



DEGRADATION PHYSIQUE DES SOLS AGRICOLES ET FORESTIERS LIEE AU TASSEMENT : IMPACT, PREVISION, PREVENTION, SUIVI, CARTOGRAPHIE

SOIL PHYSICAL DEGRADATION DUE TO COMPACTION: IMPACT, PREDICTION, PREVENTION, MONITORING, MAPPING

Programme **GESSOL** RAPPORT DE FIN DE CONTRAT

Guy RICHARD de recherche
INRA
Centre de Recherche d'Orléans - Unité de Science du Sol
2163 Avenue de la Pomme de Pin - CS 40001 ARDON
45075 ORLEANS Cedex 2 - France
Tel: +33 (0)2 38 41 78 41 - Fax: +33 (0)2 38 41 78 69
Courriel : Guy.Richard@orleans.inra.fr

Date : 01/12/2008

N° de contrat : CV 05000013
Date du contrat : 25/05/2005

TABLE DES MATIERES

SYNTHESE	3
Contexte général : Quelle situation, quels enjeux motivent ce projet ?	4
Organisation et objectifs généraux du projet DST	6
Quelques éléments de méthodologie	7
Résultats obtenus	7
Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation.....	14
Partenariat.....	16
Liste des sigles et acronymes	18
Liste des opérations de valorisation issues du contrat (articles, participations à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...).....	19
RESUMES	29

SYNTHESE

DEGRADATION PHYSIQUE DES SOLS AGRICOLES ET FORESTIERS LIEE AU TASSEMENT : IMPACT, PREVISION, PREVENTION, SUIVI, CARTOGRAPHIE

PROGRAMME GESSOL

Responsable scientifique du projet : Guy RICHARD (INRA)

CONTEXTE GENERAL : QUELLE SITUATION, QUELS ENJEUX MOTIVENT CE PROJET ?

La préservation des ressources naturelles est l'un des domaines de recherche en lien avec la problématique du développement durable. Parmi ces ressources, le sol occupe une position particulière de par ses fonctions à la fois agronomiques (produire en quantité et en qualité) et environnementales (épurer l'air en stockant du carbone, épurer l'eau en dégradant les polluants, recycler des déchets ménagers et industriels). Les sols étant une ressource non renouvelable à l'échelle humaine, de nombreuses questions se posent aujourd'hui quant à leur évolution et à leur possible dégradation en fonction des changements d'usage et de climat à venir. Les principales questions de recherche concernent l'évaluation de l'intensité des dégradations et de leurs conséquences à la fois environnementales et économiques et l'identification de propositions, techniques ou économiques, en vue de limiter ces dégradations.

Le tassement des sols : une question qui redevient d'actualité

Le tassement des sols est avec l'érosion un processus majeur de dégradation physique des sols en Europe (cf. communication sur la protection des sols). Une superficie de 33 millions d'ha serait actuellement concernée en Europe, soit 4 % des terres, (contre 12 % pour l'érosion hydrique). Le tassement est dû à la mécanisation de l'activité agricole et forestière qui implique des passages d'engins de plus en plus lourds lors des opérations agricoles et sylvicoles : travail du sol, semis, épandage et récolte. De nombreuses études conduites jusqu'au début des années 1990 ont permis d'en évaluer les conséquences sur la production agricole. Depuis quelques années, on assiste à un renouvellement de l'intérêt porté à ce problème par l'ensemble des acteurs de l'agriculture, de la sylviculture et de l'environnement et à une modification de la façon de l'aborder.

- Il concerne désormais l'ensemble des sols français du fait de la généralisation de la mécanisation : grandes cultures, vignoble et forêt.
- Outre la baisse de la production, par ailleurs encore mal connue sous forêt et sous vigne, ses conséquences concernent aussi l'environnement : lessivage du nitrate, cycle des matières organique et émissions de N₂O, ruissellement et érosion.
- Son occurrence conditionne certains éléments des systèmes de culture qui influent sur l'environnement comme l'intensité du travail du sol. On cherche aujourd'hui à réduire le travail du sol pour augmenter le stock du carbone dans les sols. Or, cela n'est possible que dans des situations où les tassements sont peu marqués et où il est possible de se passer de la fragmentation par les outils.
- Enfin, sa prévention reste délicate. Des mesures radicales comme la mise en place de cloisonnement en forêt ou bien du « controlled traffic » en agriculture sont envisagées. Elles risquent d'avoir de lourdes conséquences financières en matière d'équipement et de surface agricole non productive. Aussi faudrait-il pouvoir identifier les systèmes et les conditions pédoclimatiques à risque et définir des zones prioritaires en vue d'appliquer de telles mesures.

Le tassement des sols : un processus complexe de dégradation des sols

Tous les acteurs de l'agriculture et de l'environnement perçoivent que le tassement des sols pose un problème de durabilité des écosystèmes cultivés et forestiers. Cependant, l'évaluation de ses conséquences et de son coût, tout comme la définition de la notion de sol « trop » tassé ou de sol « dégradé » restent difficiles car :

- Si le tassement est défini communément comme une diminution de la porosité, il est plus difficile de qualifier un sol de « tassé » : niveau de porosité structurale, épaisseur de sol concernée, résistance à la déformation, vitesse de transferts ? Cela dépend des processus auxquels on s'intéresse ;
- Le tassement est très variable spatialement : (1) à l'échelle d'une parcelle où il concerne rarement l'ensemble de la surface mais seulement des bandes de la largeur des roues des engins, (2) pour un ensemble de parcelles, son intensité dépend des engins utilisés et des conditions de leur utilisation ;
- La porosité des sols évolue en permanence sous l'effet de l'action du climat et de l'activité biologique du sol. La vitesse à laquelle la porosité du sol se reconstitue naturellement est à prendre en compte pour évaluer les risques de tassement, notamment en système de non travail du sol (semis direct, forêt).
- Les conséquences du tassement sont multiples et toujours indirectes (absence de relation directe tassement/rendement). Elles peuvent être compensées par certaines techniques culturales (irrigation), d'où une grande difficulté à définir si le sol est dégradé ou non.

Le tassement des sols : état de l'art

Concernant les conséquences, de nombreuses références expérimentales ont été obtenues sur les variations des rendements des cultures en fonction du niveau de tassement des horizons de surface ou en deçà de la profondeur maximale de travail. Des réductions de plus de 30% ont été mesurées en années sèches sur maïs, et ceci parfois pendant plus de 10 ans après l'épisode de tassement. Par contre, les effets des tassements sur l'érosion, les émissions de gaz à effet de serre et l'activité biologique ont été beaucoup moins étudiés.

Concernant la prévision, différents modèles de déformation du sol basés sur la mécanique des milieux continus permettent de prévoir le niveau de tassement du sol suite à un passage d'engin en fonction des propriétés mécaniques du sol. Cependant, trois principaux problèmes subsistent : (i) la prise en compte des effets des conditions d'humidité du sol, (ii) l'application à des sols cultivés à structure souvent hétérogène, (iii) le paramétrage en fonction du type de sol, notamment en France où très peu de mesures mécaniques sont disponibles. La synthèse des corrélations proposées pour exprimer les variations des propriétés mécaniques en relation avec les caractéristiques des sols (texture, % carbone, pH, teneur en eau) reste à réaliser à partir des études conduites en géotechnique et dans le domaine agricole.

Concernant la prévention, trois grands types de prévention des tassements ont déjà été bien identifiés :

- Eviter les situations à risque via des choix stratégiques concernant les cultures (suppression des cultures qui exigent du matériel lourd à utiliser en conditions humides), les équipements (pour limiter au maximum la contrainte exercée au niveau du sol), les pratiques (suppression du labour avec roulage en fond de raie), les variétés (à cycle court par exemple pour les cultures d'été) ;
- Localiser de façon pérenne les tassements dans les parcelles ;
- Choisir les jours durant lesquelles on intervient avec un engin en fonction de la teneur en eau du sol pour éviter les tassements sévères.

L'outil permettant de préconiser le type de prévention « stratégique » le plus adapté à des conditions données reste à construire à partir des modèles de prévision des tassements et de

leurs conséquences. En ce qui concerne des choix « tactiques », une équipe allemande a mis au point un logiciel (appelé « ProFor ») qui permet d'évaluer les tassements en forêt pour une typologie des sols, des engins et en tenant compte de l'état hydrique du sol. On pourrait aller plus loin en matière de prévention en valorisant les prévisions météorologiques. En effet, on dispose désormais de prévisions météorologiques qui, grâce aux modèles de fonctionnement hydrique du sol, peuvent nous permettre de prévoir l'évolution de la teneur en eau dans le sol sur une semaine. Cela permettrait aux agriculteurs et aux forestiers d'organiser leur planning de travail.

Concernant le suivi du tassement, la lourdeur des méthodes actuelles de caractérisation des sols et leur caractère destructif (profils cultural et racinaire, masse volumique, conductivité hydraulique à saturation, ...) limite notre capacité à étudier l'évolution de la structure des sols. Le développement des méthodes géophysiques en science de l'environnement représente une nouvelle voie métrologique à explorer. Les méthodes électriques et magnétiques sont a priori sensibles à l'état physique d'un sol et elles permettent des mesures rapides, spatialisées et non destructives. Leur utilisation pour la caractérisation des premiers centimètres du sol est à tester.

Concernant la cartographie de la sensibilité des sols au tassement, les cartographies ont été réalisées à partir de deux types d'information :

- La déformabilité du sol en fonction de sa texture évaluée à dire d'expert (carte européenne de la « subsoil compaction »).
- La pression de préconsolidation du sol estimée par classe de taux d'argile à un potentiel de l'eau donné (carte de portance des sols des Pays-Bas).

