

DST

Projet DST :

DEGRADATION PHYSIQUE DES SOLS AGRICOLES ET
FORESTIERS LIEE AU TASSEMENT

Coordinateur : Guy RICHARD, INRA Science du Sol, Orléans

Rapport scientifique détaillé, décembre 2008

Projet soutenu par les programmes GESSOL du MEEDDAT
et ADD de l'ANR

Sommaire

Contexte général : Quelle situation, quels enjeux motivent ce projet ?	4
Le tassement des sols : une question qui redevient d'actualité	4
Le tassement des sols : un processus complexe aux multiples impacts	5
Le tassement des sols : des lacunes dans les connaissances	5
Organisation et objectifs du projet DST	8
Quelques éléments méthodologiques	9
Volet 1a : Impacts agri-environnementaux des tassements	11
Volet 1b : Impacts économiques des tassements	13
Volet 2 : Prévision des tassements	13
Volet 3 : Prévention des tassements.....	15
Volet 4 : Suivi de l'évolution des tassements	16
Volet 5 : Cartographie des tassements	16
Résultats obtenus	17
Volet 1a : Impacts agri-environnementaux des tassements	17
Volet 1b : Modélisation de l'impact économique du tassement des sols.....	20
Volet 2 : Prévision des tassements.....	22
Volet 3 : Prévention des tassements.....	29
Volet 4 : Suivi des tassements.....	34
Volet 5 : Cartographie des risques de tassement à l'échelle nationale.....	39
Conclusion	45
Bibliographie citée	46
Liste des figures	49
Liste des tableaux	49
Liste des sigles et acronymes	50

Contexte général : 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, maintien de la biodiversité). Ressource non renouvelable à l'échelle humaine, les sols posent aujourd'hui de nombreuses questions 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, UE, 2002). Une superficie de 33 millions d'hectares serait actuellement concernée en Europe d'après l'ISRIC (Oldeman et al., 1991), 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, entretien des peuplements 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 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 (Lagacherie et al., 2004), forêt (Lamandé et al., 2004).

- 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 (via la limitation de l'enracinement), émissions de N₂O voire de CH₄, évolution des matières organiques et activité biologique du sol (via l'apparition de volumes de sol anoxiques), ruissellement et érosion (via la limitation de l'infiltrabilité du sol).

- 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 (Stengel et al., 1984).

- Enfin, sa prévention reste délicate. Des mesures radicales comme la mise en place de cloisonnement ou le débardage par câble en forêt, 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 aux multiples impacts

Si tous les acteurs de l'agriculture et de l'environnement perçoivent que le tassement des sols pose un problème pour la durabilité des écosystèmes cultivés et forestiers, personne n'est en mesure d'en évaluer les conséquences ni le coût. La notion de sol « trop » tassé ou de sol « dégradé » reste difficile à définir car :

- si la notion de tassement est définie comme une diminution de la porosité, il est plus difficile de qualifier un sol « 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) au sein d'une parcelle où il concerne rarement l'ensemble de la surface mais seulement des bandes de la largeur des roues des engins, (2) entre parcelles où son intensité dépend des engins utilisés et des conditions de leur utilisation ;
- la porosité des sols tassés peut se régénérer naturellement sous l'effet de l'action du climat (par fissuration) ou de l'activité biologique du sol (par perforation liée aux lombrics et aux racines). Ceci est très important en forêt (restauration mécanisée difficile) et en système de non travail du sol. Mais ces processus restent mal modélisés et la vitesse à laquelle la porosité du sol se reconstitue en fonction des conditions de milieu est mal connue ;
- les conséquences du tassement sont multiples et toujours indirectes : il n'y a pas de relation directe entre le tassement d'une part et les rendements, la production de gaz à effet de serre, l'érosion, le lessivage du nitrate, la biodiversité d'autre part. Cela explique pourquoi les conséquences de la dégradation physique des sols agricoles ou forestiers sur le fonctionnement des plantes et sur l'environnement sont mal connues. Si des résultats expérimentaux existent sur les variations des rendements des cultures en fonction du niveau de tassement des horizons de surface, les effets des tassements sur l'environnement ont été beaucoup moins étudiés ;
- certaines conséquences peuvent toutefois être corrigées par les techniques culturales : augmentation de la fertilisation azotée ou introduction de l'irrigation pour corriger un enracinement insuffisant. Cela a pu masquer par le passé les effets du tassement des sols sur la production agricole voire forestière et accentuer certains problèmes environnementaux.

Le tassement des sols : des lacunes dans les connaissances

Conséquences des tassements

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 (Alblas et al., 1994), et ceci parfois pendant plus de 10 ans après l'épisode de tassement (Alakukku, 2000). Stenitzer et Murer (2003) ont utilisé le modèle de culture SIMWASER pour rendre compte de l'effet du tassement sur une culture de maïs, irriguée ou non. Cet effet est pris en compte au travers de la morphologie et du fonctionnement racinaire et des transferts d'eau. Par contre, les effets des tassements sur l'environnement ont été beaucoup moins étudiés. Parmi ceux qui peuvent être affectés, les processus suivants sont déterminants pour la durabilité des systèmes de culture :

- conséquences sur les reliquats d'azote après récolte et sur le drainage hivernal, qui conditionnent la lixiviation du nitrate ;
- impacts sur les conditions d'aération dans le sol et ses conséquences sur les cycles du carbone et de l'azote (minéralisation de l'azote organique, dénitrification, émissions de N₂O (Quemada et al., 1997) ;

- effets sur le ruissellement et l'érosion, en lien avec les propriétés hydriques et mécaniques du sol qui dépendent étroitement du niveau de tassement des sols ;
- conséquences enfin sur l'activité biologique des sols. La dépendance de la faune aux conditions de milieu se traduit par une diminution de la densité, de la biomasse et de la richesse spécifique lorsque la conduite du système de culture engendre une dégradation de la structure du sol ou une diminution de la ressource en carbone (par exemple causée par des rendements moindres en sols tassés). L'effet spécifique du tassement reste à analyser.

Prévision des tassements

Différents modèles de déformation du sol basés sur la mécanique des sols permettent de prévoir le niveau de tassement du sol suite à un passage d'engin en fonction des propriétés mécaniques du sol (Défossez et Richard, 2002). Ces modèles comportent deux aspects : (1) la modélisation du champ de contraintes créé par le passage de l'engin (contraintes en surface et propagation dans le sol), (2) la modélisation du comportement mécanique du sol (i.e. relations contrainte-déformation) (Gupta et Raper, 1994). On peut distinguer deux types de modèle : les modèles basés sur une procédure semi-analytique dérivée des équations de Boussinesq (1885), et les modèles numériques basés sur une résolution par éléments finis (FEM). Les modèles FEM largement utilisés en géotechnique restent très mal évalués pour les sols agricoles (grandes déformations, faibles contraintes). Ils offrent cependant de nombreuses possibilités d'adaptation, notamment l'intégration du caractère hétérogène du sol par une discrétisation du profil de sol en blocs de propriétés mécaniques différentes (Défossez et Richard, 2002).

Les travaux de prévision des tassements concernent principalement des sols en grande culture, très peu les sols forestiers ou viticoles, pour lesquels les contraintes et les conditions physico-chimiques du sol sont différentes. Les modèles semi-analytiques ont été validés pour une large gamme de conditions de sol et d'équipements en système de grandes cultures. Ils donnent des résultats satisfaisants pour des sols de structure macroscopique homogène. Leur application à la prévision de tassement en fonction des conditions climatiques, des pratiques agricoles (amendement, travail du sol) et pour différents sols requiert une meilleure connaissance des propriétés mécaniques des sols et de leurs facteurs de variation. Leur utilisation à grande échelle pose aussi le problème de l'estimation des conditions aux limites (distribution des contraintes en surface) pour une gamme d'équipements étendue aux systèmes forestiers et viticoles. Différentes relations ont été proposées pour estimer la distribution des contraintes appliquées à la surface pour différents types d'engin (e.g. Crolla et El-Razaz, 1987). Une synthèse de ces relations (domaine de validité, précision) reste à réaliser. De même, des corrélations ont été proposées pour exprimer les variations des propriétés mécaniques en relation avec les caractéristiques des sols (texture, %C, pH, teneur en eau) et les pratiques culturales (e.g. Terzaghi et Peck, 1967 en géotechnique ou Lebert et Horn, 1991 dans le domaine agricole). La validité et l'opérationnalité de ce type de relations ne sont pas définies.

Prévention des tassements

Trois grands types de prévention des tassements ont déjà été bien identifiés :

- éviter 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). Pour les récoltes en forêt, il est aussi envisagé l'utilisation de câbles téléphériques accrochés aux arbres et qui permettent le survol des grumes au-dessus du sol ;

- localiser les tassements dans les parcelles : principe du « controlled traffic » en agriculture et du cloisonnement en forêt (avec utilisation des rémanents pour servir de « tapis » de roulement) ;
- choisir les jours durant lesquels 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 » (à long terme) 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 les choix « tactiques » (à court terme), 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 (Ziesak, 2003). 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.

Suivi des tassements

L'évaluation des tassements est délicate en raison de la variabilité de l'état structural du sol au sein d'une parcelle agricole ou forestière, de la lourdeur des méthodes actuelles (profil cultural et racinaire, masse volumique, conductivité hydraulique à saturation, ...) et de leur caractère destructif. A cela s'ajoute la difficulté à formaliser l'évolution de l'état structural du sol après tassement : comment modéliser la mise en place d'un réseau de fissures ou bien de galeries de vers de terre au sein d'un volume de sol tassé ? Il manque des méthodes pour aborder ces processus qui soient utilisables au champ et qui tiennent compte de la variabilité spatiale de l'état structural. Le développement actuel des méthodes géophysiques en science de l'environnement représente une nouvelle voie méthodologique à explorer. En effet, les méthodes géophysiques permettent des mesures rapides, non destructives et en trois dimensions (Griffith et Parker, 1993; Tabbagh et al., 2000). Les méthodes les plus prometteuses sont basées sur les mesures de la résistivité électrique du sol (Samouëlian et al., 2004) et des anomalies magnétiques (Mathé et Lévêque, 2003). Les propriétés électriques et magnétiques du sol dépendent de la porosité au travers de la teneur volumique en argile ou bien de la teneur en minéraux magnétiques. L'inconvénient de ces méthodes réside dans l'utilisation, qui reste délicate, de modèles d'inversion des données acquises depuis la surface du sol pour identifier les propriétés du sol en profondeur.

