnement en forêt ou bien du « controlled traffic » en agriculture. Utilisant un système précis de localisation des passages, cette méthode propose de faire circuler les engins agricoles toujours au même endroit sur la parcelle. On sacrifie ainsi une portion du volume de sol agricole en préservant le reste du champ. Une autre solution consiste à équiper les engins de pneumatiques adaptés qui, en accroissant la surface d'appui au sol, limitent la contrainte appliquée. Ces mesures risquent cependant d'avoir d'importantes conséquences financières en matière d'équipement ou de surface agricole non productive. Il est également possible d'envisager des mesures de politique publique pour prévenir le tassement, en considérant le sol comme un patrimoine commun dont il importe de préserver les qualités productives. Pour mettre en place de telles politiques incitatives par exemple, il est indispensable de disposer d'outils permettant d'évaluer *ex ante* leur efficacité.

Il faut donc se donner les moyens d'identifier les systèmes et les conditions pédoclimatiques à risque, d'évaluer les conséquences du tassement, de définir les zones prioritaires pour l'application de mesures, individuelles ou collectives.

C'est pour répondre à ces attentes que le projet DST (Dégradation des Sols liée au Tassement) a été proposé. Il a été structuré en cinq volets, abordant chacun un aspect spécifique de la question du tassement des sols agricoles (grandes cultures et vignes) et forestiers. L'une des particularités du projet a été d'associer des laboratoires de recherche et des organismes chargés du transfert des connaissances issues de la recherche vers le monde professionnel. Les cinq volets structurant le projet se déclinent de la façon suivante.

1. La quantification des conséquences des tassements sur l'environnement (qualité des eaux, de l'air, érosion et activité biologique des sols).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des modèles utilisés dans le projet DST.**Table 1 :** Main characteristics of the models used in the DST research actions.

	Variables simulées	Type de modèle
COMPSOIL (O'Sullivan <i>et al.</i> , 1999)	Masse volumique du sol après passage d'engins	Hypothèse d'un sol homogène en profondeur Modèle semi-analytique (Boussinesq)
TEC (Chanzy et Bruckler, 1993)	Teneur en eau des sols nus en fonction du climat	Modèle mécaniste (Darcy/Richards) qui couple les transferts eau liquide/eau gazeuse et chaleur
STICS (Brisson <i>et al.</i> , 1998)	Croissance des cultures, bilans hydriques et azotés dans le système sol/plante	Modèle à réservoir pour la teneur en eau
MIN3P (Gérard <i>et al.</i> , 2004)	Teneur en eau des sols sous forêt en fonction du climat	Modèle mécaniste (Darcy/Richards) et transferts préférentiels
KINEROS (Woolhiser <i>et al.</i> , 1990)	Volume d'eau ruisselée et masse de terre arrachée	Modèle décrivant les processus d'interception, d'infiltration, de ruissellement et d'érosion à l'échelle de petits bassins versants agricoles ou urbains

2. La modélisation de l'intensité des tassements des sols en fonction des systèmes de culture et du climat.

3. La mise au point d'un moyen de prévention des tassements (système de prévision en continu de la teneur en eau des sols et des jours disponibles pour les travaux agricoles et forestiers).

4. L'étude de l'évolution des tassements à partir de méthodes géophysiques à grande échelle et à court terme.

5. La cartographie des risques de tassement des sols à l'échelle de la France métropolitaine (hors Corse).

Après un bref rappel des principaux éléments de méthodologie mobilisés dans le cadre du projet, cet article présente quelques-uns des résultats acquis dans le cadre de cette opération de recherche qui s'est déroulée de 2005 à 2009.

ELÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE

La modélisation est au cœur de ce projet : pour les volets 1, 2, 3 et 5 listés ci-dessus, plusieurs modèles ont été paramétrés de manière à accroître leur domaine de validité, en fonction de la nature du sol, du climat et des pratiques agricoles (*tableau 1*). Ces modèles ont été retenus à la fois parce qu'ils sont largement utilisés dans la communauté des chercheurs en agronomie et science du sol et parce que, de par leur conception, ils se prêtent à la prise en compte du tassement dans leurs paramètres. La paramétrisation a été réalisée à partir de la littérature, d'enquêtes, et complétée dans certains cas par des mesures. Les modèles ont ensuite été évalués à partir de jeux de données déjà acquis ou bien acquis durant le projet sur des sites pour lesquels nous disposons déjà de nombreuses références. Les principaux sites d'étude étaient localisés dans le grand Bassin Parisien pour les systèmes de grande culture : à

Mons en Chaussée (Somme), Versailles (Yvelines), Villamblain (Loiret) et Boigneville (Essonne), sur des sols de texture à dominante limoneuse. Le site majeur pour les systèmes viticoles était situé à Epernay (Marne), sur un sol argileux. Enfin, les sites forestiers, en sols argileux ont été installés à Azeraillies, commune de Meurthe et Moselle (forêt de Haut-bois) et à Clermont-en-Argonne, en Meuse (forêt de Grand-Pays). C'est toutefois sur le site de Mons en chaussée que les études les plus approfondies ont pu être conduites, car nous disposions sur ce site de la totalité des données nécessaires au paramétrage des différents modèles.

Concernant le volet 4, un ensemble très important d'expérimentations a été conduit à la fois au laboratoire et sur le terrain. Dans un premier temps, les variations de mesurables géophysiques, et notamment celles de la résistivité électrique (Samouëlian *et al.*, 2003), ont été caractérisées en fonction de la porosité et de la teneur en eau pour différents types de sol. Dans un second temps, sur la base des recommandations émises lors de la première étape, les méthodes géophysiques ont été mises en œuvre au champ pour évaluer leur efficacité à détecter des volumes de sol tassés et leur évolution. Cette évaluation a été réalisée par comparaison avec des mesures classiques de caractérisation de la structure du sol (profil culturel, masse volumique, repérage de la macroporosité d'origine naturelle).