Une cartographie plus fine des risques de tassement est possible en spatialisant un modèle de fonctionnement hydrique et les teneurs en eau critiques à ne pas dépasser pour éviter le tassement des sols.

ORGANISATION ET OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET DST

L'objectif du projet DST (Dégradation des Sols liée au Tassement) était d'évaluer les risques de dégradation des sols liée au tassement. Pour cela, l'ensemble des connaissances actuelles a été mobilisé et de nouvelles voies de recherche ont été explorées en vue de définir des indicateurs de la dégradation des sols, de produire des outils de prévision et de cartographie des risques, et de proposer des moyens de prévention. Le projet DST a réuni des compétences concernant la caractérisation du sol et de son évolution et le fonctionnement du système sol/plante. Il a couplé des approches biophysiques et économiques en privilégiant une méthodologie basée sur la modélisation (Figure 1). Il a bénéficié d'expériences de terrain acquises dans des conditions relativement variées. Les laboratoires de recherche qui ont pris part au projet travaillent en agriculture, en géophysique ou en génie civil et sont spécialisés dans la caractérisation et modélisation, spatialisée ou non, du fonctionnement physique du sol et du système sol/plante. Enfin, le projet a associé des laboratoires de recherche et des organismes « professionnels » en charge des principales productions (grandes cultures, vigne et forêt).

Le projet a été organisé en cinq volets :

1. quantification des conséquences des tassements sur l'environnement : qualité des eaux, de l'air, érosion et activité biologique des sols ;
2. modélisation de l'intensité des tassements des sols en fonction des systèmes de culture et du climat ;
3. 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 ;

4. étude de l'évolution des tassements à partir de méthodes géophysiques ;
5. cartographie des risques de tassement des sols à l'échelle nationale.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE

Pour les volets 1, 2, 3 et 5, le projet DST s'est basé sur plusieurs modèles de simulation (modèles hydro-mécaniques et modèles de cultures). Nous avons cherché à paramétrer ces modèles sur de grands espaces en fonction de la nature du sol, du climat et des pratiques agricoles à partir de la littérature, d'enquêtes, éventuellement complétées par des mesures. La création d'environnement spécifique et leur intégration dans des SIG ont permis de faciliter leur mise en œuvre. Les modèles ont 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. Ces sites (notamment Mons, Avignon, Versailles, Boigneville, Epernay) nous ont permis de couvrir des types de sol sableux, limoneux et argileux, et différentes pratiques agricoles (travail du sol, couverture du sol, rotation...). C'est sur le site de Mons (sol limoneux de Picardie en système de grande culture) que les études les plus approfondies ont pu être conduites car nous disposons de la totalité des données nécessaires aux différents modèles. Il a été le site de référence du projet DST.

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 de la résistivité électrique, ont été caractérisées en fonction de la porosité du sol et de sa 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 cultural, 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 pour caractériser la régénération naturelle des volumes de sol tassés et pour fournir les références permettant d'adapter les modèles STICS et KINEROS à la problématique du tassement. En particulier, le modèle STICS a été utilisé pour élaborer des fonctions de réponse à l'azote des principales cultures du bassin parisien et de les faire varier en fonction du degré de tassement du sol. 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 suivi bien au-delà de la durée du projet DST.

RESULTATS OBTENUS

VOLET 1 : Impact agri-environnementaux des tassements

Le tassement a un effet très important à la fois sur la biomasse produite, sur les cycles de l'eau et de l'azote et sur l'érosion. Nous avons mis en évidence un seuil de masse volumique qui, pour le sol considéré, entraîne une variation significative du comportement du sol et des

plantes (masse volumique de la couche labourée de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, soit un indice des vides structuraux de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Les variations des propriétés hydrodynamiques du sol sont un point clé pour comprendre les effets du tassement. Nous avons également montré que si le changement climatique peut avoir des impacts potentiellement positifs sur le rendement des cultures de printemps en Picardie, celui-ci peut être compensé par les effets du tassement, sachant que l'accroissement de la pluviométrie saisonnière pourrait en accroître les risques.

Pour ce qui de l'activité biologique des sols tassés, nous avons montré, que la présence d'une structure du sol dégradée (i.e. dont la proportion de zones tassées dans la couche travaillée est plus importante) affecte différemment les espèces de vers de terre. 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.

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. Le tassement 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,...) et le fonctionnement des racines (diminution de la profondeur d'enracinement, de la densité de racines, de leur fonctionnement en conditions anoxiques).

VOLET 2 : Prévision des tassements

Estimation des contraintes appliquées à la surface 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 dont nous avons comparé les performances par rapport à six autres modèles, (2) une enquête conduite par les instituts techniques sur les équipements utilisés dans les différents systèmes de culture. Les principaux matériels utilisés par culture ont été recensés en fonction de la zone d'utilisation, du type d'intervention (semis, transport, récolte...) et de la période d'utilisation.

Estimation des paramètres mécaniques des sols

Nous avons établi un premier ensemble de fonctions de pédotransfert pour les propriétés mécaniques des sols français. Ce résultat repose sur la mise au point d'un protocole de mesure intégrant les spécificités du tassement en sols agricoles à la différence des normes Afnor pour la géotechnique. Dix sols représentant 25 horizons et répartis sur l'ensemble du triangle des textures ont été analysés. Pour chaque classe de texture, nous avons établi des relations statistiques entre la compressibilité du sol ou la pression de pré-consolidation et l'état physique du sol (masse volumique et teneur en eau). Par ailleurs nous avons étudié les effets de certaines pratiques culturales sur les propriétés mécaniques de sols : amendements basiques, exportation de paille, travail du sol. Ces études ont notamment permis de quantifier l'effet de la structure initiale 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 des sols liées au climat sur le comportement mécanique des sols. Pour certains états hydriques, la courbe de compression ne suit pas strictement le modèle logarithmique à deux pentes proposé généralement dans la littérature. Elle présente un point d'inflexion dont l'origine a pu être reliée aux processus de drainage (air, eau) grâce à des mesures de

perméabilité à l'air et par des mesures de la succion in situ au cours de la déformation. Enfin, ces études ont montré qu'en contextes agricoles et forestiers, les modèles de déformations du sol en contrainte totale (et non pas en contrainte effective comme ceux utilisés en géotechnique) suffisent à rendre compte des déformations observées.

Modélisation des déformations du sol

Plusieurs études ont contribué à améliorer la modélisation 2D du tassement. La première étude consiste en une généralisation du modèle COMPSOIL monodimensionnel à un nouveau modèle SOILFLEX bidimensionnel et intégrant l'ensemble des références actuelles sur les modèles semi-analytiques. 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). Les conditions à la limite supérieure sont décrites de façon sommaire dans les modèles numériques. Nous avons proposé un nouveau formalisme qui 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. 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'ornière à l'aide du code de calcul LAGAMINE). 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 (programme CARTOPAILLE de la Région Picardie). 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). 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.

Nous avons enfin cherché à évaluer l'incertitude des prévisions de tassement 1D par le modèle COMPSOIL. Une application informatique nous a permis :

(1) d'étudier l'effet des incertitudes sur les paramètres mécaniques du sol (mesurés directement ou estimés indirectement à partir de règles de pédotransfert établies dans le cadre du projet DST) et sur la masse volumique initiale du sol (juste avant le tassement). Cette analyse repose sur une confrontation avec des données de masse volumique mesurées in situ après un test de tassement (8 essais). Elle montre que les prévisions obtenues à partir de règles de pédotransfert sous-estiment le tassement par rapport aux prévisions réalisées à partir de mesures directes. Ceci étant, ces écarts sont comparables à ceux obtenus avec des mesures de tassement in situ.

(2) de proposer des seuils critiques de teneur en eau basés sur une diminution de l'indice des vides structuraux après tassement. Ces seuils peuvent facilement être calculés en fonction de la charge appliquée et du type de sol. Une mesure de l'indice des vides texturaux et de sa variation avec la teneur en eau a été réalisée sur 10 horizons de sol à partir de courbes de retrait d'agrégats de 2-3 mm de diamètre. Le critère « indice des vides structuraux » vient

compléter d'autres indicateurs de l'intensité du tassement de la littérature (point S, masse volumique relative, « packing density »).

VOLET 3 : Prévention des tassements

Nous nous sommes focalisés sur le développement d'un outil d'aide à la décision permettant d'améliorer les décisions d'interventions agricoles ou sylvicoles à partir d'une estimation de la teneur en eau fournie par un modèle de transfert hydrique. L'enjeu du travail concerne les moyens d'adaptation du modèle à une situation culturale donnée pour obtenir, à un coût raisonnable, une précision suffisante sur la teneur en eau estimée.

Cas des sols nus

Parmi les différentes entrées des modèles de transferts hydriques dans les sols nus, l'estimation des propriétés hydrodynamiques, les conditions initiales et les conditions à la limite inférieure sont apparues comme les points les plus critiques. Ces données fortement variables dans l'espace et le temps ne peuvent être mesurées qu'à un coût élevé. Des stratégies de mise en œuvre ont donc été développées pour contourner cette absence de mesure et exploiter au mieux des informations facilement accessibles telles que la granulométrie, la masse volumique, la teneur en matière organique et les mesures climatiques standard (précipitations et demande climatique). Le travail a permis de proposer un protocole de mise en œuvre : utilisation de la fonction de pédotransfert de Wösten (1997) pour estimer les propriétés hydrodynamiques, choix du flux gravitaire comme condition limite inférieure et définition d'un protocole d'initialisation. Nous l'avons appliqué à plusieurs contextes culturels permettant de confronter les simulations aux mesures. Il ressort qu'au final, la précision obtenue sur la teneur en eau est d'environ $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ sur des sols cultivés (plusieurs modalités de travail du sol ont été considérées dans l'étude).