Cartographie des tassements

Les cartographies de la sensibilité des sols au tassement ont été réalisées à partir de deux types d'information :

- une estimation de la déformabilité du sol en fonction de sa texture et de la masse volumique actuelle du sol, éventuellement modulée en fonction du bilan [Pluie - Evapotranspiration Potentielle] (Rounsevell et Jones, 1993). Ces variables ont été évaluées à dire d'expert et appliquées à la base de données géographiques des sols d'Europe (Jones et al., 2003) ;
- une estimation de la pression de pré-consolidation du sol estimée par classe de taux d'argile à un potentiel de l'eau donné (Van den Akker (1997) pour les Pays-Bas).

Une cartographie moins grossière de la sensibilité des sols au tassement suppose de spatialiser à la fois la sensibilité « intrinsèque » du sol et le nombre de jours durant lesquels le sol est au-delà des teneurs en eau « critiques ». Cela passe par l'utilisation de fonctions de pédotransfert

« mécanique » et « hydrodynamique » dans les modèles de prévision de la teneur en eau et du tassement des sols. Il est également nécessaire de tenir compte de l'occupation du sol et des pratiques (via l'intensité des contraintes et les surfaces des parcelles concernées).

Organisation et objectifs 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 ont été mobilisées 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 couvert une large gamme de sols, à la fois agricoles ou forestiers et a pu bénéficier d'expériences de terrain acquises dans des conditions très 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 la modélisation, spatialisée ou non, du fonctionnement physique du sol et du système sol/plante. Enfin, le projet a associé aux laboratoires de recherche des organismes « professionnels » en charge des principales productions (grandes cultures, vigne et forêt).

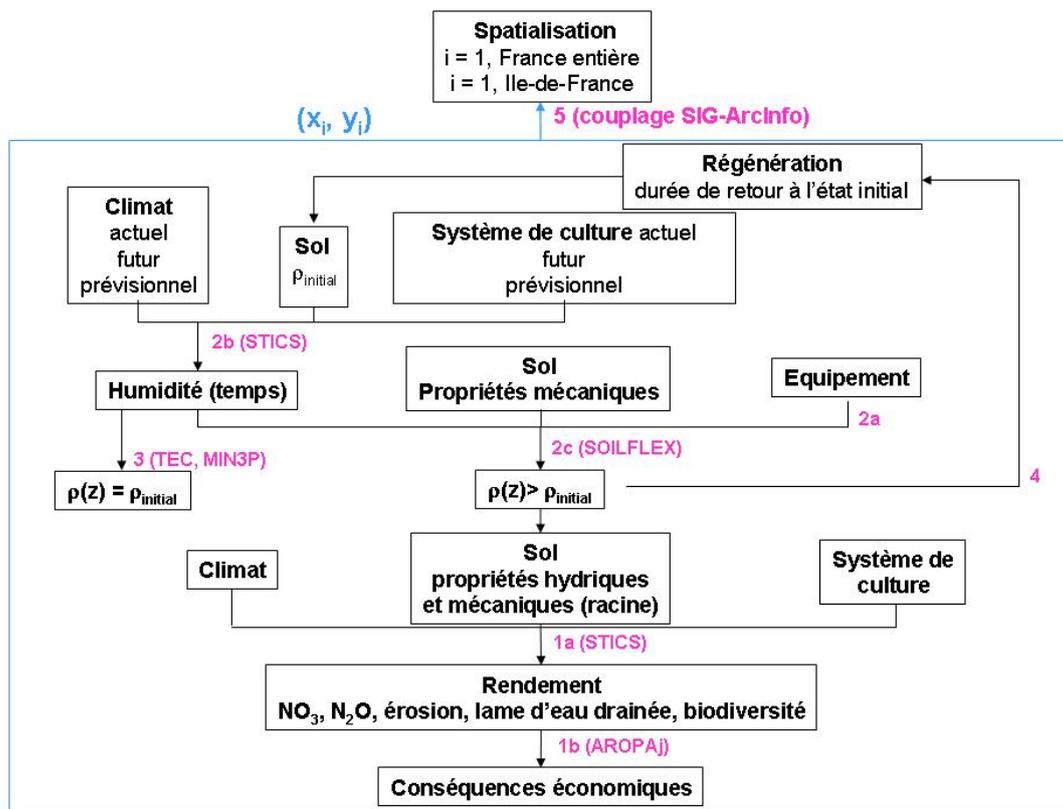


Figure 1 : Schéma de l'organisation générale du projet DST
(en rouge, les modèles utilisés, cf. Tableau 1)

Le projet a été organisé en cinq volets qui couvraient l'évaluation des conséquences des tassements, la prévision, la prévention, le suivi et la cartographie des tassements :

1. quantification des conséquences des tassements : (i) sur l'environnement : qualité des eaux, de l'air, érosion et activité biologique des sols, (ii) sur l'économie des exploitations agricoles ;
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 éléments méthodologiques

Pour les volets 1, 2, 3 et 5, le projet DST s'est basé sur plusieurs modèles de simulation présentés dans le tableau 1 : modèles hydromécaniques, modèles de culture et modèles économiques. Nous avons cherché à paramétrer ces modèles à petite échelle (sur de grandes surfaces) 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'environnements spécifiques et leur intégration dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont facilité 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 (Tableau 2) nous ont permis de couvrir différents types de sols (sableux, limoneux, argileux) et de 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.

	Variables simulées	Type de modèle
COMPSOIL (<i>O'Sullivan et al., 1999</i>)	Masse volumique du sol après passage d'engins	Hypothèse d'un sol homogène en profondeur Modèle semi-analytique (Boussinesq)
TEC (<i>Chanzy et Bruckler, 1993</i>)	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 (<i>Brisson et al., 1998</i>)	Croissance des cultures, bilans hydriques et azotés dans le système sol/plante	Modèle à réservoir pour la teneur en eau
MIN3P (<i>Gérard et al., 2004</i>)	Teneur en eau des sols sous forêt en fonction du climat	Modèle mécaniste (Darcy/Richards) et transferts préférentiels
KINEROS (<i>Woolhiser et al., 1990</i>)	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 (<i>Jayet et al., 2003</i>)	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

Tableau 1 : Modèles utilisés

Pour ce qui est du 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 mesures 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).

Nom du site (référence)	Equipe gestionnaire	Nature des parcelles	Occupation	Variantes expérimentales
Mons (80) (Boizard et al., 2002)	INRA Agro-Impact Laon- Mons	Essai longue durée « Système de culture et structure du sol » Parcelles de type agricole	Grande culture	Rotation Labour/Non labour Dates de semis et récolte
La Cage (78) (Bertrand et al., 2004)	INRA Agronomie	Essai longue durée « Système de culture » Parcelles de type agricole	Grande culture	Systèmes intensif, intégré, biologique, sous couverture permanente
Boigneville (91) (Bodet et al., 1976)	Arvalis	Essai longue durée « Travail du sol » Parcelles de type agricole	Grande culture	Labour, travail superficiel, semis direct
Avignon (84) (Findeling et al., 2003)	INRA EMMAH Avignon	Parcelles expérimentales	Sol nu et céréales	
Fort Chabrol Epernay (51)	CIVC	Parcelle viticole	Vigne	Sol tassé ou non
Breuil (58) (Ranger et Gelhaye, 2002)	INRA BEF Nancy ONF	Parcelle forestière	Forêt Douglas	
Azerailles (54) Ranger et al. (2007)	INRA BEF Nancy	Parcelle forestière	Forêt	Sol tassé, travaillé
Grand Pays (55) Ranger et al. (2007)	INRA BEF Nancy	Parcelle forestière	Forêt	Sol tassé, chaulé

Tableau 2 : Sites expérimentaux utilisés pour le projet

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. 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.

Nous présentons dans la suite les méthodologies spécifiques à chaque volet.

Volet 1a : Impacts agri-environnementaux des tassements

Nous avons cherché à modéliser les impacts du tassement sur les flux d'eau et d'azote, en adaptant le modèle STICS (Brisson et al., 1998) au problème du tassement. Le calage du modèle a été réalisé à partir d'un jeu de données obtenues sur l'essai de longue durée (1990-2006) de Mons. Le traitement de ces données a également permis de discuter de la manière dont le modèle de culture rendait compte de l'effet du tassement sur le rendement des cultures. Le modèle de culture STICS est développé par l'INRA depuis 1996. Il simule le développement et la croissance des cultures ainsi que l'évolution d'une série de variables de flux et d'état du sol cultivé. Il accepte en entrée des données climatiques et des variables définissant l'effet des opérations culturales. Il est paramétré en fonction du type de culture et de variété ainsi qu'en fonction du type de sol. Il est possible de faire fonctionner le modèle pendant la phase d'interculture et d'enchaîner ainsi plusieurs cultures pour simuler une succession. Pour introduire le tassement dans le modèle en nous appuyant sur les résultats de Mumen (2006), nous avons relié la masse volumique du sol à trois paramètres physiques déterminants pour simuler le fonctionnement hydrique du sol : l'infiltrabilité, l'épaisseur de la couche de sol évaporante et la limite d'évaporation potentielle. Par ailleurs, la modification de la masse volumique liée au tassement, induit, à masse de sol constante, des modifications d'épaisseur des horizons dont nous avons tenu compte en appliquant une règle simple de proportionnalité. Concernant le cycle de l'azote, le tassement diminue, dans STICS, la vitesse de minéralisation (K2POT dans Brisson et al., 1998). L'impact du tassement s'exerce sur le premier ou les deux premiers horizons définis dans le fichier sol (i.e. jusqu'à une profondeur de 30 cm environ). Ainsi, dans ce modèle, le tassement ne modifie ni la rugosité de l'état de surface (cet état est en revanche modifié lors d'une pluie battante), ni les horizons situés sous le fond de labour. Enfin, la masse volumique intervient directement sur la croissance des racines, affectant la profondeur maximale d'enracinement et la densité de racines. Le paramétrage de la fonction de réponse indique qu'au-delà d'une masse volumique de $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$, l'exploration de la couche de sol est pénalisée.

Le modèle ainsi adapté a permis d'élaborer des fonctions de réponse à l'azote des principales cultures du Bassin Parisien et, surtout, de les faire varier en fonction du degré de tassement du sol limoneux de référence (celui de Mons). De même, il a été utilisé pour établir les relations « dose d'azote – émission de N_2O » pour ces mêmes cultures.

