Innovations Agronomiques 21 (2012), 45-57

Evaluation et maîtrise du risque de tassement, de la parcelle au territoire national

Richard G.

Inra, UAR 1155, Chef du département Environnement et Agronomie, Centre de Recherche d'Orléans, 2163 avenue de la Pomme de Pin - CS 40001 Ardon, 45075 Orléans cedex 2

Correspondance : Guy.Richard@orleans.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. En effet, le tassement des sols peut affecter à la fois la production agricole et forestière et l'environnement en favorisant l'érosion des sols, la dénitrification, la diminution de la biodiversité. 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. Ses principaux résultats concernent : (i) l'impact du tassement, avec la mise en évidence d'un seuil d'indice des vides structuraux (0,15 $m^3.m^{-3}$) 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, engins agricoles et forestiers, modélisation, prévention, cartographie, conséquences agri-environnementales

Abstract: Assessment of soil compaction risk

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 (project Agricultural and Forest Soil Degradation induced by Compaction) 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 change in soil structure after compaction. The project was structured in five work 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. Main results concerned: (i) impacts of compaction, as we demonstrated the existence of a threshold value for the structural void ratio (0,15 $m^3\ m^{-3}$) 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.

Keywords: agriculture, forest, traffic, modelling, mapping, yield, environment

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. 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.

Depuis quelques années, on assiste à un renouvellement de l'intérêt porté à ce problème. En effet, cette dégradation de la qualité des sols est un risque qui concerne désormais l'ensemble des sols français, qu'ils soient agricoles ou forestiers, du fait de la généralisation de la mécanisation. Il entraine, outre une baisse de la production, un accroissement des impacts environnementaux de l'agriculture : lessivage du nitrate, émissions de protoxyde d'azote (Bessou *et al.*, 2010), ruissellement et érosion, perte de biodiversité.

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 de l'intensité 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 maîtrisant le tassement des sols. En effet, en réduisant 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 mais qui du fait de leur largeur peuvent entraîner des tassements plus profonds. Ces mesures peuvent 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 (financement par les programmes GESSOL du ministère en charge de l'Ecologie et ADD de l'ANR). 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 la production et sur l'environnement (qualité des eaux, de l'air, érosion et activité biologique des sols) ;
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.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des modèles utilisés

	Variables simulées	Type de modèle
COMPSOIL *(O'Sullivan et al., 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 et al., 1998)*	Croissance des cultures, bilans hydriques et azotés dans le système sol/plante	Modèle à réservoir pour la teneur en eau
MIN3P *(Gérard et al., 2004)*	Teneur en eau des sols sous forêt en fonction du climat	Modèle mécaniste (Darcy/Richards) et transferts préférentiels
KINEROS *(Woolhiser et al., 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
AROPAj (*Jayet et al., 2005*)	Optimisation de la marge brute par culture et allocation des terres	Modèle sectoriel de l'offre agricole - multi-produit, multi-producteur - programmation mathématique et optimisation

Eléments de méthodologie

La modélisation est au cœur de l'approche. Plusieurs modèles ont été paramétrés 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. Le paramétrage a été réalisé à partir de la littérature, d'enquêtes et par des mesures. Les modèles ont ensuite été évalués à partir de jeux de données acquis dans des conditions variées :

- 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
- Epernay (Marne), sur un sol argileux pour le site viticole
- Azerailles (Meurthe et Moselle) en forêt de Haut-bois et Clermont-en-Argonne (Meuse) en forêt de Grand-Pays, dans des sols plutôt acides.

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 fonctions 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.

Sur les 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 Haut-bois) des systèmes racinaires, de l'activité biologique du sol (lombriciens) et de la microflore a également été entreprise.

Principaux résultats

1. 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). Pour le sol de limon argileux caractéristique du site de Mons, nous avons mis en évidence un seuil de masse volumique (i) qui entraîne une variation significative des propriétés hydrodynamiques du sol, (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, et que la dénitrification était favorisée. Ce seuil correspond à un indice des vides structuraux de 0,15 $m^3\ m^{-3}$ sur une couche d'épaisseur de 5 à 15 cm (soit une masse volumique d'environ 1,45 $g.cm^{-3}$. Mg m^{-3} pour ce type de sol).

Concernant la biodiversité, nous avons montré qu'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 (Capowiez *et al.*, 2009a). La recolonisation des volumes de sol tassé 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).