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 laboratoire sur échantillon non remanié) 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.

Concernant l'assimilation de données de teneur en eau, nos résultats montrent que l'inversion du modèle TEC pour obtenir des propriétés hydrodynamiques conduit à une amélioration des résultats. La précision obtenue sur l'humidité devient inférieure à $0,025 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (donnée par un écart-type). Ce résultat est obtenu avec une mesure tous les 15 jours et n'est guère amélioré si on double la fréquence de mesures. Les résultats obtenus par des techniques de filtrage (les données mesurées sont utilisées pour recalibrer le champ des variables de sortie) sont quant à eux plus décevants. Cela vient en grande partie des simplifications faites au niveau du filtre, qui pour des raisons de limitation du temps de calcul, a été estimé avec des hypothèses très frustrées. Une marge d'amélioration forte est possible avec l'amélioration des filtres.

L'efficacité offerte par la simulation de la teneur en eau pour la prise de décision 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 « état de l'art » représentant le processus actuellement suivi par les agriculteurs pour évaluer l'état hydrique des sols a été défini. Dans ce scénario, la possibilité de rentrer dans une parcelle est déterminée par un délai après une pluie optimisée pour chacun des sols. Nous montrons que la simulation de la teneur en eau sans assimilation de données de teneur en eau permet une légère diminution du taux d'erreur par rapport à des approches plus empiriques du type

« nombre de jours après une pluie ». 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) et pour lesquels les taux d'erreurs peuvent dépasser 60 %.

Cas des couverts forestiers

Nous montrons que le modèle MIN3P (qui est un modèle 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 faites 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 avec la présence de la végétation dans les couverts forestiers. Nous nous sommes donc limités à établir des fonctions empiriques qui simulent la vitesse de ressuyage des horizons de surface.

Conclusion

Les résultats obtenus dans ce travail nous conduisent à proposer une action de valorisation (en lien avec les organismes de transfert vers la profession agricole) avec le développement d'un outil d'aide à la décision pour les interventions culturales. Une des composantes importantes de cet outil est la simulation de la teneur en eau selon les principes mis au point dans ce travail. La démarche sera étendue au cas des couverts végétaux pour permettre d'améliorer la connaissance de l'état hydrique en période de récolte.

VOLET 4 : Suivi des tassements

Intérêt des approches géophysiques pour la détection et le suivi des volumes de sol tassé

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. La détection de l'épaisseur de sol concerné par le tassement est d'autant plus facile que des suivis en conditions sèches et humides sont réalisés (conformément aux résultats acquis au laboratoire). En cas de travail du sol au niveau de la bande tassée, une tomographie 3D de la couche travaillée permet de localiser les volumes d'agencement hétérogène de fragments terreux de différents diamètres issus de la fragmentation du volume de sol tassé. Par contre, la quantification des diamètres des fragments n'a pas été possible. Un test conduit en aveugle est en cours pour définir, en conditions réelles d'utilisation (c'est-à-dire avec peu d'informations *a priori*) la précision à attendre sur la caractérisation de la structure à partir des méthodes électriques.

Les difficultés de prospection en conditions sèches nous ont conduit 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.

Les prospections magnétiques réalisées sur l'ensemble des sites du projet DST ont permis de mettre en évidence que certains sites présentent une structure pseudo-périodique des anomalies magnétiques sous la forme d'hétérogénéités longitudinales très localisées et séparées d'une distance de l'ordre de 2 m. Elles pourraient révéler des tassements anciens occasionnés par les labours. Les sites de Limoron et de Boigneville sont apparus les plus favorables car exempts d'une forte densité d'artefacts ferreux et d'activités humaines motorisées à proximité. Le tassement contrôlé réalisé sur le site de Limoron a été identifiable pendant les trois ans qui ont suivi le tassement. Des analyses et observations complémentaires sont en cours pour déterminer la source de ces anomalies.

Les cartographies réalisées sur les sites forestiers, bien que réalisées avec un protocole moins rigoureux du fait des conditions de terrain, permettent encore d'imager les zones tassées. Néanmoins, compte tenu de l'importance des ornières, le rôle de la microtopographie doit être 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 discerner les sites. 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.

Intensité des mécanismes de régénération de la porosité d'un sol tassé

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 et les endogés sont plus efficaces, respectivement, sous la semelle de labour et au sein de la couche labourée. En terme de propriétés, la capacité d'infiltration d'un sol initialement tassé retrouve son niveau d'avant tassement après 15 mois d'activité des vers de terre.

Concernant la régénération des sols tassés sous l'effet du climat, la fissuration a été étudiée sur le même site 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. Cinq années après la réalisation d'un 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 termes 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.

Le suivi du tassement en sols forestiers

Deux sites expérimentaux, en sols plus ou moins acides, ont été mis en place pour étudier des impacts du tassement sur la croissance des peuplements et sur la dynamique de régénération des sols, favorisée ou non par une action anthropique : amendement en milieu acide pour favoriser l'activité biologique du sol (macrofaune), et travail du sol. Les sites retenus sont (a) la forêt de Grand-Pays à Clermont-en-Argonne (55) et (b) la forêt des Hauts-Bois à Azerailles (54). Les plans expérimentaux des Hauts-Bois et de Grand-Pays sont identiques à l'exception d'un chaulage pour Grand-Pays et d'un travail localisé du sol par potets pour Hauts-Bois. Ils comprennent : 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).

Les actions menées par les différents partenaires du projet DST, après le tassement ont permis d'identifier les meilleurs indicateurs (i.e. les plus efficaces) du tassement dans un tel contexte : les mesures de masse volumique, conductivité hydraulique à saturation, résistance mécanique à la pénétration, résistivité électrique, l'observation d'un profil cultural et la végétation (notamment sur Hauts-Bois). Une caractérisation des systèmes racinaires et de l'activité biologique du sol (lombriciens) et de la microflore a été également entreprise. Des appareils de mesure ont été également 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.

Les premiers résultats concernent le suivi de la végétation. Quelques mois après le tassement, nous avons observé un changement total de végétation : développement des ronces en placeaux non tassés et des joncs en placeaux tassés. Cela montre la rapidité avec laquelle les conditions de sol évoluent après le tassement et la rapidité avec laquelle la végétation s'y adapte.

VOLET 5 : 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 zones géographiques d'utilisation des matériels ont été définies en utilisant les données du recensement agricole 2000 et l'expertise des instituts techniques. Cela a permis de réaliser une cartographie des contraintes selon deux zonages, un pour les grandes cultures, un 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 de difficultés à obtenir des données spatialisées que l'on puisse relier aux critères de mécanisation définies par expertise (ONF, IFN).

La mise au point d'une méthodologie 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 le sol sera considéré comme tassé, (3) l'estimation du nombre de jours aux périodes d'intervention où la teneur en eau du sol dépasse cette teneur en eau critique. Nous avons choisi de travailler sur le maïs pour mettre au point la méthodologie. Pour déterminer l'évolution dans le temps de la teneur en eau, nous

utilisons le modèle de culture STICS afin de tenir compte des prélèvements d'eau de la culture sur cette évolution. Nous avons estimé les paramètres « sol » de STICS décrivant les propriétés hydriques des sols pour l'ensemble des sols français à partir d'une procédure d'inversion numérique basée sur de simulations de teneurs en eau réalisées par un modèle mécaniste (modèle HYDRUS). Des fonctions de pédotransfert d'estimation des autres paramètres du sol ont été mises au point à partir de la base de données géographique des sols de France à 1/1 000 000 (BDGSF). 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.

Pour déterminer les teneurs en eau critiques, nous avons regroupé les types de sol de la BDGSF en 30 groupes de sol dont les propriétés mécaniques ont été estimées à partir des sols de référence étudiés dans le volet 2. Le modèle Compoil est ensuite utilisé pour déterminer pour chacun des 30 groupes les teneurs en eau critiques. Dans un premier temps, nous avons utilisé un paramétrage par défaut pour les teneurs en eau critiques, à savoir la teneur en eau à la capacité au champ. Ces teneurs en eau critiques sont ensuite utilisées pour déterminer le nombre de jours pour chaque période d'intervention où il y a un risque de tassement pour les couches 0-10 cm et 10-30 cm. Pour chaque année climatique et chaque période d'intervention, on calcule alors des statistiques sur le nombre de jours à risque. On caractérise ensuite chaque zone 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 à un nombre de jours à risque de plus de 33 ou 66 %. 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 sur 0-10 cm ou 10-30 cm dépasse 66 %. En rouge, ce sont les zones où ce risque apparaît plus de trois années sur quatre. Ces premiers résultats indiquent que les risques les plus élevés sont principalement localisés dans l'ouest de la France et sur la bordure est du Bassin Parisien. Il faut à analyser plus en détail en vue d'en comprendre l'origine.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