En système de grande culture, le projet DST s'est appuyé sur l'essai de longue durée « Système de culture/Structure du sol » de Mons (Boizard *et al.*, 2006) pour caractériser la régénération naturelle des volumes de sol tassés et pour fournir les références permettant d'adapter les modèles STICS (Brisson *et al.*, 1998) et KINEROS à la problématique du tassement. En particulier, le modèle STICS a été utilisé pour élaborer des fonc-

tions de réponse à l'azote. Ces fonctions relient la dose d'azote apportée au rendement des cultures. L'allure de la courbe décrivant la fonction, asymptotique, dépend (entre autres facteurs) de l'efficacité avec laquelle l'azote est prélevé par la plante. À l'aide du modèle, nous avons dressé les courbes pour les principales cultures du Bassin Parisien, en les faisant varier en fonction du degré de tassement du sol (Roger-Estrade *et al.*, 2009). Des essais équivalents en forêt n'existant pas, l'ensemble des participants du projet s'est fortement investi dans la mise en place de deux sites forestiers dédiés aux études des effets de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers en terme de dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. Ces deux sites sont situés en Lorraine. Ils ont bénéficié d'un appui important de l'ONF et ont vocation à être suivis bien au-delà de la durée du projet DST.

Les deux sites forestiers expérimentaux (Hauts-Bois et Grand Pays), étaient situés dans des milieux plutôt acides à Grand-Pays, un peu moins à Hauts-Bois. Les plans expérimentaux des Hauts-Bois et de Grand-Pays étaient identiques à l'exception d'un chaulage pour Grand-Pays et d'un travail localisé du sol par potets (trous faits dans le sol pour accueillir les jeunes plants) pour Hauts-Bois. Ils comprenaient tous deux témoins : un témoin absolu (sol en l'état après récolte), un témoin relatif (placeau tassé sur une bande de 30 m), un

placeau tassé et ayant subi un travail du sol après tassement. La préparation des sites (route, enclos, etc.) a été mise en œuvre fin 2006 par l'ONF. Afin de limiter le tassement produit lors de la récolte prévue au cours de l'hiver, le débardage par câble a été retenu. C'est ensuite grâce à un débardeur opérationnel habituel en milieu forestier que le tassement a été effectué en période humide (mai 2007 pour Haut-Bois et mars 2008 pour Grand-Pays).

Sur ces sites forestiers, un certain nombre d'indicateurs du tassement a été mesuré : masse volumique, conductivité hydraulique à saturation, résistance mécanique à la pénétration, résistivité électrique observation d'un profil cultural. Une caractérisation de l'état de croissance de la végétation (forêt de Heut-bois) des systèmes racinaires, de l'activité biologique du sol (lombriciens) et de la microflore a également été entreprise. Des appareils de mesure ont été installés pour un suivi régulier de différentes variables : météo, teneur en eau (TDR), niveau de nappe (piézomètres), température du sol, prélèvement de gaz ensuite analysés au laboratoire par chromatographie gazeuse, diffusion de gaz (perméamètre *in situ*), émission de CO₂ à Azerailles, prélèvement de la solution du sol pour analyse chimique au laboratoire en janvier 2009.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Impacts agri-environnementaux du tassement

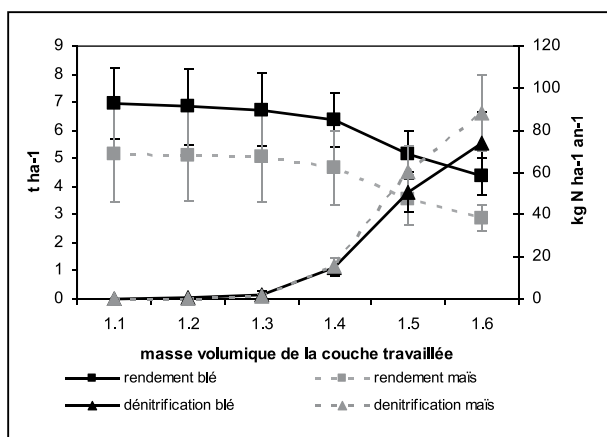
Au-delà d'un certain seuil, le tassement peut avoir un effet important à la fois sur la biomasse produite, sur les cycles de l'eau et de l'azote et sur l'érosion des sols (*figure 1*). L'un des principaux résultats acquis dans ce volet a été de mettre en évidence, grâce à la simulation, pour le sol de limon argileux caractéristique du site de Mons, un seuil de masse volumique (i) qui entraîne une variation significative des propriétés hydrodynamiques du sol et (ii) pour lequel on a montré par modélisation (en utilisant le modèle de culture STICS) que les croissances du maïs et du blé étaient altérées. Ce seuil correspond à un indice des vides structuraux moyen sur la couche travaillée de 0,15 m³ m⁻³ ou à une masse volumique de 1,45 g.cm⁻³. Mg m⁻³ (Royer et Duval, 2008).

Nous avons également montré que si le changement climatique peut avoir un impact potentiellement positif sur le rendement des cultures de printemps en Picardie (en améliorant leur confort hydrique), ces impacts peuvent être remis en cause par les effets du tassement, sachant que l'accroissement de la pluviométrie à l'automne et au printemps pourrait en accroître les risques.

Enfin, nous nous sommes penchés, dans le cadre de ce projet, sur l'activité lombricienne. Dans un sol tassé, nous

Figure 1 - Impact du tassement d'un sol limoneux de Picardie sur les rendements du blé et du maïs (axe de gauche) et les émissions d'azote par dénitrification, en fonction de la masse volumique du sol. Résultats obtenus par simulation avec le modèle STICS. Les barres donnent l'étendue de la variation des valeurs sur la période de référence climatique 1969-2009.