Ses travaux ont confirmé l'intérêt d'étudier les effets du tassement par 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 du nitrate…) et le fonctionnement des racines (diminution de la profondeur d'enracinement, de la densité de racines, de leur fonctionnement en conditions anoxiques).

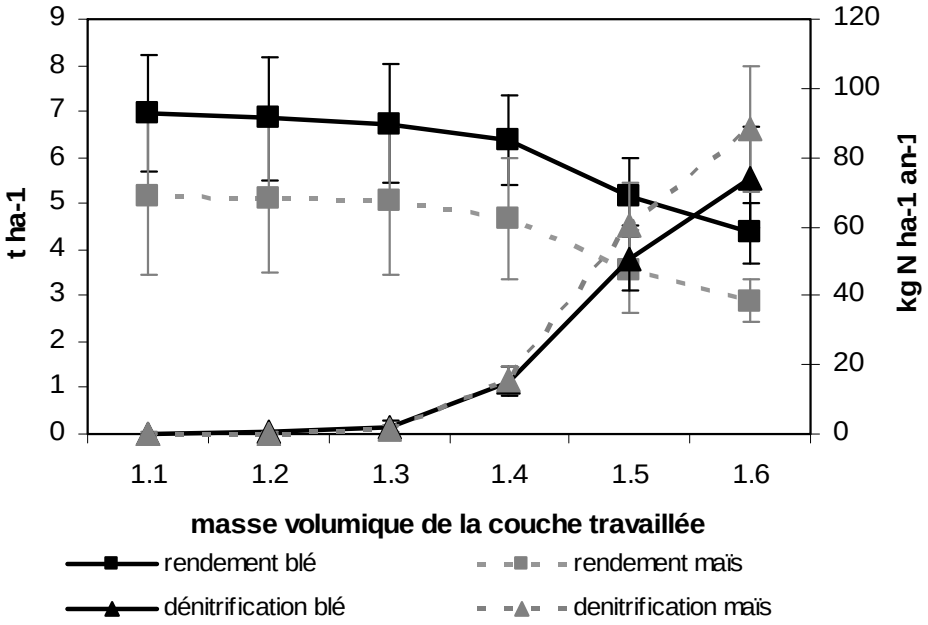


Figure 1. Impact du tassement d'un sol limoneux de Picardie sur les rendements du blé et du maïs (axe de gauche) et les émissions d'azote par dénitrification, en fonction de la masse volumique du sol. Résultats obtenus par simulation avec le modèle STICS. Les barres donnent l'étendue de la variation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

2. Impacts économiques du tassement

C'est par les courbes de réponse du rendement et des émissions de N_2O à l'azote, simulées par STICS en fonction du tassement du sol, que nous avons pu intégrer l'effet du tassement dans le modèle économique AROPAj. AROPAj est un modèle de programmation linéaire qui simule la production agricole à l'échelle européenne en fonction de différentes variables décrivant le contexte économique. Il optimise la marge brute des agriculteurs en fonction des prix de vente des produits, des taxes, des aides et du coût des intrants. En particulier, dans le modèle couplé que nous avons conçu, l'agriculteur ajuste la quantité d'azote qu'il utilise (et donc le rendement visé) de manière à optimiser l'utilisation marginale de l'intrant azote, le calcul de l'optimisation se faisant à partir de l'équation de la courbe de réponse à l'azote et des données de prix des produits et de l'engrais.

Les simulations ont permis de quantifier en régions Ile-de-France et Picardie, pour différents types d'exploitation et deux années climatiques contrastées, les effets du tassement (1) sur la baisse des marges brutes par culture, par exploitation et pour la région (Figure 2), (2) sur les allocations de culture. Nous avons ensuite amélioré la prise en compte du tassement par le modèle économique en introduisant les émissions de N_2O liées aux apports d'engrais azotés en testant l'effet de la mise en place de systèmes de régulation des émissions par le biais de taxes. Celles-ci sont dites de premier

rang (c'est-à-dire des taxes qui portent directement sur les tonnages émis) ou de second rang (c'est-à-dire portant sur l'un des facteurs supposés responsables de l'émission, soit, ici, la quantité d'engrais azoté épandue). Nous avons établi des courbes permettant de comparer les efficacités de ces deux types de taxe par rapport à l'atteinte d'objectifs de réduction des émissions.