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

- La quantification des effets du tassement sur différents processus biophysiques, par mesures *in situ* et par modélisation : population de vers de terre, drainage, ruissellement et érosion, lixiviation du nitrate et émissions de gaz à effet de serre, en interaction avec les conditions climatiques. A noter un travail conduit sur les interactions entre changement climatique et tassement du sol qui montre que les effets du tassement sont du même ordre de grandeur que ceux du changement climatique. La limite de ces travaux concerne la non prise en compte de la diversité des types de sol. La méthodologie proposée est applicable à différentes conditions pédoclimatiques. Les modèles sont à paramétrer et à évaluer pour différents types de sol.
- La définition de la notion de sol tassé et de teneur en eau critique : il est proposé 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 $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ en sol limoneux). Cet indicateur vient compléter les références obtenues à partir de l'indice S de Dexter, de la Packing Density ou bien de la masse volumique relative. 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 :

- 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 qui est localisé dans la couche labourée a été estimée entre 3 à 5 ans dans un sol limoneux. Des références similaires seraient à établir en fonction du type 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 engendre un tassement sévère du sol (seuil d'indice des vides structuraux en dessous 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. Un paramétrage plus fin issu des travaux menés dans le cadre du volet 5 du projet DST est en cours de développement (thèse M.-P. Lefebvre, soutenance prévue fin 2009). Cette cartographie permettra d'identifier les zones les plus sensibles au tassement, en termes de combinaison : type de sol/climat/système de culture. Les limites concernent :
- l'absence de confrontation à des données mesurées. Il est prévu d'utiliser la base de données du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols pour apporter un premier élément de validation (thèse M.-P. Lefebvre) ;
 - la non prise en compte des sols forestiers. Un travail spécifique sur les sols forestiers reste à conduire, à partir du paramétrage d'un modèle comme BILJOU.
- 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. Un test en aveugle est actuellement conduit pour évaluer le degré d'opérationnalité de la méthode.
- La proposition d'un système d'avertissement agricole basé sur la prévision à cinq jours de la teneur en eau de sols à partir du modèle de transfert d'eau TEC. L'ensemble de la démarche a été testé avec succès. Il reste à le rendre opérationnel, tel est l'objectif du projet SOLUCION.

Les résultats et les méthodologies issus du projet DST apparaissent riches et répondent aux objectifs initiaux. Les résultats sont à consolider pour des conditions beaucoup plus diverses que celles qui ont été étudiées en cours de projet. D'une part, les partenaires du projet pourraient s'impliquer dans la généralisation des résultats obtenus. D'autre part, il est maintenant envisageable d'appliquer la méthodologie à d'autres formes de dégradation que le tassement (diminution du taux de matières organiques des sols). Le couplage biophysique/économique a été productif et demande à être poursuivi.

PARTENARIAT

Ci-après les participants au projet DST, avec les changements d'affectation, le cas échéant.

Nom	Organisme	Laboratoire	Changement en cours de projet
Jean ROGER-ESTRADE	AgroParisTech	UMR Agronomie Grignon	
Jérôme LABREUCHE	Arvalis	Boigneville	
Michel MARTIN	Arvalis	Estrées-Mons	Depuis 2006
Sébastien DEBUISSON	CIVC	Epernay	
Yu-Jun CUI	ENPC	CERMES Marne La Vallée	
Jacques RANGER	INRA	UPR BEF Nancy	
Daniel TESSIER	INRA	UPR Science du Sol Versailles	Jusqu'en 2006 (Retraite)
Véronique CHAPLAIN	INRA	UPR PESSAC Versailles	Depuis 2007
Yves LEFEVRE	INRA	UMR EEF Nancy	Depuis 2005
Frédéric GERARD	INRA	UMR BEF Nancy UMR R&S Montpellier	Jusqu'en 2006 (mutation) Depuis 2007
Nadine BRISSON	INRA	UMR CSE Avignon US Agroclim Avignon	Jusqu'en 2006 (mutation) Depuis 2007
André CHANZY	INRA	UMR CSE Avignon UMR EMMAH Avignon	Jusqu'en 2007 Depuis 2008 (nouvelle unité)
Yvan CAPOWIEZ	INRA	UMR LEI Avignon	Jusqu'en 2007 (Mutation)
	INRA	UPR PSH Avignon	Depuis 2008
Hubert BOIZARD	INRA	UPR Agronomie Laon-Reims-Mons US Agro-Impact Laon-Mons	Jusqu'en 2007 Depuis 2008 (nouvelle unité)
Joël LEONARD	INRA	UPR Agronomie Laon-Reims-Mons US Agro-Impact Laon-Mons	Jusqu'en 2007 Depuis 2008 (nouvelle unité)
Bruno MARY	INRA	UPR Agronomie Laon-Reims-Mons US Agro-Impact Laon-Mons	Jusqu'en 2007 Depuis 2008 (nouvelle unité)
Pauline DEFOSSEZ	INRA	UPR Agronomie Laon-Reims-Mons UMR FARE Reims	Jusqu'en 2007 (mutation) Depuis 2008
Guy RICHARD	INRA	UPR Agronomie Laon-Reims-Mons	Jusqu'en 2005 (mutation)

		UPR Science du Sol Orléans	Depuis 2005
Isabelle COUSIN	INRA	UPR Science du Sol Orléans	
Odile DUVAL	INRA	UPR Science du Sol Orléans	
Dominique ARROUAYS	INRA	US INFOSOL Orléans	
Christine LE BAS	INRA	US INFOSOL Orléans	
Emmanuel LEVEQUE	ITB	Paris	Jusqu'en 2006 (Départ)
Cédric ROYER	ITB	Paris	Depuis 2007
Alain BRETHERS	ONF	Orléans	
Michel BARTOLI	ONF	Paris	Jusqu'en 2006 (Retraite)
François LEVEQUE	Université de La Rochelle	La Rochelle	
Philippe COSENZA	Université Paris VI	UMR SISYPHE Paris	
Alain TABBAGH	Université Paris VI	UMR SISYPHE Paris	
Jeanne TABBAGH	Université Paris VI	UMR SISYPHE Paris	

A ce consortium initial, se sont ajoutés en cours de projet :

- Annie DUPARQUE, AgroTransfert Picardie, Estrées-Mons,
- Olivier ANCELIN de la Chambre d'Agriculture de la Somme.

A. Duparque s'est impliquée dans le projet SOLUCION. O. Ancelin s'est impliqué dans l'évaluation de nouvelles méthodes de diagnostic de l'état structural des sols. Ils mettent en place une action sur la gestion de la qualité physique des sols en Picardie, action coordonnée par Agrotransfert.

Pierre-Alain JAYET, INRA UMR Economie Publique, a rejoint le consortium dans el cadre du projet financé par le programme ADD de l'ANR afin de réaliser une étude des conséquences économiques des tassements.

A la suite du projet DST, le projet de base de données sur les propriétés physiques fonctionnelles des sols français (projet PePSOL) a été initié. Il s'est étendu à d'autres unités Inra que celles présentes dans DST : UMR SAS Rennes, UMR LISAH Montpellier, UMR EGC Grignon. Ce projet a vocation à s'élargir ensuite à tous les organismes de recherche français.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

Acronymes de modèles ou de programmes

AROPAJ	Modèle économique
BILJOU	BILan JOUrnalier - modèle de bilan hydrique sous forêt
COMP SOIL	COMPAction of SOIL – modèle de tassement
FEM	Finite Elements Model
FISSEL	FISsure Électrique – modèle de résistivité électrique
HYDRUS	Modèle de transfert hydrique
Kineros2	Kinematic Runoff and Erosion Model – Modèle d'érosion
LAGAMINE	Modèle de déformation
MIN3P	Modèle couplé transfert - géochimie
PLAXIS	Finite element code for soil and rock analysis
SOILFLEX	SOIL FLExibility – modèle de tassement
STICS	Simulateur Multidisciplinaire pour les Cultures Standard
TEC	Transfert Eau- Chaleur : modèle couplé transfert de masse et d'énergie

Sigles d'organismes

CERMES	Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols
CIVC	Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne
IFN	Inventaire Forestier National
IPCC	International Program
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
ITB	Institut Technique de la Betterave
ONF	Office National des Forêts
SISYPHE	Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux

Autres sigles

GES	Gaz à Effet de Serre
OTEX	Orientation Technico-économique des Exploitations
SAU	Surface Agricole Utilisée
SIG	Système d'information géographique

Paramètres

q0	STICS, limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol (mm)
cfes	STICS, paramètre de décroissance de l'évaporation en fonction de la profondeur
zesx	STICS, profondeur maximale de sol affectée par l'évaporation (cm)
pc	pression de pré-consolidation
cc	indice de compression
cs	indice de gonflement

LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES, PARTICIPATIONS A DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Articles (A) à comité de lecture international – publiés/acceptés