Figure 1 - Impacts of compaction in a loamy soil of Northern France (Picardie region) on winter wheat (left axis) and corn (right axis) yields, as a function of the soil bulk density. Data were obtained by simulation with the STICS model. Bars give the range of simulated values on the period 1969-2009.



avons montré que les vers de terre réagissaient différemment, en fonction de l'espace considérée, à une structure du sol dégradée (Capowiez *et al.*, 2009a). D'autre part, un passage d'engin lourd en conditions humides peut entraîner une baisse de près de 50 % du nombre de vers de terre, soit par une mort directe par écrasement lors du tassement, soit par fuite des individus hors de la zone tassée. Enfin, la régénération des structures dégradées, par l'activité de creusement de galeries de vers de terre est très lente. La colonisation par les vers de terre des volumes de sol tassés a été suivie sur deux années en sol limoneux. Au bout de huit mois, la recolonisation est effective, avec une présence de macroporosité (pores d'un diamètre > 4 mm) déjà significative. Les espèces n'ont pas le même comportement suivant la géométrie de la zone tassée: les anéciques qui creusent des galeries profondes, sub verticales, sont plus efficaces sous la couche labourée. Les endogés, qui vivent préférentiellement dans les premiers décimètres de sol, agissent plutôt sur la structure de la couche labourée. En terme de propriétés, dans ce type de sol et de climat et pour ce type de système de culture caractérisé par d'assez faibles apports de matières organiques, la capacité d'infiltration d'un sol initialement tassé retrouve son niveau d'avant tassement après 15 mois d'activité des vers de terre (Capowiez *et al.*, 2009b).

Les travaux de ce volet ont confirmé l'intérêt d'étudier les effets du tassement par la voie de la simulation. L'utilisation du modèle STICS a permis d'intégrer les nombreuses interactions et rétroactions qui s'opèrent lorsque la masse volumique d'un sol s'accroît après un tassement. Ce dernier entraîne ainsi des modifications complexes du cycle de l'azote et du carbone (diminution de la minéralisation, accroissement de la dénitrification...) en interaction avec le cycle de l'eau (effet fort sur le partage ruissellement-infiltration, sur la lixiviation des nitrates...) et le fonctionnement des racines (diminution de la profondeur d'enracinement, de la densité de racines, de leur fonctionnement en conditions anoxiques).

Prévision des tassements

Dans ce volet du projet, l'objectif était de développer un modèle de prévision du tassement prenant en compte les contraintes appliquées par les pneumatiques et les caractéristiques des sols pour simuler, en 2D dans un plan vertical, la déformation du matériau au voisinage du passage de la roue.

Estimation des contraintes appliquées à la surface et des paramètres mécaniques des sols

Nous avons établi les différents éléments permettant de cartographier les contraintes appliquées à la surface du sol par les engins dans les systèmes de grande culture, viticoles et forestiers français. Ils concernent (1) le calcul des contraintes à la surface à l'aide du modèle COMPSOIL (O'Sullivan *et al.*, 1999), dont nous avons comparé les performances à celles de

six autres modèles, (2) une enquête conduite par les instituts techniques sur les équipements utilisés dans les différents systèmes de culture, en fonction de la zone d'utilisation, du type d'intervention (semis, transport, récolte...) et de la période d'utilisation.

Nous avons établi un premier ensemble de fonctions de pédotransfert pour les propriétés mécaniques des sols français (Dexter *et al.*, 2008). Ces fonctions permettent d'estimer les propriétés mécaniques des sols difficiles à mesurer, à partir de données analytiques accessibles telles que la texture par exemple. Ce résultat repose sur la mise au point d'un protocole de mesure intégrant les spécificités du tassement des sols agricoles à la différence des normes Afnor, établies pour la pour la géotechnique et peu adaptées au cas agricole. Dix sols représentant 25 horizons et répartis sur l'ensemble du triangle des textures ont été analysés. Pour chaque classe de texture, des relations statistiques entre la compressibilité du sol ou la pression de pré-consolidation (Défossez *et al.*, 2003) et l'état physique du sol (masse volumique et teneur en eau) ont été établies. Par ailleurs, nous avons étudié les effets de certaines pratiques culturales sur les propriétés mécaniques des sols: amendements basiques, exportation de paille, travail du sol (Levrel et Ranger, 2006). Ces études ont notamment permis de quantifier l'effet de la structure du sol qui est un paramètre clé de détermination de ses propriétés mécaniques. Nous avons aussi analysé plus finement les effets des variations de l'état hydrique sur le comportement mécanique des sols. Les résultats, publiés dans Cui *et al.* (2007), ont permis de modéliser les déformations des sols sous l'effet des tassements. Ils ont en outre permis de mettre au point des tests pour déterminer le comportement des sols agricoles soumis au tassement, les tests utilisés jusqu'à présent, issus du génie civil, étant peu adaptés au contexte agricole.

Modélisation des déformations du sol

Plusieurs études menées dans le cadre du projet ont contribué à améliorer la modélisation 2D du tassement. La première étude a permis de transformer le modèle COMPSOIL, monodimensionnel, en un nouveau modèle, SOILFLEX bidimensionnel, intégrant l'ensemble des références actuelles sur les modèles semi-analytiques (Keller *et al.*, 2007). Ce travail a été réalisé en collaboration avec le département de Science du Sol de l'Université d'Uppsala (Suède). La seconde étude concerne une nouvelle méthode de calcul des contraintes exercées à la surface du sol par les engins agricoles dans les modèles à éléments finis (modèle PLAXIS). Ce nouveau formalisme permet de générer les distributions des contraintes appliquées à l'interface pneu/sol en fonction de la rigidité du pneumatique et de la résistance mécanique du sol. Nous avons ainsi pu montrer que la cohésion du sol modifie la forme de la distribution des contraintes à la surface: une forme parabolique pour un sable et une forme en U (maximum aux

bords du pneumatique) pour un sol argileux (figure 2). Un travail spécifique a été conduit pour les sols forestiers (collaboration avec F. Collin, Université de Liège, Belgique) en conditions très humides (calcul de profondeur d'ornièrre à l'aide du code de calcul LAGAMINE). Cependant, la très grande sensibilité du modèle au choix de la loi de comportement du sol, mal connue pour les sols forestiers, limite la généralisation de cette nouvelle approche.