Enfin, l'outil a été utilisé pour évaluer l'intérêt qu'un producteur aurait à modifier les dates de récolte de betterave et de semis de blé dans le cadre d'une succession betterave-blé, afin de préserver la structure du sol. On considère en effet qu'une récolte plus tardive de la betterave augmente son rendement mais également le tassement. Le blé suivant est alors doublement affecté, par le report du semis et par la dégradation de la structure. Nous avons donc réalisé pour les cultures de blé et de betterave cinq types de simulations avec pour chacune une proportion de sol tassé différente selon la date d'arrachage de la betterave. Puis nous avons supposé que les émissions de GES étaient taxées (de 0 à 125 €/tCO_2eq). Les simulations montrent que le bénéfice supplémentaire espéré par les exploitants en récoltant plus tardivement la betterave sucrière ne suffit pas à compenser la baisse de marge sur le blé tendre qui lui succède et les taxes supplémentaires. Contrairement à ce qui était attendu, la précocité de date de récolte (et donc la préservation de la structure) semble favorisée, sauf dans le cas de la Picardie en 2001 où, tant que la taxe GES reste à un niveau inférieur à 60€/tCO_2eq, retarder les dates de travaux s'avère bénéfique pour les exploitations agricoles. Aux niveaux les plus élevés de la taxe, la précocité est toujours préférable.

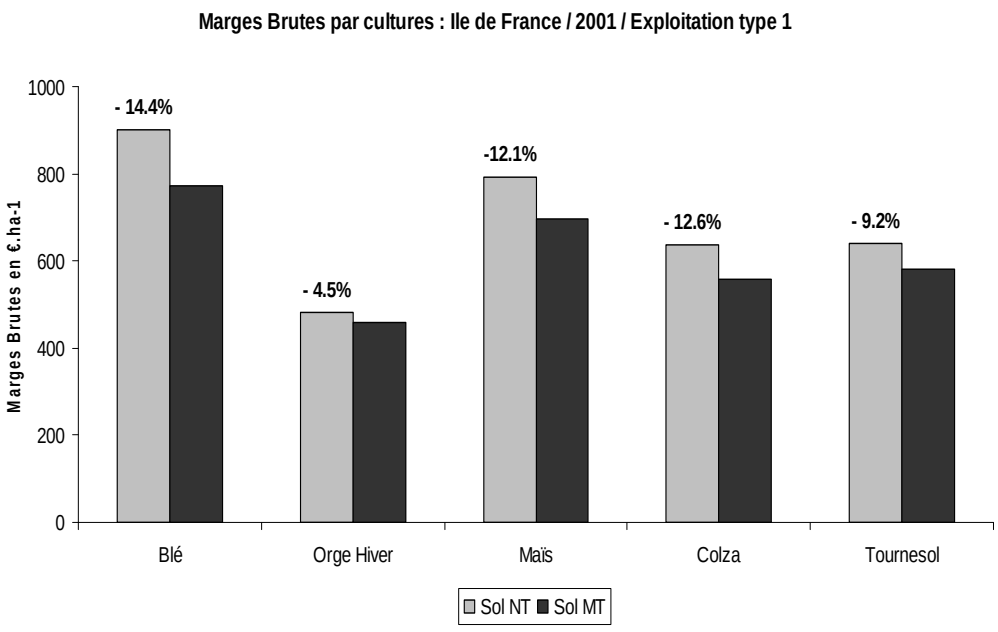


Figure 2. Marge brute des grandes cultures de la région Ile de France pour l'année 2001 en fonction de l'état du sol : non tassé (NT) ou tassé (MT)

3. Prévision des tassements

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 sol lors du passage de la roue.

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. Ainsi, les contraintes varient 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 plus élevées 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 forêt, les engins utilisés exercent des pressions moyennes (60 kPa) à très fortes (190 kPa) pour abattre ou débarder le bois.

Nous avons proposé 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 (très difficiles à mesurer) à partir de données analytiques accessibles telles que la texture. 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 géotechnie 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.

Enfin, nous avons amélioré la modélisation 2D du tassement. Nous avons transformé le modèle COMPSOIL, monodimensionnel, en un nouveau modèle, SoilFlex bidimensionnel (Figure 3), 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).