Les courbes de réponse à l'azote ont été paramétrées en utilisant une forme exponentielle classique :

$$r(N) = B - (B-A) \exp[-\tau N]$$

où $r(N)$ désigne le rendement de la culture (t.ha^{-1}) pour une valeur de N , quantité d'azote apportée (kg.ha^{-1}). Les paramètres A , B et τ ont été obtenus à partir de l'ensemble des points produits par le modèle STICS pour des valeurs de N variant de 0 à 600 unités (la procédure et les modalités de simulation sont décrites dans Godard et al., 2008). Ces fonctions dépendent également du niveau de tassement, que nous avons introduit en utilisant des fonctions qui sont une pondération (par la proportion de sol tassé) entre les fonctions correspondant à un sol non tassé et celles correspondant à un sol entièrement tassé. Les fonctions d'émission de N_2O sont également déterminées grâce au modèle STICS et dépendent elles aussi d'une pondération basée sur la proportion de sol tassé. L'ajustement proposé suit une forme affine :

$$g(N) = D + C*N$$

où $g(N)$ est la quantité d' $N-N_2O$ dénitrifiée pour une valeur de N , quantité d'azote minéral apportée ; C est le facteur d'émission que l'on peut comparer à la valeur unique proposée par l'IPCC et D un paramètre d'ajustement, proche de 0.

Ces relations nous ont permis de rendre « exogène » au modèle économique AROPAj le rendement et l'émission de N_2O , c'est-à-dire de coupler les modèles STICS et AROPAj à travers l'effet de l'apport d'azote sur le rendement et la dénitrification.

Pour l'étude de l'érosion, c'est le modèle Kinos2 (Kinematic Runoff and Erosion Model) qui a été adapté à la prise en compte du tassement. C'est un modèle d'érosion à bases physiques, spatialement distribué et fonctionnant à l'échelle de l'événement pluvieux. Il décrit les processus d'interception, d'infiltration, de ruissellement et d'érosion à l'échelle de petits bassins versants agricoles ou urbains (Woolhiser et al., 1990). Le bassin versant est représenté par une cascade de parcelles et de canaux. Ce modèle utilise l'approximation d'onde cinématique des équations de Saint Venant pour les écoulements de surface et dans les canaux, et suppose que le ruissellement est de type hortonien. Le détachement de sédiments par le ruissellement est fonction de la résistance du sol représentée par un seul paramètre dans le modèle (paramètre C_0). Ce paramètre a été relié à l'inverse de la vitesse de cisaillement critique, donc à la contrainte de cisaillement critique, ainsi qu'à la résistance au cisaillement à saturation. Nous avons ensuite cherché à relier cette résistance à la masse volumique du sol. L'analyse par simulation de l'impact du tassement sur le ruissellement et l'érosion a été conduite sur un ensemble de scénarios combinant trois valeurs de masse volumique (1,1 ; 1,3 et 1,6 $g.cm^{-3}$) avec trois valeurs de contrainte critique de cisaillement (0,62 ; 0,32 et 0,08), trois pentes (1%, 3% et 6%), trois échelles d'espace (1 ha, 10 ha, 100 ha). L'épisode pluvieux considéré correspondait à un hyétogramme enregistré en 2001 sur le site de Nampont (Somme), avec un volume de 29 mm (période de retour d'environ 1 an) et une intensité maximale exceptionnelle de 114 $mm.h^{-1}$ (période de retour de 10 ans au moins). Les caractéristiques du sol étaient celles du sol limoneux de l'essai « Systèmes de culture - structure du sol » de Mons en Chaussée. Le domaine de simulation était constitué de :

- une parcelle amont, zone de production du ruissellement ;
- une fourrière à l'aval de cette parcelle permettant la concentration du ruissellement ;
- un chenal d'écoulement concentré dans la parcelle aval représentant une rigole.

Cette géométrie du domaine a permis d'analyser 3 types de situation : tassement homogène, tassement amont et tassement aval. Au total 45 simulations ont été effectuées.

Enfin, le premier volet du projet a permis de progresser sur la connaissance de l'effet du tassement sur les populations lombriciennes des sols cultivés en grande culture. Sur ce dernier point, en l'absence de modèle, l'approche adoptée a été de nature expérimentale. L'objectif a été d'estimer les densités de vers en présence par espèce et catégorie écologique dans les différents traitements expérimentaux présentant des niveaux de tassement contrastés. Ces estimations ont été réalisées grâce à la méthode classique d'extraction chimique et par tri manuel à différentes dates : (i) avant le tassement, (ii) juste après celui-ci ou (iii) quelques mois après celui-ci dans des parcelles agricoles ou forestières. Par ailleurs, des colonnes de sol ont été prélevées puis étudiées par tomographie aux rayons X. Ces études avaient pour but de décrire les effets du tassement sur la macroporosité d'origine lombricienne et d'analyser quels types de galeries sont les plus sensibles.

Volet 1b : Impacts économiques des tassements

C'est à partir du modèle économique AROPAj que nous avons cherché à étudier les conséquences économiques du tassement et les éléments de politique publique permettant d'en limiter les impacts. AROPAj est un modèle de programmation linéaire qui simule la production agricole à l'échelle régionale 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 présentée ci-dessus et des données de prix des produits et de l'engrais. Il y a un certain nombre de contraintes d'ordre technique (maximum d'engrais épandable par hectare, taux de mise en jachère, variation maximale de l'effectif du cheptel, SAU fixée...). Le modèle simule le comportement d'agriculteurs virtuels qui dirigent des « fermes-types » construites à partir de données statistiques et qui représentent la diversité des systèmes de production en Europe. Il y a entre trois et plus de dix fermes-types par région, en fonction de la diversité des systèmes rencontrés. Pour ce projet, nous avons basé notre étude sur deux régions européennes, la Picardie et l'Ile-de-France. La description complète du modèle peut être trouvée dans Godard et al. (2008).

Volet 2 : Prévision des tassements

L'objectif de ce volet était de fournir des prévisions de l'intensité des tassements en fonction de la nature du sol, du climat, de l'occupation du sol et des pratiques agricoles. Ces facteurs déterminent les paramètres d'entrée des modèles de tassement, à savoir :

- la distribution des contraintes exercées à la surface du sol, qui dépend des engins utilisés ;
- les propriétés mécaniques du sol, qui dépendent de caractéristiques du sol (1) permanentes, liées au type de sol (texture), (2) semi-permanentes, liées notamment aux pratiques agricoles (pH, teneur en carbone, état structural), (3) très variables, liées notamment au climat (teneur en eau).

Le volet « Prévision » a donc associé trois aspects :

- une enquête sur les contraintes exercées à la surface du sol et leurs conditions d'application,
- une caractérisation des propriétés mécaniques du sol,
- des développements numériques en relation avec la modélisation des tassements 1D ou 2D, pour aboutir à la prévision des tassements selon les combinaisons sol, climat, occupation, pratiques.

S'y est ajoutée une étude sur la qualité des estimations de tassement en fonction des données disponibles.

Le sous-volet « Contraintes » s'est appuyé sur une étude bibliographique pour rassembler les différents modèles d'aire de contact sol-pneumatique permettant de calculer les contraintes engendrées par les engins selon leurs caractéristiques. Des mesures d'empreintes de pneumatiques ont été réalisées pour les chantiers sur lesquels on disposait de peu de données (pneus viticoles et forestiers). Une enquête a été menée auprès des instituts techniques partenaires du projet (Arvalis, CIVC, ITB, ONF), pour inventorier les équipements utilisés selon les cultures et les opérations techniques par culture en fonction (1) de leur date d'utilisation, (2) du type d'intervention (semis, transport, récolte, etc.) et (3) de la zone d'utilisation afin de spatialiser ces informations à l'échelle de la France et dans le temps.

Le sous-volet « Modélisation du fonctionnement hydromécanique des sols » avait pour objectif l'analyse de l'effet de certaines pratiques agricoles et forestières sur la sensibilité des sols au tassement. Cette partie s'est appuyée sur des simulations de tassement pour étudier l'effet du statut organique des sols pour des systèmes de grande culture et l'effet des conditions très humides en forêt. Les travaux sur le statut organique des sols ont reposé sur l'utilisation du module « eau » du modèle de culture STICS pour prévoir l'état hydrique du sol en fonction de la culture et des conditions climatiques. Cela a nécessité un paramétrage spécifique du modèle à partir de données expérimentales du site de Boigneville.

Pour les sols de forêts, l'interaction avec les partenaires du projet spécialistes des forêts a montré que les interventions se produisent fréquemment en conditions très humides. Le sol est alors saturé. Or les modèles mis en œuvre initialement dans le projet DST sont adaptés à des sols non saturés. Nous avons utilisé en collaboration avec F. Collin (Université de Liège, Belgique) le code de calcul LAGAMINE pour examiner le tassement pour les sols en forêt en conditions très humides.

Le sous-volet « Déformations » avait pour objectif la simulation des tassements des sols agricoles et forestiers. Celle-ci a demandé d'établir les variations des propriétés mécaniques pour une large gamme de sols sur la base des connaissances acquises concernant le comportement mécanique des sols non saturés en interaction avec la succion et l'état physico-chimique du sol. Une partie importante du volet 2 a été consacré à l'établissement de fonctions de pédotransfert pour les propriétés mécaniques. Les laboratoires impliqués dans les mesures de propriétés mécaniques des sols ont mis au point un protocole commun de préparation des éprouvettes de sol et de réalisation des tests mécaniques (oedomètre pneumatique ou oedomètre à poids). Ce protocole [L18] tient compte des spécificités du tassement en sols agricoles (temps de chargement rapide, contraintes faibles, variations importantes de l'état physique du sol au cours du temps) par rapport aux sols utilisés en géotechnique pour lesquels on dispose déjà de normes Afnor. Ce protocole permet de réaliser des mesures à grande échelle dans la suite du programme en vue d'établir des fonctions de pédotransfert « mécaniques » adaptées aux conditions de sols français. Les sols ont été prélevés sur 11 sites. Ils se répartissent sur l'ensemble du triangle des textures (sables, limons, argiles). Les effets des variations de l'état hydrique des sols liées au climat sur leur comportement mécanique ont été étudiés par des essais de laboratoire (des essais classiques oedométriques, des essais oedométriques avec un contrôle de la succion, ou une mesure in situ de la succion). Des mesures de perméabilité à l'air en fonction de la déformation du sol ont aussi été conduites pour analyser ce comportement hydromécanique des sols. La comparaison du comportement mécanique d'échantillons de sol remaniés ou non a permis d'évaluer l'effet des pratiques culturales sur la sensibilité des sols au tassement. Les échantillons de sol provenaient de sites expérimentaux modulant fertilisation minérale ou type de production (biologique, labour, semis-direct, pâturage).

La modélisation des déformations du sol repose sur le développement de la modélisation 2D des tassements via le développement de modèles analytiques (SOILFLEX) ou l'utilisation de modèles FEM (PLAXIS). La mise en œuvre du modèle 1D COMPSOIL pour faire de la prévision de risque de tassement et de la spatialisation de ces risques a nécessité des développements méthodologiques non prévus. Une application informatique (sous Access) a notamment été développée au cours du projet pour relier une base de données sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques des sols et le modèle COMPSOIL. Cette application permet de faire des simulations de tassement avec différents niveaux d'information sur les sols. Elle intègre également différents seuils pour le tassement sévère.