Application à la prévision du risque de tassement des sols

Nous avons analysé l'effet de certaines pratiques agricoles sur la sensibilité des sols au tassement par simulation pour étudier l'effet de (1) la mise en place d'un couvert hivernal et ses conséquences en termes de fonctionnement hydrique au printemps, (2) l'exportation des pailles et la diminution du taux de carbone organique dans les sols qui en résulte (Saffih-Hdadi et Mary, 2008). Les simulations couplées STICS-COMPSOIL ont montré que la mise en place d'une culture intermédiaire peut provoquer des retards fréquents de semis d'environ 10 jours (évalué dans le cas d'une orge de printemps). Ce retard de semis, s'il est pénalisant pour l'élaboration du rendement, est favorable à une meilleure protection de la structure du sol, le semis intervenant dans des conditions plus sèches. Concernant l'effet de l'exportation des pailles, les simulations montrent que le sol pauvre en carbone a tendance à mieux résister au tassement. L'exportation des pailles ne présenterait donc pas de risque particulier par rapport au tassement.

Prévention des tassements

Un agriculteur (ou un exploitant forestier) doit déterminer, avant toute intervention culturale, si l'état hydrique du sol entraîne ou non un risque de tassement. Bien entendu, la décision d'intervenir dépend d'autres critères, mais celui-ci compte, tout particulièrement lorsque le matériel utilisé est lourd. A l'heure actuelle, il existe peu d'outils pour déterminer le risque (et donc prévoir le tassement) et l'agriculteur (ou le forestier) se base sur un nombre de jours après la dernière pluie, nombre qui dépend de l'importance de cette pluie.

Nous avons donc, dans le projet, cherché à développer un outil permettant d'améliorer la prise de décision à partir d'une estimation de la teneur en eau fournie par un modèle de transfert hydrique. L'enjeu de ce volet était de trouver les moyens d'adapter un modèle conçu pour la recherche (le modèle TEC) pour qu'il soit utilisable dans une large gamme de situations culturales et permette d'obtenir, à un coût raisonnable, une précision suffisante sur la teneur en eau estimée (Chanzy et al., 2008).

Cas des sols nus

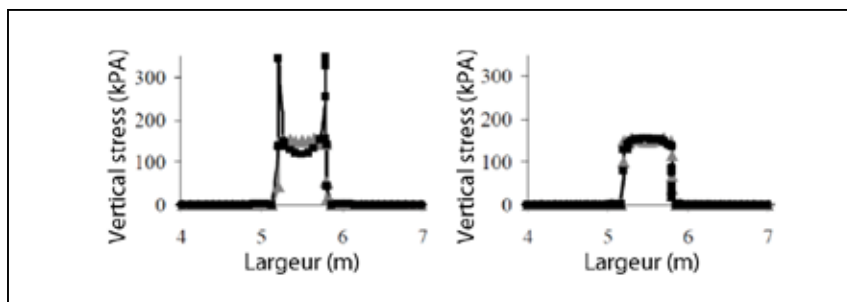
Parmi les différentes entrées des modèles de transferts hydriques dans les sols nus, l'estimation des propriétés hydrodynamiques, les conditions à la limite inférieure et les conditions initiales sont les points les plus critiques (Chanzy et Bruckler, 1993). A l'issue du travail effectué dans ce volet, nous proposons (i) l'utilisation de la fonction de pédotransfert de Wösten (1997) pour estimer les propriétés hydrodynamiques des sols à partir de leur texture, (ii) le choix du flux gravitaire comme condition limite inférieure et (iii) un protocole d'initialisation. Nous avons appliqué cette procédure à plusieurs contextes culturaux permettant de confronter les simulations aux mesures. La précision obtenue sur l'estimation de la teneur en eau est d'environ $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ sur des sols cultivés, en considérant plusieurs modalités de travail du sol (Chanzy et al., 2008).

L'introduction de mesures additionnelles pour améliorer la précision des estimations de la teneur en eau ne conduit pas toujours à une diminution de l'incertitude. Dans le cas d'une expérience menée à Mons sur des sols portés à des états structuraux contrastés, nous avons montré que l'utilisation de propriétés hydrodynamiques mesurées par les méthodes de Wind (mesure au laboratoire sur des échantillons non remaniés) ou BeerKan (caractérisation simplifiée *in situ*) n'améliore pas la précision des teneurs en eau simulées par rapport aux résultats obtenus avec l'utilisation de la fonction de pédotransfert de Wösten (1997). En effet, ces mesures, réalisées en divers points de la parcelle, sont ensuite moyennées et l'information sur la variabilité est perdue.

L'efficacité offerte par la simulation de la teneur en eau pour la prise de décision (quant au moment optimal pour inte-

Figure 2: Simulations des distributions de contrainte verticale à la surface du sol pour un sol argileux (à gauche) et pour un sol sableux (à droite). Source: Cui et al., 2007.

Figure 2: Simulated vertical strain distributions at soil surface. Clay soil (left) and sandy soil (right).



venir sur une parcelle agricole) a été évaluée. Pour cela nous avons considéré une décision fondée sur la comparaison d'un niveau de teneur en eau par rapport à une valeur seuil (issue des travaux du volet 2). Un scénario dans lequel la possibilité d'intervenir sur une parcelle agricole a été établi en définissant un délai après une pluie non pas fixe, mais dépendant du type de sol.

Nous montrons que, par rapport à une approche empirique du type « nombre de jours après une pluie », la simulation de la teneur en eau permet une légère diminution du taux d'erreur (c'est-à-dire du nombre de cas où l'approche empirique amène à intervenir en conditions trop humides). Cependant, la variabilité reste grande et l'outil peut s'avérer inopérant sur certains sols. L'apport de mesures de teneur en eau, même peu fréquentes, permet de réduire le taux d'erreur moyen, mais surtout d'éviter le cas des sols où la teneur en eau est difficile à simuler (présence de biais important, qu'il est pour l'instant impossible d'expliquer, que ce soit par le type de sol ou par les conditions climatiques), les taux d'erreur pouvant dépasser 60 %.