1. Capowiez Y., Cadoux S., Bouchand P., Ruy S., Roger-Estrade J., Boizard H., Richard G., 200X. The influence of tillage type and compaction on earthworm communities in crop fields and consequences for macroporosity and water infiltration. *Applied Soil Ecology*, accepté.
2. Capowiez Y., Cadoux S., Bouchand P., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., 2009. Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment, *Soil Biology and Biochemistry*, accepté.
3. Chanzy A., Mumen M., Richard G., 2008. Accuracy of top soil moisture simulation using a mechanistic model with limited soil characterization. *Water Resources Research*, 44, W03432, doi:10.1029/2006WR005765.
4. Cui K., Défossez P., Richard G., 2007. A new approach for modelling vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict compaction of cultivated soils by using the PLAXIS code. *Soil and Tillage Research*, 95, 277-287. Doi: 10.1016/j.still.2007.01.010
5. Cui K., Défossez P., Cui Y.J., Richard G., 200X. Soil compaction due to traffic: Evolution of suction during compression. *European Journal of Soil Science*, accepté.
6. Défossez P., Keller T., Richard G., 2007. Compaction and compressibility. In: *Soil sampling and methods of analysis*, 2nd edition, Ed Gregorich, M. Carter (eds), CRC Press.
7. 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
8. 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.
9. Levrel G., Ranger J., 2006. Effet des substitutions d'essences forestières et des amendements sur les propriétés physiques d'un alocrisol. Site expérimental de la forêt de Breuil-Chenué, Morvan, France. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 71-88.
10. Pereira J., Défossez P., Richard G., 2007. Effect of direct drilling on soil susceptibility to compaction by wheeling. *European Journal of Soil Science*, 58, 1, 34-44. Doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00798.x.
11. Roger-Estrade J., Richard G., Dexter A., Boizard H., de Tourdonnet S., Bertrand M., Caneill J., 200X. Integration of spatial and temporal variations of soil structure into models for the design of crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development*, sous presse.
12. Saffih-Hdadi K., Défossez P., Richard G., Cui Y.-J., Tang A.M., Chaplain V., 200X An evaluation of the susceptibility of French surface layers soil to compaction at various water contents and bulk densities. *Soil and Tillage Research*, accepté, en révision.
13. Séger M., Cousin I., Frison A., Boizard H., Richard G., 200X. Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. *Soil and Tillage Research*, accepté, en révision.
14. Tabbagh J., Samouëlian A., Cousin, I., Tabbagh A., 2007. Numerical modelling of direct current electrical resistivity for the characterisation of cracks in soils. *Journal of Applied Geophysics*, 62, 4, 313-323. Doi: 10.1016/j.jappgeo.2007.01.004.
15. Tang A.M., Cui Y.J., Eslami J., Défossez P., 200X. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various agricultural soils. *Geoderma*, (sous presse).

Articles (A) à comité de lecture international – soumis

16. Baranger E., Jayet P.A., Roger-Estrade J., Richard G. Coupling a biophysical and micro-economic model to assess environmental and economic consequences of agricultural soil degradation due to compaction. *Agricultural Systems*, soumis.
17. Cui K., Défossez P., Cui Y.J., Richard G. Compaction of cultivated soils: compressibility at different soil suctions. *European Journal of Soil Science*, soumis
18. Souffaché B., Cosenza P., Flageul S., Pencolé J.-P., Seladji S., Tabbagh A. Electrostatic multipole for electrical resistivity measurements at the decimetric scale. *Journal of Applied Geophysics*, soumis.
19. Tang A.M., Cui Y.J., Richard G., Défossez P., A study on the air permeability of agricultural soils, *Soil and Tillage Research*, soumis.

Articles (A) à comité de lecture international – en préparation

20. Boizard H., Roger Estrade J., Défossez P., Richard G., Remediation of soil compaction by deep tillage. *Soil & Tillage Research*, à soumettre.
21. Boizard H., Capowiez Y., Léonard J., Cadoux S., Cousin I., Roger-Estrade J., Richard G., Dynamics of soil regeneration following compaction under the influence of climate and earthworms, *Soil Use and Management*, en préparation.
22. Brisson N., Richard G., Roger-Estrade J., Ripoche D., Mary B., Intérêt et limites de l'analyse de l'impact du tassement du sol par simulation : cas d'étude d'un site en Picardie (France). *Ecological modelling*, à soumettre.
23. Brisson N., Moulin C., Boizard H., Roger-Estrade J., Richard G., Prise en compte du tassement dans la gestion des systèmes de culture : étude par simulation pour un site en Picardie (France). *Agronomy for Sustainable Development*, en préparation.
24. Brisson N., Echeverria I., Huard F., Poids du tassement dans les impacts du changement climatique sur l'agriculture : étude par simulation pour un site en Picardie (France). *Agricultural Systems*, en préparation.
25. Capowiez Y., Cadoux S., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., Dynamics of soil regeneration by earthworms after a severe compaction event. *Soil Biology and Biochemistry*, en préparation.
26. Chaplain V., Défossez P., Dexter A.R. and Richard G., Tessier D., Does the pH influence soil hydro-mechanical properties? *Geoderma*, à soumettre.
27. Chaplain V., Défossez P., Roger-Estrade J., Tessier D., Soil mechanical strength to compaction in various agricultural systems. *Soil & Tillage Research*, en préparation.
28. Défossez P., Diserens E., Duboisset A., Evaluation of tyre contact area for agricultural tractors. *Soil & Tillage Research*, en préparation.
29. Défossez P., Richard G., Mary B., Estimating soil hydraulic regime and soil compaction as function of soil organic carbon content due to the straw exportation for energy production. *Geoderma*, à soumettre.
30. Le Bas C., Godin T., Défossez P., Levèque E., Boizard H., Debuisson S., Estimation de la pression exercée à la surface des sols par les engins agricoles et forestiers en France. *Etude et Gestion des Sols*, en préparation.
31. Lefebvre M.P., Richard G., Séger M., Cousin I., Duval O., Bornet F., Dexter A.R. Pedotransfer Functions for Water Retention and Hydraulic Conductivity that allow for the Effects of Compaction. *Soil Science Society of America Journal*, à soumettre.
32. Seladji S., Cosenza P., Alain Tabbagh A., Richard G., Experimental and theoretical investigation on the effect of compaction on the soil electrical resistivity. *European Journal of Soil Science*, à soumettre.

COLLOQUES INTERNATIONAUX

1. Adamiade V., Défossez P., Mary B., Richard G., 2006. Prediction of soil physical behavior according to organic carbon content in the context of straw exportation for energy production.

- 17th Conference ISTRO, Sustainability, its impact on soil Management and Environment, 28/08-3/09/2006, Kiel, Germany. 6 pp.
2. Baumgartl Th., Defossez P., Peth S., Horn R., Richard G., 2006. The effect of soil preparation on final soil strength. 17th Conference ISTRO, Sustainability, its impact on soil Management and Environment, 28/08-3/09/2006, Kiel, Germany. 6 pp.
 3. Boizard H., Roger-Estrade J., Capowiez 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.
 4. Boizard H., Capowiez Y., Léonard J., Cadoux S., Cousin I., Roger-Estrade J., Richard G., 2009. Dynamics of soil regeneration following compaction under the influence of climate and earthworms. 18th Conference ISTRO, 15-19/06/2009, Izmir, Turquie.
 5. Brisson N., Richard G., Roger-Estrade J., Boizard H., 2009. Modelling modification of soil structure to improve cropping systems simulation. Colloque "Modelling cropping systems", Wageningen.
 6. Capowiez Y., Bouchand P., Cadoux S., Pélosi C., Roger-Estrade J., Boizard H., Richard G. 2006. Demonstration of the role of earthworms on the removal of highly compacted zones in field conditions. 8th International Symposium on Earthworm Ecology, Cracovie, Pologne, du 3 au 11 septembre 2006 (communication orale)
 7. Capowiez Y., Cadoux S., Bouchant P., Boizard H., Roger-Estrade J., Richard G. 2006. How to evaluate the role of earthworms in the loss of highly compacted zones in field or semi-field conditions? 17th Conference ISTRO, Sustainability, its impact on soil Management and Environment, 28/08-3/09/2006, Kiel, Germany. 6 pp. (communication affichée)
 8. Chanzy A., Richard G., Boizard H., Defossez P., 2008. Relevance of using soil moisture simulation for farming decision support. EUROSOIL congress 2008, Soil, Society, Environment, 25-29/08/2008, Vienne, Autriche.
 9. Cousin I., Seger M., Giot G., Mahu F., Boizard H., Richard G., 2008. Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer in the field by 3D electrical resistivity measurements. EGU General Assembly, 13-18/04/2008, Vienne, Autriche.
 10. Cousin I., Séger M., Giot G., Mahu F., Boizard H., Richard G. 2009. Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer in the field by 3D electrical resistivity measurements. 18th Conference ISTRO, 15-19/06/2009, Izmir, Turquie.
 11. Cui K., Defossez P., Richard G., 2006. A new approach for modelling the vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict compaction of cultivated soils with PLAXIS model. 17th Conference ISTRO, Sustainability, its impact on soil Management and Environment, 28/08-3/09/2006, Kiel, Germany. 6 pp.
 12. Cui K., Defossez P., Cui Y.J., Richard G., 2007. Cultivated soil compaction by agricultural machines: suction evolution during compression. XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Madrid 2007
 13. Defossez P., Cui K., Cui Y.J., Richard G., 2008. Compaction of cultivated soils: compressibility according to soil suction. EUROSOIL congress 2008, Soil, Society, Environment, 25-29/08/2008, Vienne, Autriche.
 14. Godin T., Defossez P., Levêque E., Le Bas C., Boizard H., Debuisson S., 2006. Assessment of stress on soil surface induced by vehicle traffic in French agricultural and forestry systems. 69^{ème} congrès de l'IIRB, 15-16 février 2006, Bruxelles
 15. Keller T., Defossez P., Weisskopf P., Arvidsson J., Richard G., 2006. SoilFlex : A model for prediction of traffic-induced soil compaction including a synthesis of analytical approaches. 17th Conference ISTRO, Sustainability, its impact on soil Management and Environment, 28/08-3/09/2006, Kiel, Germany. 6 pp.
 16. Lefebvre M.-P., Richard G., Couturier A., Le Bas C., Arrouays D., Brisson N., 2008. A method to assess the risk of soil compaction in France using a soil water model. EUROSOIL congress 2008, Soil, Society, Environment, 25-29/08/2008, Vienne, Autriche.
 17. Lévêque F., Mathé V., 2006. Soil tillage impact on magnetic properties. 10th Castle Meeting, Paleo, Rock and Environmental Magnetism, Castle of Valtice, Czech Republic, 3 – 8/09/2006.