Volet 3 : Prévention des tassements

Dans ce travail, nous nous sommes focalisés sur le développement d'un outil d'aide à la décision permettant d'améliorer les interventions agricoles ou sylvicoles. Le principe est de faire fonctionner un modèle de transfert hydrique pour donner une estimation de la teneur en eau qui sera utilisée comme critère de décision pour une opération culturale. Le modèle de transfert hydrique doit fonctionner avec un forçage climatique. A partir des relevés climatiques, il est donc possible de donner une estimation de la teneur en eau à l'instant présent. Avec des prévisions météorologiques, il est possible de donner des prévisions de la teneur en eau sur quelques jours.

L'enjeu du travail était de pouvoir mettre en œuvre le modèle de transfert hydrique. La difficulté réside dans l'estimation des paramètres du modèle, son initialisation et les conditions limites à la base du système. Deux types de situation contrastés ont été retenus à savoir les sols nus (cas représentatif de toutes les opérations d'implantation des cultures) et le cas des couverts forestiers. Le cas des sols nus a été abordé avec le modèle TEC (Chanzy et Bruckler, 1993). C'est un modèle mécaniste de transferts couplés d'eau et de chaleur qui présente l'avantage de bien prendre en compte le couplage avec l'atmosphère et ainsi de pouvoir utiliser les données climatiques pour calculer les flux de surface (évaporation notamment) sans hypothèse forte. Pour le cas des forêts, le modèle MIN3P a été retenu. Ce modèle est légèrement simplifié par rapport au modèle TEC sur les processus de transfert dans le sol, mais il prend en compte les interactions avec la végétation.

L'approche suivie dans le cas des sols nus a été la suivante :

- Analyse de sensibilité du modèle TEC aux différentes entrées du modèle.
- Développement d'une méthodologie pour mettre en œuvre le modèle TEC dans un contexte d'information limitée (mesures climatiques, mesures de la texture et du taux de matière organique) en travaillant sur des séries de données simulées. Ainsi, des simulations de références ont été réalisées en utilisant des situations pour lesquelles le modèle TEC avait été calé sur des données expérimentales.
- - Evaluation de la précision obtenue avec le modèle TEC mis en œuvre selon la méthodologie développée dans le point précédent. Des jeux de données existants ou acquis dans le cadre du projet par les différents partenaires (expérimentation ITB à Pithiviers, expérimentation ARVALIS à Boigneville, expérimentation ONF au Breuil, expérimentations INRA sur les sites Alpilles/ReSeDA, Avignon et Mons) ont été utilisés pour cette tâche. Ces expérimentations présentent toutes un contrôle de l'humidité ainsi que le recueil des données climatiques et des informations de base sur le sol (densité, texture, teneur en matière organique).
- Apport de mesures additionnelles pour améliorer les estimations d'humidité. Nous avons considéré les cas où les propriétés hydrodynamiques sont mesurées par des techniques de laboratoire (méthode de Wind) ou par des mesures de caractérisation simplifiée telle que la méthode de Beerkan (De Condappa et Soria Ugalde, 2002). Cette dernière est simple à réaliser et pourrait être mise en œuvre par un technicien agricole. Nous avons également considéré le cas où le gestionnaire de la parcelle peut faire des mesures in situ d'humidité du sol. Nous avons mis en place deux types d'assimilation de données. Une première voie d'assimilation (assimilation variationnelle) consiste à ajuster certains paramètres du modèle TEC de manière à reproduire les observations. La seconde voie (assimilation séquentielle) consiste à corriger les sorties lorsqu'une mesure est disponible. La méthode utilisée est un filtre de Kalman simplifié (la covariance entre variables est déterminée de manière *a priori*). Une telle approche tient compte des erreurs expérimentales et des erreurs du modèle pour trouver le meilleur compromis.

Pour les forêts, seule l'analyse de sensibilité des différentes variables et des paramètres d'entrée a été réalisée à partir des résultats expérimentaux du Breuil. Le travail n'a pu être mené plus loin du fait de la difficulté, accrue en milieu forestier, d'estimation de la teneur en eau des sols, du manque de références expérimentales en milieu forestier et du départ du principal chercheur concerné.

Volet 4 : Suivi de l'évolution des tassements

L'objectif de ce volet est double :

- améliorer nos capacités de caractérisation du niveau de tassement d'un sol et de son évolution en adaptant les méthodes géophysiques à la problématique de la structure des sols cultivés ;
- étudier les mécanismes naturels de régénération de la porosité d'un sol tassé en vue de prévoir la durée de résilience des tassements en fonction des conditions de milieu.

Dans un premier temps, les variations des propriétés électriques en fonction de la porosité du sol ont été étudiées au laboratoire sur des éprouvettes de sol remanié. Elles ont été comparées aux variations liées à d'autres facteurs du milieu comme la teneur en eau, la température ou la salinité. Les conditions d'utilisation de ces méthodes au champ ont alors été définies. Compte tenu des moyens expérimentaux des partenaires, l'accent a été mis sur la variable mesurable géophysique : la résistivité électrique. Dans un second temps, la faisabilité d'identification des volumes de sol tassés à partir d'une caractérisation des propriétés électriques et magnétiques depuis la surface du sol a été évaluée. Pour cela des volumes de sol tassés à la géométrie et à la localisation bien définies ont été créés. Les données géophysiques ont été comparées aux mesures classiques de caractérisation de la structure du sol (profil cultural, masse volumique, pénétrométrie). Le site de Mons a été un support privilégié pour cette étude. La pollution abondante de débris ferreux sur ce site nous a amené à utiliser le site de Limoron comme site de référence pour les mesures d'anomalies magnétiques.

La méthode électrique peut aussi être utilisée pour caractériser le niveau de fissuration d'un volume de sol initialement tassé. Cela suppose la mise en œuvre d'une méthode numérique d'inversion du signal électrique particulière (méthode des moments) qui nécessite encore de la mise au point (Samouëlian, 2004). L'amélioration du logiciel FISSEL proposée par le laboratoire SISYPHE serait donc un préalable à l'utilisation de la méthode électrique pour l'étude de la fissuration. En parallèle, un suivi de la colonisation par les vers de terre des volumes de sol tassés, dans des systèmes de culture avec ou sans retournement du sol a été mené. Des expérimentations de laboratoire complémentaires nous ont permis d'évaluer l'effet des différentes espèces de vers de terre dans la recolonisation des sols tassés (rôle des anéciques et des endogés).

Volet 5 : Cartographie des tassements

L'objectif de ce volet était d'appliquer la méthodologie de prévision des tassements à la France entière pour parvenir à une cartographie des indicateurs de risque de tassement combinant les caractéristiques intrinsèques du sol et son mode d'utilisation. Il représente donc la synthèse de l'ensemble du projet sous une forme cartographique.

Cela suppose de disposer de données spatialisées sur les sols, les climats, les cultures, les pratiques, les équipements pour déterminer les variables d'entrée des modèles de prévision de la teneur en eau et des tassements. C'est le modèle STICS qui a été choisi pour simuler

l'évolution de la teneur en eau des sols : c'est le seul modèle susceptible de tenir compte du prélèvement d'eau par les racines des plantes pour plusieurs cultures. Les paramètres plante sont bien établis pour les grandes cultures et la vigne, notamment.

Nous avons choisi de travailler à partir de la Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000 car nous disposions déjà d'une expérience d'utilisation de cette base de données avec le modèle STICS : en terme de détermination des unités de simulation (croisement avec les données climatiques ou les données sur les pratiques culturales), en terme d'estimation des paramètres sols de STICS.

Ceci étant, l'ensemble des paramètres « sol » de STICS ne sont pas connus pour l'ensemble des Unités Typologiques de Sol (UTS) présents dans la Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000. Il s'agit notamment des paramètres contrôlant le flux d'infiltration et le flux d'évaporation. Un travail spécifique a donc été conduit pour paramétrer STICS à l'échelle de la France. Le principe [L50] a été (1) d'utiliser un modèle mécaniste de transferts d'eau en sol nu (modèle HYDRUS) pour simuler des évolutions de teneurs en eau en le paramétrant à partir des fonctions de pédotransfert de Wösten (1997), (2) d'inverser STICS pour estimer les paramètres hydriques. La procédure a été appliquée sur 30 UTS décrivant l'essentiel de la variabilité des sols français.

Résultats obtenus

Volet 1a : Impacts agri-environnementaux des tassements

Effets du tassement sur la communauté lombricienne en parcelle de grande culture

De l'étude menée sur ce point [A1, A2, M2], il ressort les trois principaux résultats suivants.

1. 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. Ainsi, le nombre de vers de l'espèce *A. giardi* était plus important dans les parcelles dégradées alors que les vers de l'espèce *A. caliginosa* sont apparus significativement moins nombreux dans ces systèmes.

2. Le suivi des populations après compactage a montré l'impact très important d'un passage d'engin lourd en conditions humides sur les populations de vers de terre et leur activité. L'étude a fait apparaître que le tassement entraînait une baisse de près de 50 % du nombre de vers de terre, soit par une mort directe par écrasement lors du tassement, soit par la fuite des individus hors de la zone tassée. Malgré cela, la structure spécifique des communautés a peu varié.

3. Sur ces mêmes parcelles, nous avons étudié l'impact du tassement sur la géométrie de l'espace poral créé par les vers en comparant, par tomographie aux rayons X, des échantillons prélevés (colonnes de sol de 20 cm de diamètre et 35 cm de profondeur) avant et après les passages de roues en conditions humides. L'observation des échantillons prélevés après le tassement montre une porosité importante dans les 10 premiers centimètres du sol, due en partie aux galeries creusées par les vers endogés revenus rapidement après le tassement. En dessous de ces 10 premiers centimètres, les galeries sont quasiment inexistantes. Elles ont été détruites et les connexions ont été rompues. Un mois après le tassement, les lombriciens n'avaient toujours pas recolonisé ces volumes de sol tassés, situés sous le lit de semences. Ces observations morphologiques ont été confirmées par les mesures de vitesse d'infiltration de l'eau.

Etude expérimentale et modélisation de l'effet du tassement sur le rendement des cultures, le bilan hydrique et le stock de nitrate

Il s'agissait (1) d'analyser l'effet du tassement sur le rendement des cultures, l'évolution du stock d'azote nitrique et le bilan hydrique, à partir de résultats expérimentaux obtenus sur l'essai de longue durée de Mons, (2) de fournir des éléments pour le calage du modèle STICS en fonction du niveau de tassement du sol [M12, M21], afin de fournir des paramètres pertinents pour bâtir les courbes de réponse à l'azote à intégrer dans le modèle économique.