Cas des couverts forestiers

Nous avons montré que le modèle MIN3P (monodimensionnel) mis en œuvre avec des fonctions de pédotransfert permet de reproduire de manière satisfaisante l'évolution de la teneur en eau du sol. L'utilisation de la fonction de pédotransfert ROSETTA offre de meilleurs résultats que celle de Wösten. Contrairement au cas des sols nus, on montre que l'ajout de mesures de certaines propriétés du sol (teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement) permet une nette amélioration. L'étude montre également l'importance de tenir compte des écoulements préférentiels. L'étude systématique sur l'estimation de tous les paramètres d'entrée faite dans le cas des sols nus n'a pas pu être réalisée dans le cas des couverts forestiers du fait de la complexité sérieusement accrue par la présence de la végétation par rapport à la situation en sol nu. Nous nous sommes donc limités à établir des fonctions empiriques qui simulent la vitesse de ressuyage des horizons de surface à l'aide de MIN3P.

Suivi des tassements

Dans ce volet, l'effort a porté sur l'exploration des possibilités offertes par les techniques géophysiques pour le suivi des tassements. L'idée était de tester la possibilité de caractériser la structure du sol à l'échelle du profil cultural par des moyens non destructifs. Deux types de méthodes ont été testés : celles basées sur l'enregistrement de la résistivité électrique (Samouëlian et al., 2003) et celles basées sur un suivi de la variation des propriétés magnétiques des sols. D'autre part, nous avons progressé sur un aspect encore peu étudié de la régénération de la structure des sols : la fissuration sous l'effet

du climat. Ce processus naturel de régénération de la structure du sol devient primordial dans un contexte où la simplification du travail du sol (qui implique une diminution des moyens mécaniques de recréer de la porosité après un tassement) se généralise.

Méthodes géophysiques

Méthode électrique

Un travail expérimental mené au laboratoire a permis de montrer que la résistivité électrique était une propriété physique sensible aux variations de masse volumique consécutives aux tassements, et ceci pour une grande gamme de teneurs en eau et de types de sol. L'effet de la teneur en eau est d'autant plus marqué que la masse volumique est faible. Au champ, aussi bien en contextes agricoles que forestiers, nous avons montré qu'un suivi par tomographie électrique, réalisé perpendiculairement au passage des roues, permettait de cartographier le volume de sol tassé. Le signal électrique est en effet converti en une carte en couleur des horizons travaillés, qui décrit la variabilité spatiale de la structure (les zones tassées apparaissant en couleurs froides, celles non tassées en couleurs chaudes). L'épaisseur de sol cartographiée est de l'ordre de 45 cm.

Il a ainsi été possible de détecter, au champ, à Mons en Chaussée, juste après un passage en condition humide, la zone fortement tassée sous la roue. Des mesures effectuées dans les mois suivants ont montré que les processus naturels de régénération de la structure entraînaient la disparition progressive de ces zones tassées et que cela était détectable par la méthode. Celle-ci a été également utilisée dans une situation observée après un travail du sol à Mons en Chaussée, une tomographie 3D de la couche travaillée a permis de localiser les zones du profil où la structure du sol était fragmentaire, composée de mottes de différents volumes séparées par des vides centimétriques. Ce type de structure augmente en effet fortement la résistivité du sol. Par contre, la méthode n'a pas permis d'analyser la distribution du calibre des mottes (Séger et al., 2009).

Les difficultés de prospection en conditions sèches nous ont conduits à proposer un nouveau dispositif électrostatique de dimension décimétrique (dit hexapôle) qui fonctionne sans avoir besoin d'enfoncer les électrodes. Il a été mis en œuvre avec succès sur le terrain, sur le site expérimental de Mons-en-Chaussée de mai à juin 2007. En parallèle à ce développement méthodologique, le travail d'interprétation des mesures de résistivité électrique en fonction du niveau de fissuration du milieu a été poursuivi via le modèle numérique d'inversion FISSEL (FISsure Électrique). Le code FISSEL a été validé par des mesures obtenues au laboratoire sur une fissure créée artificiellement (Samouëlian et al., 2003).

Méthode magnétique

Les cartographies haute résolution des anomalies du champ magnétique terrestre permettent de mettre en évidence l'hétérogénéité du sol du point de vue de ses capacités d'aimantation. Cette démarche a été initialement appliquée à des sols de marais littoraux. Elle a permis de montrer l'influence du travail du sol sur la concentration des phases minérales ayant un fort signal magnétique, comme la magnétite, dont les variations de teneur sont estimées à quelques dizaines de ppm entre les zones de plus fort contraste magnétique (Mathé *et al.* 2006). Ces auteurs font l'hypothèse que le tassement, entraînant une diminution de la porosité et donc des conditions redox, induit des transformations minérales locales qui modifient le signal magnétique.

Dans le cadre du projet DST, l'objectif était d'essayer d'appliquer cette approche sur les différents sites d'étude, agricoles et forestiers. Cependant, le contexte s'est avéré peu favorable, en raison principalement de l'environnement électromagnétique. La méthode est en effet très sensible à la présence d'éléments métalliques au voisinage de la parcelle (clôtures, débris métalliques enfouis, passage de véhicules à proximité, etc.). Ainsi, dans les lieux ayant une densité de masses métalliques importante, le signal pédologique récent porté par les traceurs magnétiques est très difficile à extraire par une cartographie des anomalies du champ magnétique. Il a cependant été possible, sur le site de Villamblain (Limoron), de mettre en évidence un signal un peu structuré, pseudo-périodique, ayant la forme d'hétérogénéités longitudinales séparées d'une distance de l'ordre de 2 m, révélant des tassements occasionnés par les passages d'engins agricoles, qui ont été identifiables durant les trois ans ayant suivi leur création.