18. Pelosi C., Bertrand M., Roger-Estrade J., 2009. WORMDYN: A model of *Lumbricus terrestris* population dynamics in tilled and no tilled fields. 18th Conference ISTRO, 15-19/06/2009, Izmir, Turquie.
19. Richard G., Besson A., Aboubacar Sani A., Cosenza P., Boizard H., Cousin I., 2006. A new approach of soil structure characterisation in field conditions based on electrical resistivity measurements, 17th Conference ISTRO, Sustainability, its impact on soil Management and Environment, 28/08-3/09/2006, Kiel, Germany. 6 p. (communication orale).
20. Richard G., Besson A., Aboubacar Sani A., Accart V., Cosenza P., Boizard H., Cousin I., 2006. A new approach of soil structure characterisation in field conditions based on soil electrical resistivity measurements. 18th World Congress of Soil Science, 9-15/07/2006, Philadelphia. Résumé 1 p.
21. Richard G., Roger-Estrade J., Defossez P., Chanzy A., Cosenza P., Le Bas C., 2009. A French Research Program for Assessment of Soil Compaction risks. 18th Conference ISTRO, 15-19/06/2009, Izmir, Turquie. Résumé 1 p.
22. Roger-Estrade J., Baranger E., Jayet P.A., Richard., 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.
23. Seladji S., Cosenza P., Richard G., Boizard H., Souffaché B., Flageul S., Pencolé J.P., Tabbagh A., 2008. High-resolution electrostatic measurements for detecting compacted zones in a loamy cultivated soil. EGU General Assembly, 13-18/04/2008, Vienne, Autriche.
24. Séger M., Richard G., Chanet M., Boizard H., Duboisset A., Marionneau A., Cousin I., Bacconet C., Boissier D., 2008. In situ characterization of the structural heterogeneity of a compacted tilled soil by electrical and mechanical methods. EUROSIL congress 2008, Soil, Society, Environment, 25-29/08/2008, Vienne, Autriche. (poster)
25. Tang A.M., Cui Y.J., Eslami J., et Défossez P., 2007. Compaction properties of agricultural soils. Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Series: Springer Proceedings in Physics, Vol. 112. Schanz, T. (Ed.). ISBN: 978-3-540-69872-2. pp. 475-482.

COLLOQUES NATIONAUX

1. Baranger E., Jayet P.A., Roger-Estrade J., Richard G., 2007. Couplage STICS/AROPAJ. Dégradation physique des sols agricoles liée au tassement : conséquences économiques. Séminaire STICS, 20-22/03/2007, Reims. 4 p.
2. Boizard H., Lheureux S., Léonard J., Cousin I., Roger-Estrade J., Richard G., 2007. Evolution de la structure d'un sol limoneux en fonction des systèmes de culture : caractérisation et analyse de l'intensité de la fissuration. JNES, 9e Journées Nationales de l'Etude des Sols, Angers, 3-5/04/2007. AFES-INH.
3. Brêthes A., Lefèvre Y., Gelhaye D., Défossez P., Lévêque F., Ranger J., 2007. Installation de dispositifs pour le suivi à long terme des effets du tassement des sols forestiers consécutifs à la mécanisation des opérations sylvicoles. JNES, 9e Journées Nationales de l'Etude des Sols, Angers, 3-5/04/2007. AFES-INH.
4. Brisson N., Echeverria I., Huard F., Richard G., 2007. Impact du changement climatique sur les conséquences de la dégradation des sols par tassement (cas d'étude en Picardie). Séminaire STICS, 20-22/03/2007, Reims. 4 p.
5. Cui K., Défossez P., Cui Y.J., Richard G., 2007. Compactage des sols cultivés par les engins agricoles. Evolution de la succion au cours de la compression. JNES, 9e Journées Nationales de l'Etude des Sols, Angers, 3-5/04/2007. AFES-INH.
6. Cui K., Défossez P., Cui Y.J., Richard G., 2007. Tassement des sols agricoles : compressibilité en fonction de la succion. 32e Journées du GFHN, De la particule au milieu poreux, 21-22/11/07, Nantes. (oral)
7. Défossez P., Saffih-Hdadi K., Richard G., 2007. Estimation du tassement des sols agricoles en France à l'aide du modèle COMPSOIL : évaluation de l'incertitude des prévisions. 32e Journées du GFHN, De la particule au milieu poreux, 21-22/11/07, Nantes. (poster).

8. Lefebvre M.P., Richard G., Le Bas C., Chanzy A., Brisson N., 2007. Protocole d'estimation des paramètres INFIL, Q0, CFES, et ZESX pour différents sols par utilisation inverse du modèle STICS. Séminaire STICS, 20-22/03/2007, Reims.
9. Lefebvre M.P., Richard G., Duval O., Bornet F., Cousin I., 2007. Conséquences du tassement sur le fonctionnement hydrique des sols : effet de la variation de la masse volumique sur les propriétés hydrodynamiques. JNES, 9e Journées Nationales de l'Etude des Sols, Angers, 3-5/04/2007. AFES-INH.
10. Richard G., Boizard H., Roger-Estrade J., 2007. Etude comparative de 10 méthodes internationales de caractérisation visuelle de la structure des sols cultivés. JNES, 9e Journées Nationales de l'Etude des Sols, Angers, 3-5/04/2007. AFES-INH. (oral)
11. Richard G., Brisson N., Lebonvallet S., Ripoché D., Boizard H., Roger-Estrade J., Chanzy A., 2007. Eléments de description de la structure du sol introduits dans STICS. Séminaire STICS, 20-22/03/2007, Reims.
12. Richard G., Cosenza P., Aboubacar A., Tabbagh A., 2005. Etude des variations de résistivité électrique d'un sol limoneux en fonction de sa teneur en eau et de sa porosité. 5^e colloque GEOFCAN « Géophysique des sols et des formations superficielles », 20-21/09/2005, Orléans.
13. Saffih-Hdadi K., Défossez P., Cui Y.J., Chaplain V., Tessier D., Richard G., 2007. Estimation de la sensibilité des sols agricoles français aux tassements par les engins agricoles. JNES, 9^e Journées Nationales de l'Etude des Sols, Angers, 3-5/04/2007. AFES-INH.
14. Seladji S., Cosenza P., Richard G., Tabbagh A., 2007. Mesure et modélisation des variations de résistivité électrique d'un sol limoneux liées au tassement. 6^e colloque GEOFCAN, 25-26/09/2007, Bondy. 75-78. (oral)
15. Samouëlian A., Tabbagh J. Cousin I., Tabbagh A., 2005. Evaluation et analyse de sensibilité d'un modèle d'inversion de la résistivité en milieu fissuré. 5^e colloque GEOFCAN « Géophysique des sols et des formations superficielles », 20-21 septembre 2005, Orléans.

THESES

Thèses (T) publiées

1. Cui K., 2008. Vers une approche hydromécanique du comportement des sols cultivés : expérimentations et simulations. Thèse de doctorat de l'AgroParisTech, 21/04/2008. 107 p.
2. Mumen M., 2005. Caractérisation du Fonctionnement Hydrique des Sols à l'aide d'un Modèle Mécaniste de Transfert d'Eau et de Chaleur Mis en Œuvre en Fonction des Informations Disponibles sur le Sol. Thèse de doctorat de l'Université d'Avignon, 120 p.

Thèses (T) en cours

3. Goutal N. Effets de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers en termes de dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. Thèse de l'Université de Nancy, soutenance prévue en 2011.
4. Lefebvre M.P. Prévision spatialisée de la dégradation physique des sols à l'échelle nationale : confrontation aux données multi-locales du RMQS. Thèse de l'Université d'Orléans, soutenance prévue en 2009.
5. Seladji S. Caractérisation du tassement des sols agricoles et forestiers à l'aide de méthodes géophysiques. Thèse de l'Université Paris VI, soutenance prévue en 2010.

ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION

1. Ancelin O., Roger-Estrade J., Boizard H., Richard G., 2008. Deux méthodes pour un diagnostic rapide de l'état structural du sol. *Perspectives Agricoles* 349, octobre 2008. 38-41.
2. Bouchant P., Cadoux S., 2005. Lombriciens, systèmes de culture et structure du sol : Les vers de terre sont-ils capables de régénérer des sols compactés ? *Revue TCS*, 1 page.
3. Debuissou S., Perraud A., Panigai L., Moncomble D., 2007. Compaction et portance des sols du vignoble champenois : les contraintes exercées par la matériel. *Le Vignoble champenois*, n° 2, 50-66.

4. Duval O., Richard G., 2008. Surveiller la dégradation de la structure des sols. *Inra Magazine*, n°4, pp 8-9.
5. Perraud A., Debuissou S., Panigai L., Moncomble D., 2006. Compaction et portance des sols du vignoble champenois. *Le Vignoble champenois*, n° 6, 42-61.
6. Ranger, J., Lamandé, M., Lefèvre, Y. 2005. Perturbations au sol liées à l'exploitation forestière et conséquences pour l'écosystème. *RDV Techniques n°8 ONF*, pp 27-35.
7. Richard G., 2008. Surveiller la dégradation de la structure des sols. *Covalences*, n°67, pp12-13.
8. Viloingt T., Couture D., Bettes B., Richard G., 2005. Semis sous couvert d'une culture intermédiaire : la conduite de l'inter-culture a un impact sur les conditions de semis. *Perspectives Agricoles*, 320, pp 38-44.

AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS (CONFERENCES)

1. Debuissou, S., 2006. Le tassement des sols viticoles. Assemblée générale du Groupement de développement viticole de la Marne.
2. Debuissou, S., 2006. Le tassement des sols viticoles. Assemblée générale des viticultures biologiques de champagne.
3. Martin M., 2008. Diagnostic de la présence de tassement dans les sols de Santerre. Journées PotatoEurop, Mons en Chaussée. (poster)
4. Richard G., 2008. Les techniques de travail du sol simplifié, intérêts et limites. Colloque « Le sol, milieu vivant... Questions à la recherche », Salon international de l'agriculture, 26/02/2008, Paris. INRA. (communication orale)
5. Richard G., Cousin I., Duval O., Baize D., 2008. Mieux caractériser les sols pour les préserver, étude de la structure des sols cultivés. Conférence Les Mardis de la Science, 4 mars 2008, Muséum d'Orléans.
6. Richard G., 2008. Nouveaux repères pour le travail du sol. Conférence au Salon Innov-Agri à Outarville (45) le 3/09/2008.

ENSEIGNEMENT - FORMATION

1. Brêthes A., Ranger J., Lefèvre Y., 2007. Tournée du réseau R & D de l'ONF, 21-22 mai 2007. Le site expérimental des Hauts-Bois, commune d'Azerailles.
2. Brêthes A., 2007. Formation ONF « Gestion conservatoire des sols » : 2007
3. Debuissou S., 2006. Le tassement des sols viticoles : démonstration de matériel sur le site expérimental de Plume-CoQ.
4. Debuissou S., 2006. Le tassement des sols viticoles : démonstration de matériel à Essoyes.
5. Debuissou S., 2006, 2007, 2008. Le tassement des sols viticoles. BTS, Lycée viticole d'Avize.
6. Debuissou S., 2007. Le tassement des sols viticoles. Réunion de viticulteurs, Epernay.
7. Debuissou S., 2007. Le tassement des sols viticoles. Réunion de viticulteurs, Sancerre.
8. Debuissou S., 2007. Le tracteur enjambeur et le tassement des sols viticoles. Réunion des livreurs, Société Feuillate, Chouilly.
9. Défossez P., 2008. Structure des sols cultivés. Intervention dans le cadre de la spécialité « agronomie » du Master Recherche (M2) « Sciences et Techniques du Vivant et de l'Environnement ». AgroParisTech.
10. Ranger J., 2008. Contrainte physique et fonctionnement des écosystèmes forestiers. Partie du module Terrain du Master II CGSE UHP Nancy.
11. Richard G., 2005, 2006. Système de culture et fonctionnement physique des sols cultivés. Application au dispositif de suivi de la qualité des sols. Intervention dans le cadre de la spécialité « agronomie » du Master Recherche (M2) « Sciences et Techniques du Vivant et de l'Environnement ». AgroParisTech.
12. Richard G., 2006, 2007, 2008. Travail du sol et tassement des sols cultivés. Master 2 Professionnel « Sciences et Technologies Géo-hydrosystèmes continentaux en Europe ». Université de Tours.

13. Richard G., 2008. Evolution des caractéristiques des sols sous forêt et sous cultures: causes de ces évolutions et conséquences sur les fonctions écologiques des sols. Master 2, Agrocampus-Ouest, Rennes.

METHODOLOGIES (GUIDES, LIVRABLES)

Livrables de résultats (L)

Volet1

1. Création d'un ensemble de scénarios sol/climat/cultures/paysage pour l'étude des tassements
2. Evaluation de la capacité des fonctions de pédo-transfert de Wösten, Vereecken et Assouline à prévoir l'effet de la masse volumique sur les variations de propriétés hydrodynamiques des sols
3. Paramétrage de STICS pour différents niveaux de tassement du sol de Mons
4. Intégration, au sein de STICS, d'un module d'évolution de la masse volumique du sol liée au tassement et au travail du sol et d'un module de définition des dates de semis et de récolte en fonction de l'état du système sol/plante/atmosphère
5. Evaluation de la variation de la résistance à l'érosion liée à la masse volumique du sol. Paramétrage de KINEROS pour différents niveaux de tassement du sol de Mons
6. Etude par simulation des effets du tassement sur le ruissellement et l'érosion : modèle KINEROS
7. Méthode de prélèvement des vers de terre in situ en situations labourée ou non, tassée ou non et acquisition d'un jeu de données de validation d'un modèle démographique des populations de vers de terre en parcelle cultivée
8. Quantification de la mortalité liée au tassement et identification de l'interaction espèce/réaction aux zones tassées : semelle de labour surtout perforée par les vers anéciques, zones tassées au sein de la couche labourée évitées par les vers anéciques et explorées par les vers endogés
9. Courbes de réponse à l'azote de différentes grandes cultures en fonction du niveau de tassement du sol pour le couplage STICS/AROPAj
10. Contribution de l'économie publique à l'évaluation des effets publics et privés du tassement des sols agricoles
11. Synthèse des effets du tassement

Volet2

12. Création d'une base de données spatialisées des engins agricoles utilisés en France et de leurs conditions d'utilisation en fonction des systèmes de culture et des régions
13. Proposition d'une feuille de calcul de la contrainte exercée à l'interface sol/pneu
14. Evaluation de la précision des fonctions de pédo-transfert de Wösten et Vereecken à partir de la base de données SOLHYDRO
15. Paramétrage du modèle STICS en vue de simuler l'évolution de la teneur en eau lors des opérations culturales en fonction de (1) la teneur en carbone de la couche 0-30 cm, (2) la présence d'une culture intermédiaire durant la période d'interculture
16. Quantification de l'effet du régime d'exportation des pailles sur les jours disponibles lors des opérations de semis et/ou de récolte
17. Prévision du comportement physique des sols cultivés en fonction de leur teneur en carbone organique. Rapport de fin de projet du projet Cartopaille
18. Protocole de mesures des propriétés mécaniques au laboratoire
19. Synthèse des corrélations existantes en géotechnique et en agronomie pour estimer les paramètres mécaniques des sols en fonction de caractéristiques facilement accessibles
20. Intégration des fonctions de pédo-transfert dans le modèle de prévision de l'intensité du tassement en deux dimensions SoilFlex
21. Proposition d'une nouvelle méthode de calcul de la distribution des contraintes exercées à l'interface sol/pneu dans le modèle de prévision de l'intensité des tassements PLAXIS
22. Estimation du tassement des sols agricoles en France à l'aide du modèle COMPSOIL : évaluation de l'incertitude des prévisions
23. Effet du pH sur les propriétés mécaniques des sols
24. Modélisation numérique de l'orniérage dans les sols forestiers

25. Influence des pratiques agricoles sur les propriétés mécaniques

Volet 3

26. Définition d'une stratégie de mise en œuvre du modèle TEC en fonction de la qualité des informations disponibles sur le sol en vue de prévoir l'évolution de sa teneur en eau à partir de prévisions météorologiques
27. Paramétrage du modèle MIN3P en site forestier
28. Intégration au sein du modèle TEC d'une procédure d'assimilation variationnelle et séquentielle
29. Analyse bibliographique de la prévention par cloisonnement

Volet 4

30. Méthodologie et dispositif expérimental pour la mesure de la résistivité électrique d'un sol en fonction de ses caractéristiques physiques (porosité et teneur en eau notamment)
31. Prototype d'un résistivimètre électrostatique pour la réalisation de mesures de résistivité électrique sur sol sec et rigide en vue de mettre en évidence la présence de fissures
32. Faisabilité des mesures des propriétés magnétiques des sols des sites lourds et légers du projet DST
33. Suivi de l'évolution des tassements, cartographie des anomalies magnétiques
34. Protocole d'une expérience de test, en aveugle, de la détection des zones tassées à partir de mesure de résistivité électrique
35. Faisabilité au champ du suivi électrique de l'évolution des zones tassées en sols agricoles et forestiers
36. Dispositif léger pour un suivi électrique des sites forestiers
37. Modèle de résistivité électrique des sols à double porosité pour étudier l'évolution du système poral en fonction de l'intensité du tassement
38. Logiciel d'inversion de données électriques sur sols fissurés (FISSEL, Version 2.0) avec plusieurs fissures
39. Identification des sites lourds forestiers potentiels
40. Formalisation des actions à réaliser pour la mise en place d'un site lourd forestier et son suivi, répartition des tâches entre les participants au volet 4
41. Mise en place de deux sites forestiers pour l'étude des effets de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques
42. Mise en place d'un site viticole à Plumecoq
43. Méthodologie du suivi du tassement par des mesures altimétriques
44. Dynamique de la régénération des sols tassés sous l'effet des agents naturels : essai de quantification sur l'essai pluriannuel d'Estrées-Mons

Volet 5

45. Segmentation du territoire national en grandes régions agricoles
46. Segmentation du territoire national en grandes régions climatiques
47. Cartographie des contraintes appliquées à la surface des engins agricoles pour les systèmes de grandes cultures et les systèmes viticoles
48. Fichiers de paramètres des itinéraires techniques pour le maïs sur la France
49. Synthèse des fonctions de pédo-transfert utilisables pour paramétrer STICS à partir des bases de données sol au 1/1 000 000 (France) et 1/250 000 (Ile de France)
50. Paramétrage du modèle de culture STICS : Estimation des paramètres « sol » à l'échelle de la France

Livrables de projets déposés

1. Convention Cadre avec l'ONF « Mise en place d'essai tassement en sols forestiers »
2. Projet de thèse « Cartographie des risques de tassement »
3. Projet de post-doc « Propriétés mécaniques des sols »
4. Projet de post-doc SIMSOL « Modélisation de la structure »

5. Projet de base de données PePSOL « Propriétés fonctionnelles des sols »
6. Projet de valorisation SOLUCION « Préviation des jours disponibles »
7. « Etat structural des sols et optimisation des pratiques culturales en systèmes de grande culture en région Picardie ». Bases d'un projet de recherche-développement.