L'effet du tassement sur le rendement des cultures apparaît faible et variable d'une année sur l'autre [M10], en forte interaction avec d'autres facteurs (longueur du cycle, bilan hydrique,...). La figure 2 présente l'ensemble des valeurs mesurées de rendement du blé (en q/ha) sur 6 parcelles de l'essai de Mons en fonction de la teneur en zones denses Δ des couches de sol travaillées (en %), mesurée juste après le semis de la culture, de 1999 à 2006. Cette figure suggère qu'au-delà d'un seuil d'environ 60 % de zones Δ , le rendement est systématiquement affecté.

Lorsque l'on étudie l'évolution du rendement parcelle par parcelle, on constate que le système de culture présentant le plus fort risque de tassement entraîne une variabilité interannuelle plus élevée des rendements, mais que l'effet global sur le rendement est faible.

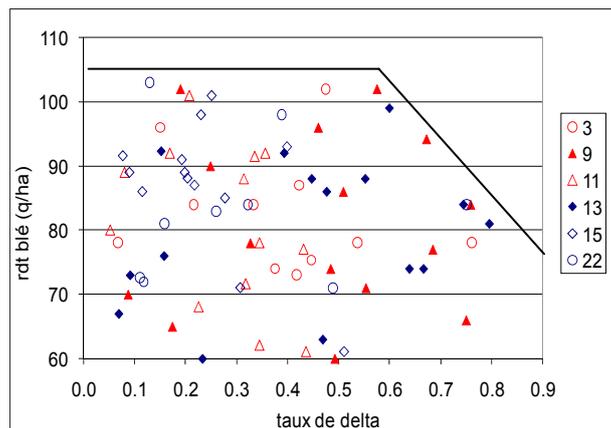


Figure 2 : Rendements du blé en fonction de la teneur en Δ de la couche labourée sur 6 parcelles de l'essai de Mons. Valeurs mesurées entre 1999 et 2006.

La simulation des situations expérimentales de Mons avec STICS a montré que le tassement modifiait les dynamiques hydrique et azotée du sol. En particulier, la fourniture en azote minéral est réduite lorsque la structure est dégradée. La simulation a de plus permis de décorrélérer les facteurs « position et longueur de cycle » d'une part, et « structure » d'autre part. Elle a montré que la variabilité des rendements entre traitements de l'essai était due pour beaucoup aux variations de date de semis et de longueur de cycle (les blés en situation tassée par exemple, étant des blés après betterave semés tard). Ces simulations ont également montré que le tassement pouvait, dans certaines conditions, favoriser le rendement, ce qui correspond à des observations de terrain. En général cependant, les rendements sont plus faibles en sol tassé.

Le modèle ainsi modifié pour y intégrer le tassement a permis d'étudier l'effet d'un accroissement de la masse volumique moyenne du sol sur le ruissellement et la dénitrification

sous des cultures de blé et de maïs [M5]. Les figures 3 et 4 montrent qu'à partir d'une masse volumique de $1,45 \text{ Mg.m}^{-3}$, la dénitrification et le ruissellement sont accrus sous blé et sous maïs (simulations effectuées dans les conditions de l'essai de Mons).

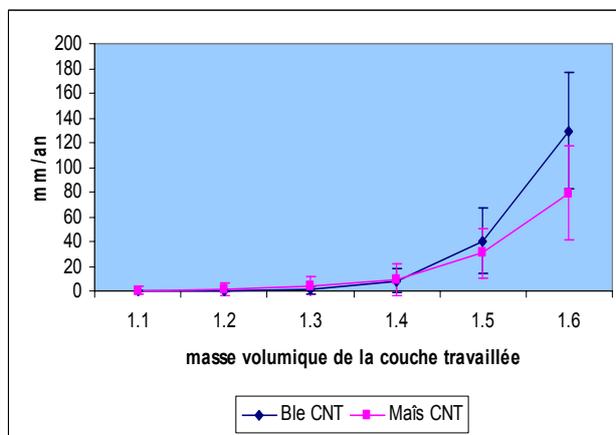


Figure 3 : Simulation avec STICS de l'effet de la masse volumique (g cm^{-3}) sur le ruissellement annuel, sous blé et sous maïs.

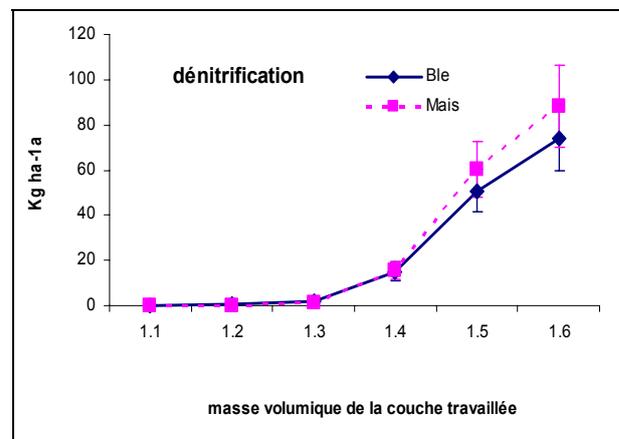


Figure 4 : Simulation avec STICS de l'effet de la masse volumique (g.cm^{-3}) sur la dénitrification sous blé et sous maïs.

Le modèle adapté a également été utilisé pour modéliser les impacts du changement climatique sur les performances agronomiques et environnementales de systèmes de culture typiques de Picardie en fonction du tassement des sols [M17]. L'objectif était de modéliser l'effet du tassement sur le fonctionnement des cultures, sous différents scénarios de changement climatique. Les systèmes de culture testés étaient ceux de Mons. Le changement climatique a été simulé à travers trois scénarios : contrôle, B2 et A2 correspondant respectivement à 360, 660 et 850 ppm de CO_2 . Au cours de ce travail, le modèle STICS a été modifié de manière à pouvoir introduire l'effet du travail du sol avec deux types d'outils : chisel (opérations de déchaumage ou de reprise du labour) et charrue (labour). Ces outils entraînent une fragmentation des zones tassées, ce qui modifie dans le modèle la densité et l'épaisseur des couches travaillées, ainsi que l'infiltrabilité à la base et la rugosité en surface. Ces simulations ont montré que si le changement climatique peut avoir des impacts potentiellement positifs sur le rendement des cultures de printemps, un impact négatif est à prévoir sur l'état du sol en lien avec l'accentuation de la pluviométrie saisonnière.

Modélisation de l'effet du tassement sur le ruissellement et l'érosion

Les résultats des simulations [M16] ont montré que les volumes de ruissellement augmentent très significativement (d'un facteur 50 à 2500 selon l'échelle considérée) avec une augmentation de la masse volumique du sol de 1,3 à 1,6. En conditions de tassement hétérogène, si le tassement est localisé à l'amont, les forts volumes de ruissellement produits en amont ne sont que peu tamponnés par la plus forte infiltration le long du chemin d'écoulement aval. En revanche, l'absence de tassement amont limite fortement le ruissellement. Enfin, dans les cas où le tassement est généralisé, les volumes de ruissellement produits sont les plus importants.

En ce qui concerne l'érosion, l'effet d'échelle est encore plus marqué que pour le ruissellement. L'effet d'une augmentation de la masse volumique du sol de 1,3 à 1,6 se traduit par un accroissement très important du volume de sédiment exporté, celui-ci augmentant d'un facteur 88 à 40000 selon l'échelle considérée — plus l'échelle est vaste, plus l'effet est marqué. En situation de tassement hétérogène, et si le tassement est localisé à l'amont uniquement, l'érosion est un peu plus importante qu'en condition de tassement généralisé.

Cela traduit un effet, cependant faible, de la plus faible résistance aval. Si le tassement est localisé à l'aval, le faible volume de ruissellement amont combiné à une forte résistance du sol à l'aval limite fortement l'érosion : selon l'échelle considérée — 1 ha, 10 ha, 100 ha, le facteur de réduction (Figure 5) est de 13, 50 ou 230 respectivement.

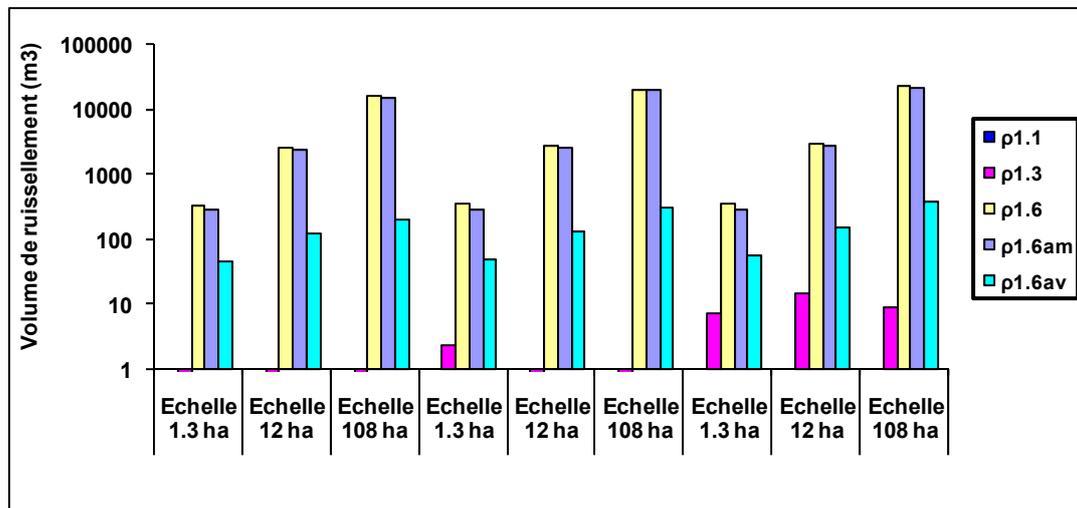


Figure 5 : Volumes de ruissellement simulés en sortie de rigole pour les différentes situations analysées.

Trois conclusions peuvent être tirées de ce travail :

1. La masse volumique du sol influence fortement sa résistance à l'érosion, avec une relation généralement linéaire.
2. L'effet du tassement sur l'érosion est très important et dépend fortement de l'échelle considérée et de la localisation des tassements.
3. Cet effet du tassement sur l'érosion est très largement lié à l'effet de l'augmentation de la masse volumique sur l'augmentation des volumes de ruissellement.