Les cartographies des sites forestiers, bien que réalisées avec un protocole moins rigoureux du fait des conditions de terrain, permettent aussi d'imager les zones tassées. Néanmoins, compte tenu de l'importance des ornières, le rôle de la microtopographie est prépondérant dans ce cas (quelques décimètres à comparer aux quelques centimètres en grande culture). Les comparaisons des profils de susceptibilité magnétique réalisés en zone tassée et non tassée sur le site d'Azerailles ne permettent pas de discriminer les zones tassées de celles qui ne le sont pas. Un protocole spécifique doit être mis au point pour ce type de conditions, nécessitant des analyses sur un grand nombre d'échantillons et des observations complémentaires qui devraient être réalisées prochainement.

Mécanismes de régénération liés au climat

La fissuration a été étudiée à partir d'analyse d'images d'échantillons prélevés sur trois parcelles compactées à des niveaux différents. Nous avons pu mettre en évidence un épaissement progressif d'un horizon à structure lamellaire et polyédrique qu'on attribue à l'action de l'humectation et du gel. Dans les cinq années suivant le tassement, ce sont

les 20 premiers centimètres qui sont concernés. Au-delà de 20 cm de profondeur, nous avons observé des fissures au sein des volumes de sol tassés avec une orientation verticale préférentielle. Nous l'attribuons à l'effet de la dessiccation du sol, sous l'effet probable et conjugué du climat et des cultures.

Nous disposons ainsi des éléments pour proposer un modèle conceptuel d'évolution de la structure des volumes de sol tassés liée à l'activité biologique (vers de terre, racines) et climatique (pluie, sécheresse, gel). En terme de durée de vie des volumes de sol tassés, la capacité d'infiltration maximale est retrouvée assez rapidement (moins de 24 mois). Par contre, le recouvrement de la porosité de l'ensemble de la couche concernée demande plus de cinq années (Capowiez *et al.*, 2009b).

Cartographie des tassements

L'inventaire spatialisé des contraintes appliquées sur les sols par les matériels a permis d'établir une carte de France des contraintes moyennes appliquées au sol et des surfaces affectées par ces contraintes pour les systèmes de grande culture et les systèmes viticoles. Les données du recensement agricole 2000 et l'expertise des instituts techniques ont permis de délimiter des zones géographiques en fonction du type de matériel agricole utilisé. Les contraintes appliquées aux sols ont ainsi pu être cartographiées selon deux zonages, l'un pour les grandes cultures, l'autre pour la vigne. Pour la forêt, un premier recensement des matériels utilisés a été effectué mais le volet spatialisation n'a pas pu être finalisé en raison des difficultés pour obtenir des données spatialisées que l'on puisse relier aux critères de mécanisation définis par expertise (ONF, IFN).

La mise au point d'une méthodologie, reposant sur le cas du maïs, culture de printemps pour laquelle le risque de tassement est élevé au semis et à la récolte, pour la cartographie des risques de tassement a été réalisée pour le territoire français. Elle repose sur (1) la détermination de l'évolution dans le temps de la teneur en eau du sol aux périodes d'intervention, (2) la détermination par type de sol de la teneur en eau critique au-delà de laquelle les interventions entraînent un tassement sévère, (3) l'estimation, pour chaque intervention, du nombre de jours où la teneur en eau du sol dépasse cette teneur en eau critique (dans un créneau de temps correspondant à la période favorable pour réaliser l'intervention). Chaque zone est alors caractérisée par le pourcentage d'années où le nombre de jours à risque représente plus de 33 % ou de 66 % du nombre de jours total de la période d'intervention. De même, on calcule le nombre d'années où au moins une période d'intervention présente un nombre de jours à risque de plus de 33 ou 66 %.

Pour déterminer les teneurs en eau critiques, nous avons utilisé le modèle Compoil en le paramétrant avec les fonctions de pédotransfert définies à partir des sols de référence étudiés dans le volet 2 (Saffih-Hdadi *et al.*, 2009). Les teneurs en eau

critiques sont estimées en considérant qu'un tassement sévère (sur les couches de sol 0-10 cm et 20-30 cm) correspond au dépassement d'un seuil d'indice des vides structuraux au-delà duquel les fonctions agronomiques et environnementales sont altérées, sur une épaisseur de sol comprise entre 0 et 30 cm.

Pour déterminer l'évolution dans le temps de la teneur en eau, nous utilisons le modèle de culture STICS qui tient compte des prélèvements d'eau par le maïs. Pour estimer les paramètres « sol » de STICS décrivant les propriétés hydriques, nous avons regroupé les sols de la base de données géographique des sols de France au millionième en 30 groupes. L'estimation des paramètres pour chaque groupe a été réalisée à partir d'une procédure d'inversion numérique basée sur des simulations de teneurs en eau réalisées par un modèle mécaniste (modèle HYDRUS, Šimunek *et al.*, 2005). Des fonctions ou des règles de pédotransfert déjà développées ont été utilisées pour l'estimation des autres paramètres du sol (Le Bas *et al.*, 2005).

Enfin, une procédure informatique couplant le SIG Arcinfo et le modèle STICS a été réalisée pour permettre d'élaborer les fichiers de paramètres, de réaliser les simulations, de mettre les résultats en base de données puis de les cartographier. Un exemple de carte est fourni à la *figure 3*, qui correspond aux risques de tassement liés à la récolte du maïs.

La *figure 3* montre un exemple de cartographie du risque de tassement exprimé ici en nombre d'années présentant un risque par rapport au nombre total d'années. Le risque est ici considéré comme la présence d'au moins une période dans l'année où le nombre de jours à risque de tassement des sols entre 0-10 cm et 10-30 cm de profondeur dépasse 66 %. En rouge, ce sont les zones où ce risque apparaît plus de trois années sur quatre. La carte considère que la culture est pratiquée partout. Les résultats sont donc à relativiser en fonction des zones de production réelle du maïs. Ces premiers résultats indiquent que les risques les plus élevés sont principalement localisés sur les sols sableux (Landes, Sologne, Vosges), sur les sols argileux de Lorraine et dans les zones de montagne (Alpes, Massif central, Pyrénées). Mis à part les Landes, ces zones sont peu cultivées en maïs. Quelques zones où le maïs est beaucoup cultivé présentent des risques élevés (au sud de la Bretagne, en vallée du Rhône). Pour encourageants qu'ils soient, ces résultats sont cependant encore à analyser plus en détail pour formuler des hypothèses solides sur l'origine des tassements.