4. Prévention des tassements

Un agriculteur ou un exploitant forestier doit déterminer, avant toute intervention culturale, si l'état hydrique du sol entraine ou non un risque de tassement. Bien entendu, la décision d'intervenir dépend d'autres critères (état d'avancement du chantier par exemple). A l'heure actuelle, il existe peu d'outils opérationnels pour prévoir l'humidité du sol 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 et du type de sol. Nous proposons 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 (Chanzy *et al.,* 2008). Il s'applique aux 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). 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 $m^3\ m^{-3}$ sur des sols cultivés (Chanzy et *al.*, 2008).

L'efficacité offerte par la simulation de la teneur en eau pour la prise de décision (quant au moment optimal pour intervenir 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. 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 (Figure 4), 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 alors dépasser 60 %.

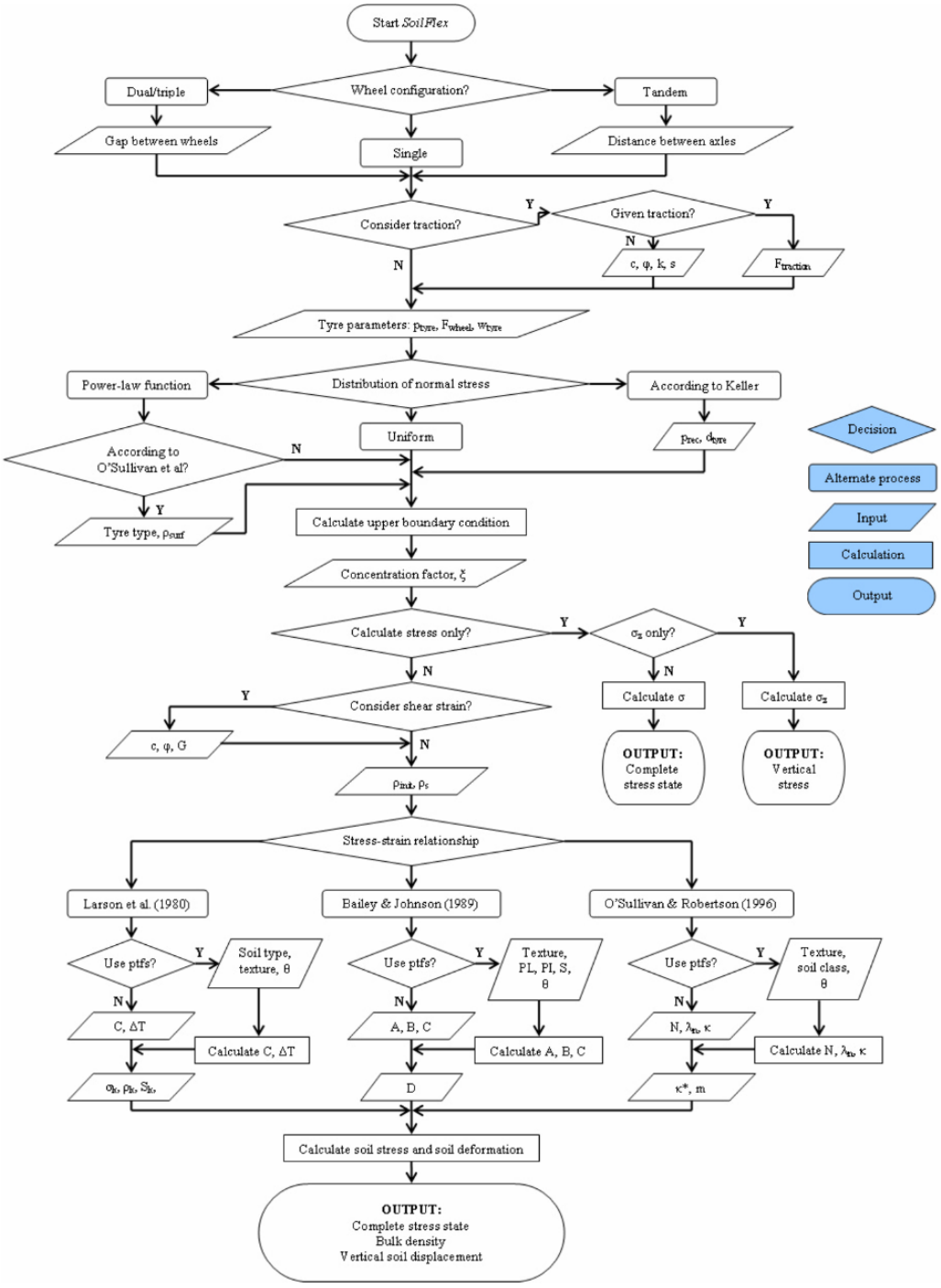


Figure 3. Organigramme du modèle SoilFlex (Keller et al., 2007)