Volet 1b : Modélisation de l'impact économique du tassement des sols

Ce travail a prolongé celui de Caroline Godard (Godard et al., 2008) et a été mené par Edouard Baranger, recruté en CDD sur le projet pour un an à compter d'avril 2006. Les simulations réalisées ont concerné les régions Ile-de-France et Picardie et deux années aux climats contrastés : humide (2000-2001) et sec (2004-2005). Les simulations ont été réalisées avec trois types de tassement (non tassé, moyennement tassé et fortement tassé). Les cultures prises en compte sont le blé tendre, le colza, la betterave et le maïs.

Les premières simulations économiques avec le modèle AROPAj nous ont permis de constater les effets du tassement sur les marges brutes par culture, et par exploitation-type du modèle au niveau régional [A16, L9]. Le constat était cohérent avec les résultats agronomiques, à savoir une baisse de l'ensemble des marges brutes aussi bien au niveau des cultures qu'aux échelles supérieures (Exploitations-types et Régionale) sous l'effet du tassement (Tableau 3).

Réduction de la marge brute (%)	2000-2001	2004-2005
Région Ile-de-France	5,8	7,3
ET1	6,3	7,7
ET2	4,2	6,0

Tableau 3 : Réduction (en %) de la marge brute due au tassement

Comparaison des performances en sol non tassé et en sol très tassé ; en moyenne pour l'ensemble des exploitations de l'Ile-de-France et dans deux des « exploitations-types » de cette région : ET1, représentant les exploitations ne produisant que des grandes cultures et ET2, exploitation-type représentant les exploitations de polyculture-élevage. Simulations pour 2 années climatiques contrastées (2000-2001, année humide et 2004-2005, année sèche).

Nous avons ensuite amélioré la prise en compte du tassement par le modèle économique en introduisant les émissions de N₂O liés aux apports d'engrais azotés. Pour chaque culture et chaque année climatique, les rendements et les émissions de N₂O sont rendus « exogènes », c'est-à-dire simulés à l'extérieur d'AROPAj, par STICS. On peut alors tester, de manière plus juste et mieux adaptée à chaque situation, la mise en place de systèmes de régulation des émissions par le biais de taxes (Figure 6). 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 responsable de l'émission, soit, ici, la quantité d'engrais azoté épandue).

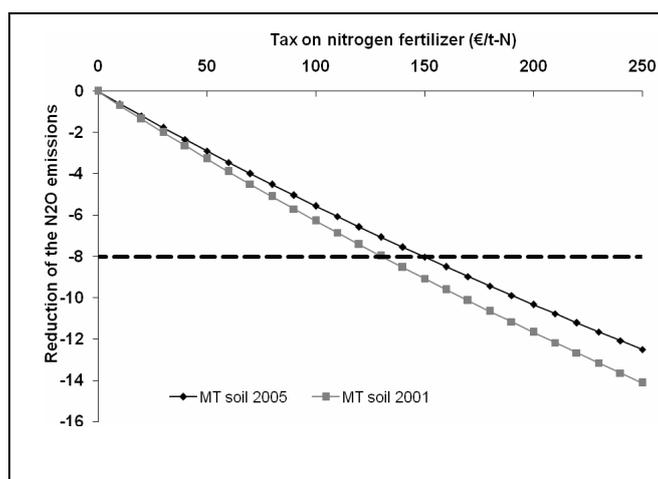


Figure 6 : Effet d'une taxe sur l'engrais azoté sur la réduction de l'émission de N₂O en Région Picardie (en % par rapport au niveau de 1992) pour deux années climatiques et pour un sol limoneux dont le niveau de tassement est intermédiaire entre un sol non tassé et un sol totalement tassé.

Cet outil a ensuite été utilisé pour étudier 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 [L10]. Plus précisément, si l'on considère qu'une récolte plus tardive de la betterave augmente son rendement mais aussi le tassement, la culture suivante serait affectée d'une part par le report du semis, mais également par le tassement (hypothèse suggérée par l'essai de Mons). 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. Les simulations réalisées, ainsi que les pondérations retenues sont présentées au tableau 4.

Dates de simulation

Arrachage betterave	Semis blé tendre	Proportion de sol non tassé
15/09	30/09	80
30/09	15/10	70
15/10	30/10	60
30/10	15/11	50
15/11	30/11	40

Tableau 4 : Dates de simulation utilisées dans le modèle STICS pour les arrachages de la betterave et les semis du blé ainsi que les pondérations retenues pour chaque date pour la proportion de sol non tassé par rapport au sol tassé (en %)

Les simulations montrent que l'allocation des terres est peu affectée par une taxe sur les émissions de N₂O, favorisées par le tassement. Tant que le niveau de la taxe est faible, l'impact se fait surtout sentir sur la production (par le fait du « déplacement » sur les courbes de réponse, la taxe jouant comme une augmentation de prix des intrants). Il en est autrement lorsque les récoltes sont retardées, le tassement agissant alors fortement sur la culture suivante, en plus du retard dans la date de semis. Compte tenu des cultures pour lesquelles le tassement joue le plus, on observe des substitutions de terres entre les céréales (blé-orge-maïs) au détriment du blé et un report significatif sur les jachères, ceci pour des niveaux de taxe assez faibles (25 € en 2001, et 80 € en 2005), l'effet « climat » se combinant à l'effet « tassement ».

Dans ces simulations, on a fait varier la taxe sur les émissions de GES de 0 à 125 €/tCO₂eq. Les simulations montrent que le peu de 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 (les courbes ne se croisent pas). Contrairement à ce qui était attendu, la précocité de date de récolte semble favorisée, sauf dans le cas de la Picardie en 2001. Dans ce dernier cas, tant que la taxe GES reste à un niveau inférieur à 60 €/tCO₂eq, 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. Il est à ce stade difficile d'établir ce qui oriente ainsi les résultats, qu'il s'agisse du modèle STICS et de son utilisation, des hypothèses faites sur le tassement (part des surfaces concernées, déformation des courbes de réponse, succession des cultures), ou de la représentation par AROPAj du fonctionnement des exploitations et de leur représentativité [L10].

Volet 2 : Prévision des tassements

Les résultats du volet 2 ont concerné l'évaluation des contraintes exercées à la surface des sols par les engins agricoles et forestiers, l'estimation de l'effet de certaines pratiques agricoles et forestières (gestion des résidus de cultures, présence d'un couvert hivernal, intervention en forêt en conditions saturées) sur la sensibilité des sols au tassement, l'acquisition de références concernant les paramètres de résistance mécanique des sols agricoles en France, et la prévision par modélisation des déformations du sol.

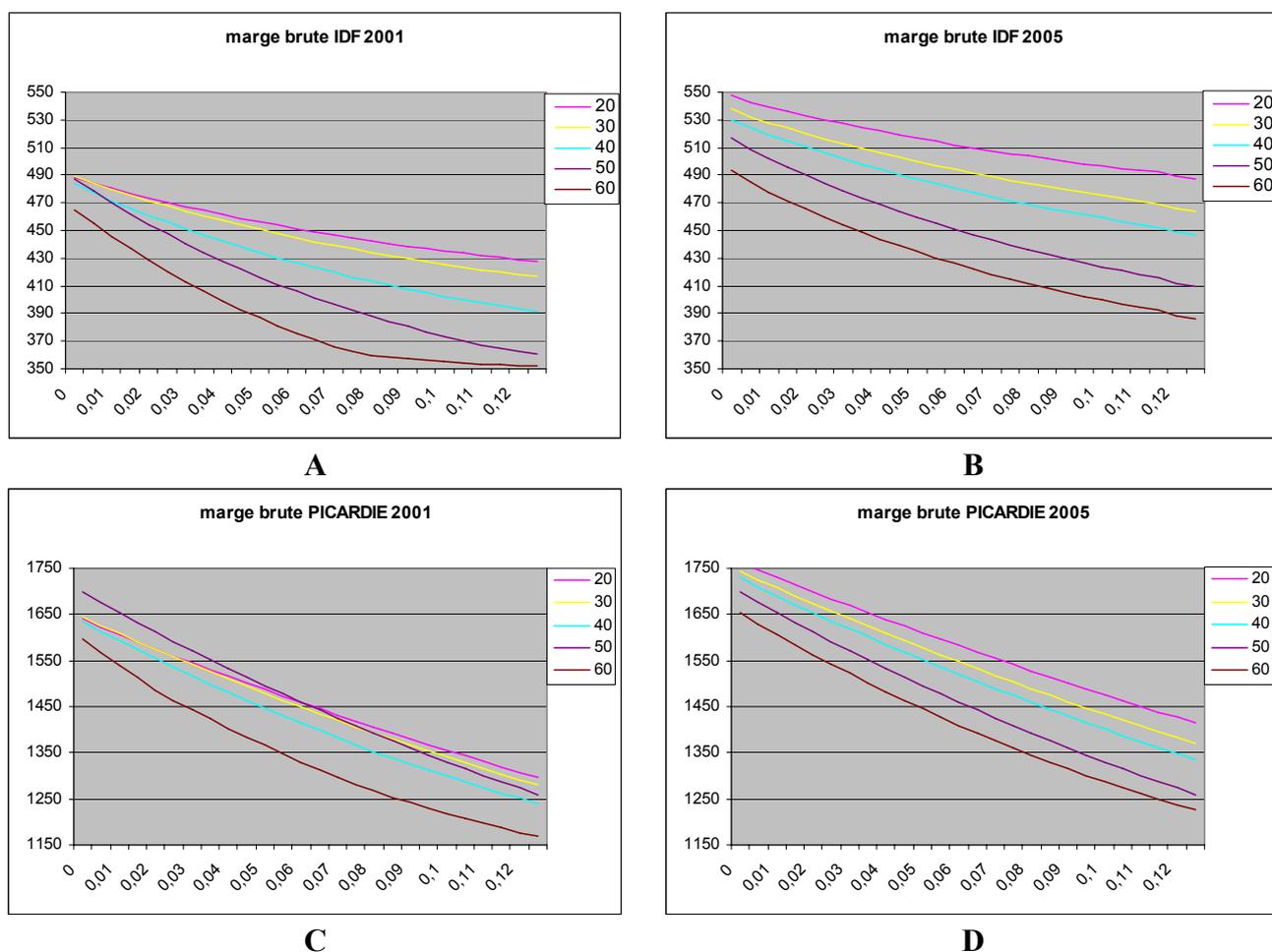


Figure 7 : Variation des marges brutes agricoles agrégées à l'échelle régionale, exprimée en M€ en fonction de la taxe sur les émissions de gaz à effet de serre exprimée en k€/tCO₂eq.