CONCLUSION

Le projet DST a abouti à un ensemble de produits finalisés, en termes de méthodologies et de résultats. Ils concernent :

La quantification du tassement et de ses effets sur différents processus biophysiques, par mesures *in situ* et par modélisation : populations de vers de terre, drainage, ruissellement et érosion, lixiviation du nitrate et émissions de gaz à effet de serre (N₂O), en interaction avec les conditions climatiques. On peut cependant souligner une limite à ces travaux, à travers l'absence de prise en compte de la diversité des types de sol. Enfin, cette partie du projet a permis de préciser les pratiques culturales les plus à risques en grande culture, vigne et forêt. Pour les grandes cultures, les contraintes les plus importantes, en termes de pression et de surfaces affectées, sont engendrées par la récolte. Pour la vigne, les contraintes sont très localisées, mais le nombre de passages est important ce qui entraîne parfois des risques élevés de tassement lors des opérations de préparation du sol ou de désherbage. En ce qui concerne la forêt, les contraintes sont très élevées, mais les surfaces concernées sont extrêmement variables.

La définition de la notion de sol tassé et de teneur en eau critique : nous proposons de caractériser l'intensité du tassement par l'indice des vides structuraux. Selon les processus, les couples « indice des vides / épaisseur concernée » qui sont pénalisants ne sont pas identiques. Ceci étant, nos résultats montrent que c'est en dessous d'un indice des vides structuraux de 0,15 sur 15 cm qu'on peut considérer un sol comme tassé (masse volumique de 1,45 g cm⁻³ en sol limoneux). Cet indicateur vient compléter les références obtenues à partir de l'indice S de R.A. Dexter (Dexter, 2004), ou de la masse volumique relative (Hakanson et Lipiec, 2000). Le modèle COMPSOIL a été paramétré pour calculer la teneur en eau du sol critique qui conduit à un certain indice des vides structuraux sur une certaine épaisseur en fonction de la charge appliquée. Les limites de ces travaux concernent la prise en compte du gonflement des sols et de la durée de vie d'un sol tassé :

- Dans nos modèles, la masse volumique varie peu en fonction de la teneur en eau des sols, sauf pour les sols gonflants. Par contre, l'indice des vides structuraux varie dès que la teneur en eau varie (au travers du gonflement/retrait textural).
- la durée de vie d'un volume de sol tassé localisé dans la couche labourée a été estimée entre 3 à 5 ans dans un sol limoneux. Des références similaires seraient à établir pour d'autres types de sol.

L'élaboration d'une carte de risque de tassement des sols français. Elle est basée sur le nombre de jours durant lesquels une intervention sur les parcelles agricoles engendre un tassement sévère du sol (indice des vides structuraux passant en dessous d'un seuil à partir duquel il y a une altération des fonctions agronomiques et environnementales). La carte proposée est basée sur un paramétrage par défaut du comportement

hydromécanique des sols français. Les limites de cette partie concernent :

- l'absence de confrontation à des données mesurées. Nous suggérons d'utiliser la base de données du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols du Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis Sol) pour apporter un premier élément de validation ; par exemple les données sur la texture pourraient permettre d'affiner les estimations de propriétés hydrodynamiques basées des fonctions de pédotransfert ;
- la non prise en compte des sols forestiers. Un travail spécifique sur les sols forestiers reste à conduire.
- L'évaluation des méthodes électriques et magnétiques pour la caractérisation et le suivi du tassement. Nos résultats montrent que ces deux méthodes sont aptes à identifier des zones tassées. L'état des connaissances sur la signification du signal électrique est plus avancé : des mesures en conditions sèches et humides permettent de localiser les zones à forte masse volumique.
- La proposition d'un système d'avertissement du risque de tassement des sols à destination de la profession agricole, basé sur la prévision à cinq jours de la teneur en eau des sols à partir du modèle de transfert d'eau TEC. L'ensemble de la démarche a été testé avec succès. Il reste à la rendre opérationnelle.

Les résultats et les méthodologies issus du projet DST apparaissent riches et répondent aux objectifs initiaux, même si globalement les résultats sont à consolider pour des conditions beaucoup plus diverses que celles qui ont été étudiées en cours de projet. Il est envisageable d'appliquer la méthodologie à d'autres formes de dégradation des sols que le tassement (diminution du taux de matières organiques).

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené dans le cadre du projet Dégradation Physique des Sols agricoles et forestiers liée au Tassement. Il a bénéficié d'un financement (1) du Ministère en charge de l'Environnement, pour le programme GESSOL2 « Impact des pratiques agricoles sur le sol et les eaux », (2) de l'ANR- Agence Nationale de la Recherche, pour le Programme « Agriculture et Développement Durable » (projet ANR-05-PADD-013).