Livrables de management

1. CR des réunions plénières
2. CR des remarques de Peter Weisskopf
3. Définition des variables d'entrée et des variables de sortie de chaque volet, permettant de formaliser les liens entre les cinq volets du projet
4. Identification des produits et cibles envisagés pour le projet DST

AUTRES (MEMOIRES DE STAGE)

1. Barnaure M., 2005. Détermination des paramètres mécaniques des sols à partir des essais d'identification, Rapport de projet d'initiation à la recherche, Master MSROE, Cermes, 19 p.
2. Bouchant P., Cadoux S., 2005. Contribution des lombriciens à la régénération des sols tassés en système de grande culture. Mémoire d'ingénieur ISARA Lyon, 86 pages + annexes.
3. Diop A., 2006. Modélisation des transferts hydriques dans le site expérimental de Breuil, mémoire master pro « Géosciences et Génie Civil », Université de Nancy 1, 59 p.
4. Brunet N., 2007. Evaluation d'un indicateur basé sur la prévision de la teneur en eau par le modèle TEC dans le cadre d'un outil d'aide à la décision pour le déclenchement de l'intervention de travail du sol, stage de fin d'étude ISARA, Lyon.
5. Echeverria I., 2006. Impacto de la compactación de suelos y la influencia del cambio climático estudiado sobre Picardie, utilizando el programa de simulación STICS. Univ. de Madrid, 82 p.
6. Eslami J., 2006. Etude du comportement mécanique des sols agricoles non saturés. Rapport de stage de Master M2, Master MRSOE, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 16 pages.
7. Farag M., 2005. Développement d'un logiciel dédié à la prévision de la teneur en eau des sols (SOLEAU). Mémoire Master ISIO, Avignon, 133 pages
8. Godin T., 2005. Evaluation des contraintes engendrées par les engins dans les systèmes de grandes cultures, viticoles et forestiers français. Mémoire d'ingénieur ESITPA, 48 pages + annexes
9. Goutal N., 2008. Effets du tassement des sols forestiers sur la distribution des gaz du sol. Master 2 CGSE (Gestion des sols) UHP Nancy.
10. Guillet F., 2006. Impact agronomique et environnemental du tassement des sols agricoles ; étude expérimentale et modélisation. Mémoire de fin d'études, INH Angers, Diplôme des Techniques Agricoles Approfondies spécialisation Santé du végétal, Agronomie Economie et Environnement.
11. Jouan C., 2006. Tassement des sols et imagerie magnétique. Mémoire Master GETI (Géomatériaux – Eau : Transfert et Interaction), La Rochelle, 38 p.
12. Lefebvre M.P., 2006. Conséquences du tassement sur le fonctionnement hydrique des sols : modélisation des variations de propriétés hydrodynamiques liées au tassement. Master professionnel M2 Géotechnologie Environnementale, Université de Poitiers, 64 pages + annexes.
13. Levrel G., 2005. Effet des substitutions d'essences forestières sur les caractéristiques physiques du sol : la réserve utile et la stabilité structurale. Mémoire DEA Science du Sol, Nancy, 66 pages + annexes
14. Le V.-D., 2007. Détermination de la perméabilité à l'air des sols agricoles. Master MSROE ENPC, 20 p.
15. Lheureux S., 2006. Régénération des sols tassés sous l'effet du climat, Rapport de stage de fin d'études de l'ISA-Lille.
16. Médini S., 2006. Impact des tassements du sol sur le ruissellement et l'érosion hydrique. Mémoire de stage, Master 2 Sciences, mention « Géosciences, Environnement et Risque », spécialité « Géographie Environnementale », 40 p.

17. Moulin C., 2006. Impact du changement climatique sur la conduite de systèmes agricoles rencontrés en Picardie à l'aide du modèle STICS. Master 2, Sciences et Technologie, Spécialité : Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels et Cultivés. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Ecole nationale Supérieure agronomique de Montpellier.
18. Parent F., 2008. Effets de la compaction du sol en forêt sur les flux de CO₂ provenant du sol et sa diffusion dans le sol. Mémoire de stage Master 1, « Forêt, Agronomie, Génie de l'Environnement. Université Henri Poincaré Nancy. 25 p.
19. Nguyen M.L., 2006. Assimilation de données d'humidité dans un modèle de transferts hydrique, mémoire master de recherche 1ère année, Université de Clermont-Ferrand
20. Renouard C., 2007. Elaboration d'une méthode simple de diagnostic de l'état structural des sols cultivés. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur ESITPA.
21. Séger M. 2006. Tassement et propriétés hydrodynamiques des sols : étude des variations de la conductivité hydraulique à saturation à partir de la base de données SOLHYDRO. Master 1 mention Géo-hydrosystèmes et Environnement, Université de Tours, 38 pages.
22. Séger M., 2007. Caractérisation spatio-temporelle de la structure d'un horizon de sol cultivé par tomographie électrique. Master 2 Professionnel, Université de Tours. 79 p.
23. Seladji S., 2006. Mesure et modélisation des variations de résistivité électrique d'un sol en fonction de sa porosité et de sa teneur en eau, Mémoire Master Spécialité Environnement continental et hydrosociences. 44 p.
24. Viloingt T., 2005. Identification et quantification des risques liés à l'implantation des cultures de printemps en semi direct derrière une culture intermédiaire : importance de l'humidité du sol. Mémoire de fin d'études ESA Angers (stage IFA), 122 pages + annexes.

RESUMES

En français

RESUME

La dégradation physique des sols liée au tassement lors des passages d'engins est une forte préoccupation des acteurs en agriculture, forêt et environnement. Elle concerne aussi bien les sols cultivés que les sols forestiers. De nombreuses questions subsistent concernant l'ampleur de cette dégradation en fonction de la nature des sols et de leur occupation, l'évaluation de ses conséquences agri-environnementales, son évolution en fonction des changements de climat et de pratiques, sa remédiation naturelle. Le projet DST propose une action de recherche sur le tassement des sols agricoles français visant à mobiliser l'ensemble des connaissances actuelles et à développer de nouvelles voies de recherche pour contribuer à :

- quantifier les impacts du tassement sur les fonctions environnementales du sol ;
- identifier les conditions, actuelles et à venir, de l'utilisation des sols conduisant à des problèmes de tassement des sols ;
- prévenir l'occurrence de ces conditions ;
- suivre sur le territoire l'évolution des tassements des sols.

Il est structuré en cinq volets de recherche : impact, prévision, prévention, suivi et cartographie. Il repose sur l'utilisation des modèles de tassement des sols et de fonctionnement du système sol/plante pour étudier l'occurrence du tassement et ses impacts sur les cultures et l'environnement via la modification des propriétés physiques des sols (propriétés de stockage et de transfert, propriétés mécaniques). Il cherche à développer de nouvelles méthodes non destructives de suivi de l'état du sol pour évaluer la vitesse de régénération de la porosité des sols tassés. Le projet couvre les sols agricoles et forestiers. C'est un projet transversal qui associe des laboratoires de recherche travaillant en agriculture, en géophysique ou en génie civil, et des organismes professionnels en charge des grandes cultures, de la vigne ou de la forêt. Il s'appuie sur une expérience de terrain acquise dans des conditions très variées. La synthèse des résultats acquis durant le projet doit aboutir à une cartographie des zones sensibles au tassement en France.

MOTS CLES : SOL, TASSEMENT, MODELISATION, PREVENTION, CARTOGRAPHIE, CONSEQUENCES AGRI-ENVIRONNEMENTALES, METHODES GEOPHYSIQUES

In English

ABSTRACT

Soil physical degradation due to compaction at the time of the passages of machines is a strong concern of the actors in agriculture, forest and environment. It concerns both agricultural soils and forest soils. Many questions remain concerning the importance of this degradation as a function of soil type and soil management, the evaluation of its impact on environment, the effect of changes of climate and practices, its natural remediation. The DST project has proposed a research action on soil compaction in France aiming mobilizing the whole of current knowledge and at developing new ways of research to contribute to:

- quantify the impacts of soil compaction on soil environmental functions;
- to identify the conditions of the land use leading to problems of compaction,
- to prevent the occurrence of these conditions;
- to monitor the evolution of soil structure after compaction.

The project is structured in five working package: impact, prediction, prevention, follow-up and cartography. It is based on the use of the models of hydrology and soil deformation, crop model to study the occurrence of compaction and its impacts on crop growth and the environment via the modification of the soil physical properties (properties of storage and transfer, mechanical properties). It aims at developing non destructive methods to monitor soil structure. The project associates research laboratories working in agriculture, geophysics or civil engineering, and applied company dealing with field crops, vine and forest. It was based on experimentations performed in various conditions and should deliver a cartography of the most sensitive soil to compaction in France.

KEY WORDS: SOIL, COMPACTION, MAPPING, MONITORING, MODELLING, GEOPHYSICAL METHODS, ENVIRONMENTAL IMPACT