Chaque courbe correspond à la fois à un couple « date de récolte de la betterave / date de semis du blé » et à un degré de tassement des parcelles de blé suivant la betterave, pris en charge à travers la relation azote/rendement. Dates de récolte de la betterave (20 = 30/09 et 20% de la surface tassée ; 30 = 14/10 et 30% de la surface tassée ; 40 = 30/10 et 40% de la surface tassée ; 50 = 14/11 et 50 % de la surface tassée ; 60 = 29/11 et 60 % de la surface tassée). IDF = Ile-de-France.

Contraintes

Une première étude bibliographique [M8] et des mesures *in situ* ont permis de tester la validité de six modèles d'aires de contact : le modèle COMPSOIL est le plus performant pour les pneus agricoles et viticoles. C'est donc le modèle COMPSOIL qui a été retenu pour estimer les contraintes à l'échelle de la France.

L'enquête sur les différents équipements utilisés dans les différents systèmes de culture a permis d'établir une classification des régions françaises en fonction des équipements utilisés. Les principaux matériels utilisés par culture ont été recensés en fonction (1) de leur date d'utilisation, (2) du type d'intervention (semis, transport, récolte, etc.) et (3) de la zone d'utilisation. On a pu classer les chantiers en fonction de leur niveau de contrainte au sol : ce sont les chantiers de transport qui ont les niveaux de contrainte les plus élevés. Pour les grandes cultures et les forêts, les contraintes les plus élevées sont de l'ordre de 180 kPa. Pour les gros porteurs en vigne, elles atteignent 250 kPa. Ces contraintes correspondent à une valeur moyenne sur la surface de contact. Or elles peuvent atteindre localement des valeurs très supérieures (le double pour des sols très meubles) dont il faudra tenir compte par la suite. De plus cette étude a permis d'estimer la surface cultivée affectée par ces tassements. Ainsi en

grande culture, les contraintes appliquées concernent 65 % de la parcelle lors de la récolte de la betterave tandis que pour la culture du blé d'hiver seule 25 % de la parcelle est affectée par les tassements à la récolte. En vigne, la localisation des passages des engins est imposée (entre les rangs de vigne). En forêt, on a estimé à 20 % la surface affectée par les tassements.

Modélisation du fonctionnement hydromécanique des sols

Nous avons analysé l'effet de certaines pratiques agricoles sur la sensibilité des sols au tassement par simulation pour étudier l'effet du statut organique pour (i) la mise en place d'un couvert hivernal et ses conséquences en termes de fonctionnement hydrique au printemps, et pour (ii) l'exportation des pailles et la diminution du taux de carbone organique dans les sols (programme CARTOPAILLE de la Région Picardie). Les simulations réalisées à l'aide du modèle STICS ont montré que, sous climat actuel, la mise en place d'une culture intermédiaire ralentit la vitesse de ressuyage du sol au printemps [M24]. Cela peut provoquer des retards fréquents de semis d'environ 10 jours pour conserver une même qualité du lit de semences (évalué dans le cas d'une orge de printemps). Le jeu de paramètres pourra être utilisé pour évaluer l'intensité du tassement selon la date de semis en présence ou non d'une culture intermédiaire. Pour la culture de la betterave, on a très peu de jours disponibles. C'est principalement la différence de régime hydrique en fonction du carbone qui influence le nombre de jours disponibles, et peu les variations de la résistance mécanique du sol avec sa teneur en carbone. 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 risque de tassement [L15, L16].

Nous avons proposé en collaboration avec F. Collin (Université de Liège, Belgique) une prévision de tassement pour les sols en forêt en conditions très humides basée sur un calcul de profondeur d'ornièrre à l'aide du code de calcul LAGAMINE [L24]. Cependant ce résultat est pour le moment limité par la grande sensibilité du calcul au choix de la loi de comportement du sol que l'on ne connaît pas a priori pour les sols de forêt. Pour améliorer ces prévisions, il faut progresser dans notre connaissance des lois de comportement de ces sols. Des mesures sont en cours de réalisation à l'aide d'un appareil triaxial et permettront d'améliorer les premiers résultats acquis dans le cadre du projet DST.

Modélisation des tassements

Acquisition de références - analyse du comportement mécanique des sols agricoles, forestiers et viticoles

Les résultats sur la connaissance des propriétés mécaniques des sols en France concernent trois axes :

- l'analyse des effets de pratiques agricoles sur les propriétés mécaniques selon les systèmes de culture et les amendements ;
- l'analyse de l'effet du climat sur les propriétés mécaniques en se focalisant sur l'effet des variations de l'état hydrique du sol ;
- la généralisation et la simplification de ces connaissances pour des sols de différentes textures via des fonctions de pédotransfert pour les propriétés mécaniques.

Un résultat important du volet 2 est l'établissement de fonctions de pédotransfert pour les propriétés mécaniques [A12, L17]. Nous avons établi une première classification des propriétés mécaniques en fonction des sols où il apparaît qu'une classification en fonction du triangle des textures utilisé en physique du sol est plus adaptée qu'une classification parmi celles utilisées en géotechnique [M1]. Cette conclusion repose sur une analyse des corrélations proposées en géotechnique en fonction de caractéristiques facilement accessibles

pour les sols comme les limites d'Atterberg. Pour chaque classe de sol, on dispose de corrélations qui permettent de prévoir la compressibilité du sol (C_c) et la pression de précompression (p_c) en fonction de l'état du sol à un temps donné (masse volumique, teneur en eau). Cette classification ne contient actuellement que 10 sols (25 horizons de sol), des moyens supplémentaires seraient nécessaires pour l'étendre à une plus large gamme (Figure 8).

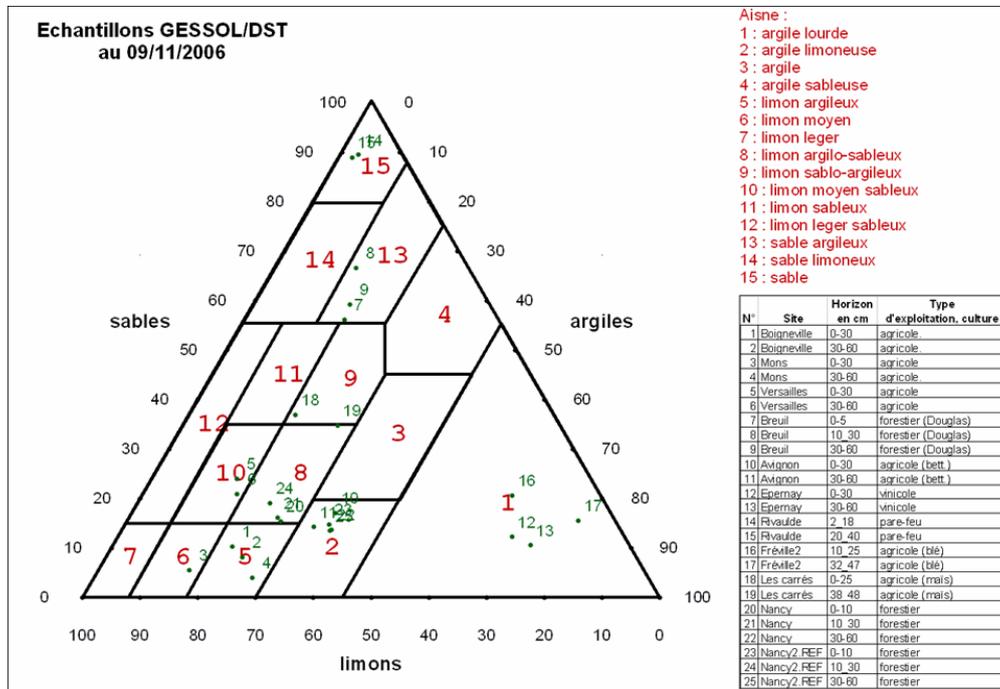


Figure 8 : Position des horizons prélevés pour DST sur le triangle de texture en 15 classes de texture

Nous avons amélioré nos connaissances sur les effets des variations de l'état hydrique des sols liés au climat sur leur comportement mécanique. Les mesures œdométriques (Figure 9) réalisées par le Cermes montrent un effet de la texture sur la relation entre l'indice de compression et la teneur en eau $C_c(w)$ laissant supposer un effet du temps de chargement d'autant plus important que la fraction argileuse est grande. De plus la courbe de compression $e(p)$ ne suit pas strictement le modèle logarithmique à deux pentes (C_s , C_c) [T1, A13, A16, A17]. Pour les sols argileux, il y a une inflexion de la courbe qui correspond à une saturation de l'échantillon [A15, M6]. Ces effets ont été analysés plus finement par des mesures de perméabilité à l'air en fonction de la masse volumique du sol et de la teneur en eau du sol [M14]. Ces mesures ont permis d'analyser l'effet de l'eau en relation avec la porosité du sol sur les propriétés mécaniques [A5]. Nous avons également étudié ces interactions hydromécaniques par des essais mécaniques avec une mesure de la succion in situ au cours de la déformation. Ces travaux ont permis de montrer que pour les conditions spécifiques de tassement en sols agricoles, la succion varie peu au cours de la compression contrairement aux sols employés usuellement en géotechnique. Nous attribuons cette différence aux faibles valeurs de succions, aux faibles contraintes mécaniques et à la texture généralement plus fine des sols cultivés. Ce résultat démontre la spécificité des sols à usage agricole ou forestier pour lesquels on peut utiliser des modèles de déformation du sol plus simples que pour les sols non saturés en géotechnique (modélisation « en contrainte totale »).