BIBLIOGRAPHIE

- Bessou C., Mary B., Leonard J., Roussel M., Gréhan E., Gabrielle B., 2010 - Modelling soil compaction impacts on nitrous oxide emissions in arable fields. *European Journal of Soil Science* 61 (3), 348-363.
- Boizard H., Roger-Estrade J., Capowicz Y., Richard G., 2006 - Effect of different soil management and cropping systems on change in soil structure with time. 17th Conference ISTRO, Sustainability, its impact on soil Management and Environment, 28/08-3/09/2006, Kiel, Germany. 6 pp.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy, M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delecalle R., 1998 - STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18 (5/6), 311-346.
- Chanzy A., Richard G., Mumen M., 2008 - Accuracy of top soil moisture simulation using a mechanistic model with limited soil characterization. *Water Resource Management*, 44, doi: 10.1029/2006WR005765.
- Capowicz Y., Cadoux S., Bouchand P., Ruy S., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., 2009a - The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil & Tillage Research*, 105 (2), 209-216.
- Capowicz Y., Cadoux S., Bouchand P., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., 2009b - Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment. *Soil Biology & Biochemistry*, 41 (4), 711-717.
- Chanzy A., Bruckler, L., 1993 - Significance of soil surface moisture with respect to daily bare soil evaporation. *Water Resources Research* 29(4):1113-1125.
- 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: 89-105.
- Chanzy A., Mumen M., Richard G., 2008 - Accuracy of top soil moisture simulation using a mechanistic model with limited soil characterization. *Water Resource Research*, 44, W03432, doi: 10.1029/2006WR005765.
- Citeau L., Bispo A., Bardy M., King D., 2008 - Gestion durable des sols. Sous la coordination des Éditions Quae. Collection « Savoir-faire ». 320 p.
- Cui K., Défossez P., Richard G., 2007 - A new approach for modelling vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict the compaction of cultivated soils by using the PLAXIS code. *Soil & Tillage Research*, 95, 277-287.
- Défossez P., Richard G., Boizard H., O'Sullivan M.F., 2003 - Modeling change in soil compaction due to agricultural traffic as function of soil water content. *Geoderma*, 116, 89-105.
- Dexter, A.R. 2004 - Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214.
- Dexter A.R., Czyz E. A., Richard G., Reszkowska A., 2008 - A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*, 143, 3-4, 243-253. Doi 10.1016/j.geoderma.2007.11.010.
- Gérard, F., M. Tinsley, and K.U. Mayer, 2004 - Preferential flow revealed by hydrologic modeling based on predicted hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 1526-1538.
- Hakansson I., Lipiec J., 2000 - A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*, 53, 71-85.
- Keller T., Défossez P., Weisskopf P., Arvidsson J., Richard G., 2007 - SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research*, 93, 391-411. Doi: 10.1016/j.still.2006.05.012.

- Le Bas C., King D., Daroussin J., Arrouays D., 2005 - Estimation des paramètres sols pour STICS à partir d'une base de données spatialisée sur les sols à petite échelle. Séminaire STICS. Carry-le-Rouet, 17-18 mars 2005. INRA, Paris.
- Lefèbvre M.-P., 2010 - Spatialisation de modèles de fonctionnement hydromécanique des sols appliquée à la prévision des risques de tassement à l'échelle de la France. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans. Inra, Orléans, 293 pages.
- Levrel G., Ranger J., 2006 - Effet des substitutions d'essences forestières et des amendements sur les propriétés physiques d'un aloccrisol. Site expérimental de la forêt de Breuil-Chenué, Morvan, France. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 71-88.
- Mathé V., Lévêque F., Mathé P.-E., Chevallier C. & Pons Y., 2006 - Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: limits in the low magnetic amplitude case. *Journal of Applied Geophysics*, 58(3), 202-217.
- O'Sullivan, M.F., Henshall, J.K., Dickson, J.W., 1999 - A simplified method for estimating soil compaction. *Soil Tillage Res.* 49, 325–335.
- Richard G., et collaborateurs, 2008 - Dégénération physique des Sols agricoles et forestiers liée au Tassement: impact, prévision, prévention, suivi, cartographie. Rapport final ADD et GESSOL, 45 pages
- Roger-Estrade J., Baranger E., Jayet P.A., Richard G., 2009. Coupling a biophysical and a microeconomic model to assess the consequences of compaction in Northern France. 18th Conference ISTRO, 15-19/06/2009, Izmir, Turquie.
- Royer C., Duval R., 2008 - Sol: soigner son physique. Réussir Grandes Cultures, 220, 65-67.
- Saffih-Hdadi, K., Mary, B., 2008 - Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology & Biochemistry*, 40(3), 594-607.
- Saffih-Hdadi K., Défossez P., Richard G., Cui Y. J., Tang A. M. et al., 2009 - A method to predict the soil susceptibility to compaction of surface layers as function of water content and bulk density. *Soil & Tillage Research*. 105: 96-103.
- Samouëlian A., Cousin I., Richard G., Tabbagh A. Bruand, A., 2003 - Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Science Society Journal of America*, 67: 1319-1326.
- Séger M., Cousin I., Frison A., Boizard H., Richard G., 2009 - Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using *in situ* 2D and 3D electrical resistivity measurements. *Soil and Tillage Research*, 103, 387–398.
- Šimuněk J., Van Genuchten M. T., Šejna M., 2005 - The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Department of environmental sciences. University of California, Riverside, USA.
- Van Ouwerkerk C. and Soane B. D. (eds) 1995 - Soil compaction and the environment. Special issue, *Soil and Tillage Research*, 35, 1-113.
- Woolhiser D.A., Smith R.E., Goodrich, D.C., 1990 - KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manuel. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 p.
- Wösten J. H. M., 1997 - Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: Gregorich, E. G., Carter, M. R., editors. *Developments in Soils Sciences*. Amsterdam: Elsevier. 221-245.

Figure 3: Cartographie des risques de tassement des sols relatifs à la culture du maïs en France métropolitaine (sauf Corse). Le risque de tassement correspond au pourcentage d'années (entre 1970 et 1999) présentant, lors de la période de récolte du maïs, plus de deux jours sur trois, un sol avec une teneur en eau susceptible d'entraîner, en cas de passage d'engins, un tassement sévère sur 0-30 cm. Source: Lefebvre, 2010.

Figure 3: Map of the compaction risks related to maize harvest, for the French (metropolitan area, except Corsica). Compaction risk is defined by the proportion of years (over the period 1970-1999) with, during maize harvest period, more than two days over three with a soil whose water content is too high (i.e. likely to be severely compacted by wheeling).