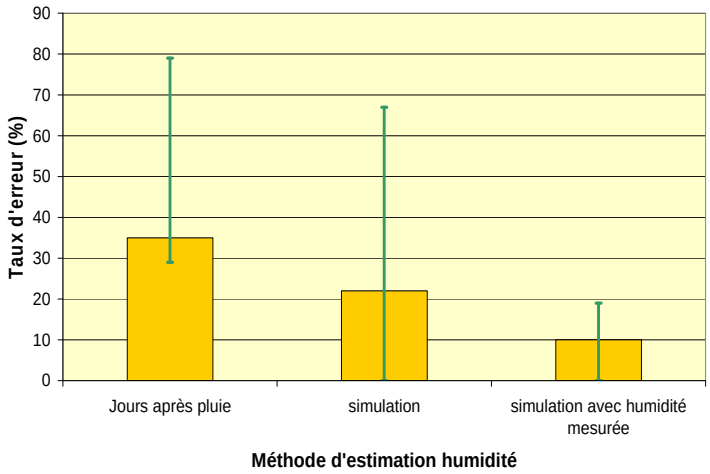


Figure 4. Taux d'erreur dans l'appréciation du niveau de teneur en eau du sol par rapport à une valeur seuil prise ici comme la teneur en eau à la capacité au champ. L'histogramme correspond à la moyenne obtenue sur sept sols couvrant une large gamme de type de sol. Les barres d'erreur correspondent à la gamme des taux rencontrés avec les sept sols.

5. Suivi des tassements

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 épaississement 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 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 (Capowiez *et al.,* 2009b).

6. 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 définies 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 entrainent 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 total de jours 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 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).

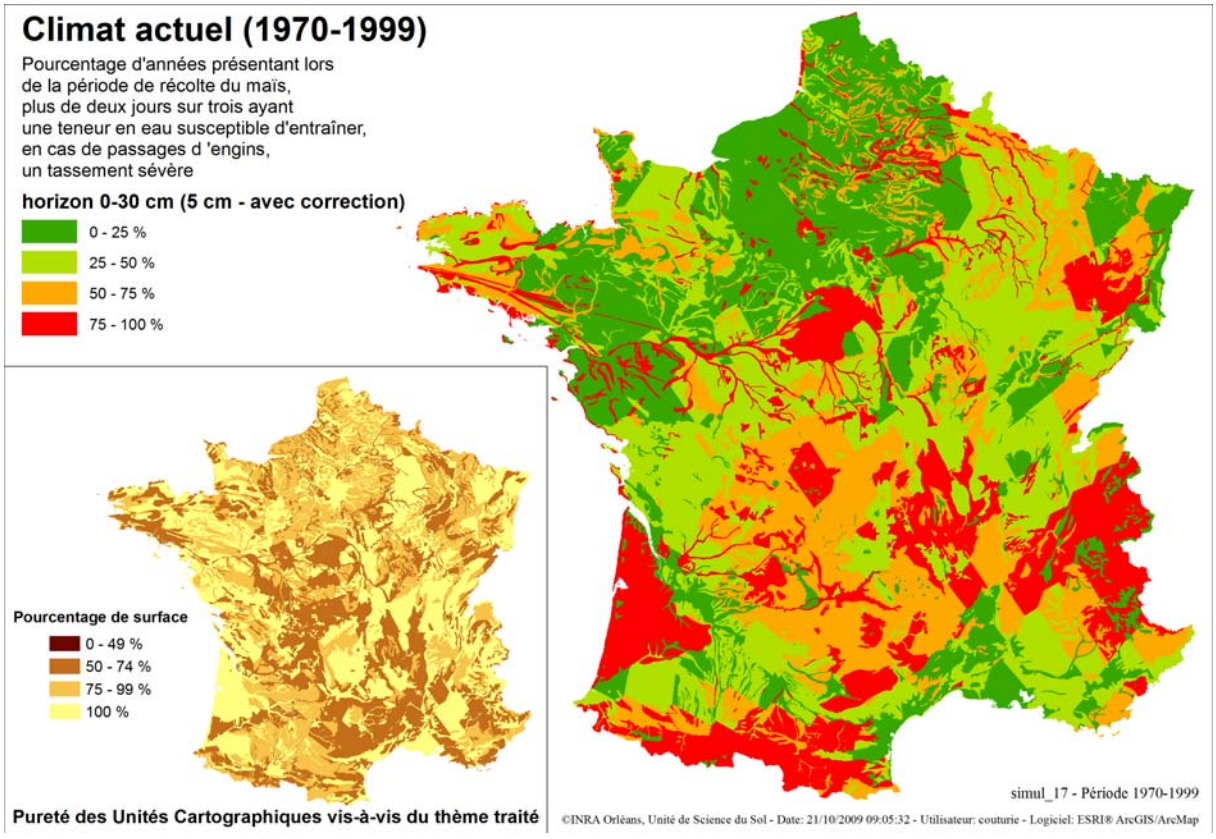


Figure 5. Cartographie des risques de tassement des sols relatifs à la culture du maïs en France métropolitaine (sauf Corse). Le risque de tassement correspond au pourcentage d'années (entre 1970 et 1999) présentant, lors de la période de récolte du maïs, plus de deux jours sur trois, un sol avec une teneur en eau susceptible d'entraîner, en cas de passage d'engins, un tassement sévère sur 0-30 cm. Source : Lefebvre, 2010.

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 5, qui correspond aux risques de tassement liés à la récolte du maïs. La Figure 5 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 (N_2O), 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 passage est important ce qui entraine 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 de 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.

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

Le programme de recherche Dégradation Physique des Sols agricoles et forestiers liée au Tassement a été financé par le programme GESSOL du ministère en charge de l'écologie (http://www.developpement-durable.gouv.fr/ ; Citeau et al., 2008 ; Richard G., et collaborateurs 2008, Colloque Inra-Sima, 2009) et le programme Agriculture et Développement Durable de l'Agence Nationale de la Recherche. L'auteur qui a été l'animateur de ce projet remercie tous les collègues qui y ont participé (cf la liste dans Roger-Estrade et al., 2011) : V. Adamiade, D. Arrouays, E. Baranger, M. Bartoli, H. Boizard, A. Brêthes, N. Brisson, Y. Capowiez, A. Chanzy, V. Chaplain, I. Cousin, P. Cosenza, K. Cui, Y.J. Cui, S. Debuisson, P. Défossez, F. Gérard, P.-A. Jayet, J. Labreuche, C. Le Bas, Y. Lefèvre, J. Léonard, E. Lévêque, F. Lévêque, B. Mary, M. Mumen, J. Ranger, J. Roger-Estrade, A. Tabbagh, J. Tabbagh, A.-M. Tang, D. Tessier

Références bibliographiques

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., 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.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud 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., Delecolle 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.

Capowiez 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, 209-216.

Capowiez 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 Resources Research, 44, W03432, doi:10.1029/2006WR005765. 16 p.

Citeau L., Bispo A., Bardy M., King D., 2008. Gestion durable des sols. Sous le coordination des Éditions Quae. Collection « Savoir-faire ».320 pp.

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., Tinsley M., Mayer K.U., 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.

Jayet P.A., Godard C., Niang N.B., Bamière L., De Cara S., Debove E., Baranger E., Brisson N., Ripoche D., Le Bas C., Arrouays D., 2005. Modélisation intégrée des composantes économique et biophysique des productions végétales en relation avec le changement climatique. Rapport final de l'étude pour l'APR GICC 2002

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.

Lefebvre 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 p.

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-Chenue, Morvan, France. Etude et Gestion des Sols 13, 71-88.

O'Sullivan M.F., Henshall J.K., Dickson J.W., 1999. A simplified method for estimating soil compaction. Soil & Tillage Research 49, 325– 335.

Richard G., et collaborateurs 2008. Dégradation physique des Sols agricoles et forestiers liée au Tassement : impact, prévision, prévention, suivi, cartographie. Rapport final ADD et GESSOL, 45 p.

Roger-Estrade et collaborateurs, 2011. Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : principaux résultats du projet GESSOL-ADD DST. Etude et Gestion des sols, 3, 187-199.

Šimunek 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., Soane B.D. (Eds), 1995. Soil compaction and the environment. Special issue. Soil & 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 manual. 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. (Eds). Developments in Soil Sciences. Amsterdam, Elsevier. pp. 221-245.