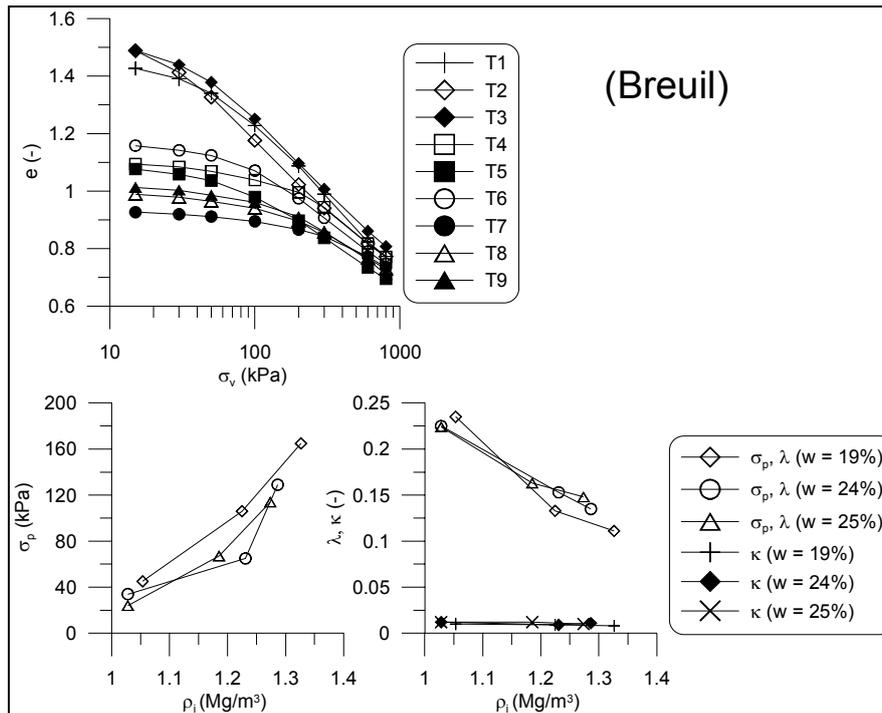


Figure 9 : Propriétés mécaniques d'un sol sous forêt : site de Breuil

Nous avons conduit plusieurs études sur les effets des pratiques culturales sur la sensibilité des sols au tassement. Ainsi, l'apport d'amendements basiques visant à modifier le pH des sols modifie la compressibilité du sol (le paramètre C_c) mais peu la pression de précompression (p_c). Ces effets seraient dus à la combinaison d'une modification de la porosité du sol et de l'hydrophobicité des sols acides du fait de la neutralisation des charges variables [L23]. Par ailleurs, une comparaison globale de différents systèmes de culture (système productif/intégré (labouré tous les deux ans), système biologique (interculture de luzerne), système avec semis direct) a montré que les effets sur les propriétés mécaniques étaient principalement liés à l'évolution de la structure des sols en fonction du système de culture. Ce travail a permis d'analyser les propriétés mécaniques d'échantillons intacts comparées à celles estimées sur des échantillons de sol remaniés. Elles donnent des informations sur le degré d'application des fonctions de pédotransfert établies dans le projet DST sur des sols remaniés, à des structures de sol intacts [L25].

L'ensemble de ces résultats permet de relier les pratiques agricoles, forestières ou viticoles à la résistance mécanique des sols. Celle-ci est principalement contrôlée par :

- la masse volumique du sol qui peut être modulée par des amendements organiques et par le passage d'engin
- la teneur en eau du sol lors du passage des engins qui peut être contrôlée par une bonne gestion des dates d'intervention dans les parcelles.

Prévision par modélisation des déformations du sol

Pour la prévision du tassement, les résultats concernent deux axes :

- le développement de la modélisation 2D du tassement
- la quantification des incertitudes des prévisions 1D et l'établissement de critères de tassements critiques.

Plusieurs études ont contribué à améliorer la modélisation 2D du tassement. La première est une généralisation du modèle COMPSOIL à un formalisme en deux dimensions et intégrant l'ensemble des références actuelles sur les modèles semi-analytiques (modèle SoilFlex). Ce travail a été réalisé en collaboration avec le département de Science du Sol de l'Université d'Uppsala (Suède). Ce modèle appelé Soilflex [A8] permet une estimation de l'aire de contact entre le pneumatique et le sol et une estimation de la distribution des contraintes qui s'y applique pour les différents pneumatiques utilisés usuellement (roues jumelées, roues tandem...). Il estime la propagation des contraintes dans le sol et les déformations qu'elles induisent. Pour cela, il utilise différentes relations contraintes-déformations proposées dans la littérature pour décrire le comportement mécanique du sol. Une comparaison avec des données expérimentales montre que le modèle donne des estimations satisfaisantes des contraintes dans le sol et des masses volumiques résultantes. Le modèle Soilflex se présente sous la forme d'une feuille Excel® et peut ainsi être utilisé par des non spécialistes en mécanique des sols en particulier des conseillers techniques.

La seconde étude contribuant à améliorer la modélisation 2D du tassement est la proposition d'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). Dans la modélisation des tassements par les engins agricoles, une des difficultés est d'estimer la distribution des contraintes qui s'appliquent à la surface entre le pneumatique et le sol. Cette distribution est inhomogène et dépend fortement des propriétés du pneumatique et du sol. Or les mesures *in situ* sont délicates à réaliser, de sorte que peu de données expérimentales sont disponibles pour établir une correspondance entre distribution de contraintes à la surface, type de pneumatique et résistance mécanique du sol. Nous avons proposé une méthode numérique pour générer des distributions de contraintes à la surface du sol et étudier numériquement l'effet de la rigidité du pneumatique et l'effet de la résistance mécanique du sol [T1, A4]. On a ainsi montré que la cohésion du sol modifie la forme de la distribution : une forme parabolique peut être obtenue pour un sable et une forme en U (maximum aux bords du pneumatique) peut être obtenue pour un sol argileux (Figure 10). Ces résultats sont corroborés par les données expérimentales de la littérature.

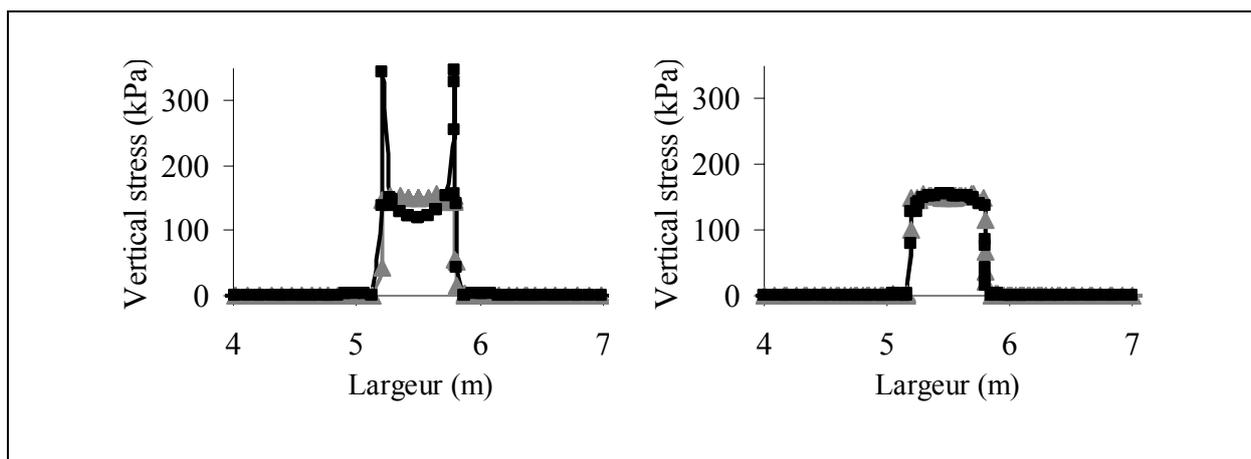


Figure 10 : Simulations des distributions de contrainte verticale à la surface du sol pour un sol argileux (à gauche) et pour un sol sableux (à droite)

Evaluation de l'incertitude des prévisions de tassement 1D par le modèle COMPSOIL

Les travaux sur la prévision du tassement ont porté également sur la qualité des estimations de tassement que l'on peut obtenir avec le modèle COMPSOIL, modèle plus simple à paramétrer

et qui est utilisé à l'échelle de la France dans le cadre la thèse de M.-P. Lefèbre (Unité Science du Sol INRA Orléans). Une étude numérique a été conduite pour quantifier l'incertitude des intensités de tassement simulées par le modèle COMPSOIL. Elle prend en compte (i) l'incertitude des valeurs des paramètres mécaniques du sol (mesurés directement ou estimés indirectement à partir de fonctions de pédotransfert établies dans le cadre du projet DST) et (ii) la sensibilité du modèle à la masse volumique du sol avant tassement. Cette analyse de la qualité des estimations de tassement repose en partie sur une confrontation avec des données expérimentales (Figure 11). Or les données disponibles se sont avérées très insuffisantes. Il a été décidé au cours du projet DST d'acquérir des références complémentaires sur des essais de tassement réalisés en conditions réelles à l'aide d'engins agricoles, forestiers ou viticoles pour différents sols. Huit essais de tassement ont été réalisés sur les différents sites expérimentaux du projet DST (Azerailles, Boigneville, Mons, Fort Chabrol, Breuil) et sur des sites choisis pour élargir la gamme de sols étudiés (sol calcaire du Domaine de Fagnières, sol sableux de Rivaulde). L'analyse a été conduite sur trois sites, et doit être étendue à l'ensemble des huit sites [C17 ; L22].

Un dernier aspect concerne l'analyse des sorties du modèle COMPSOIL en terme de tassements critiques. L'analyse de l'effet multi-impact du tassement (volet 1 du projet DST) nous a conduit à proposer différents critères de tassement sévère et non pas un critère unique. Notre critère repose sur la notion de porosité structurale. Cette méthode tient compte de la teneur en eau et de la texture du sol et renouvelle ainsi les critères proposés dans la littérature internationale pour évaluer le tassement d'un sol. Des mesures de courbe de retrait sur des agrégats de 2-3 mm ont été réalisées pour permettre de quantifier la porosité structurale et texturale de 10 horizons de surface étudiés dans le projet DST. La mise en œuvre de cette méthodologie et sa diffusion seront réalisées ultérieurement [A7].

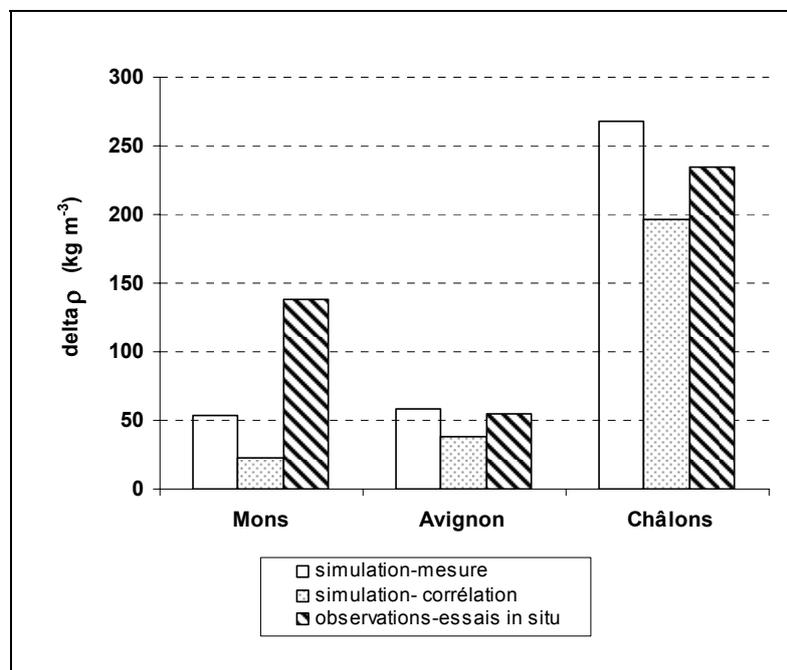


Figure 11 : Augmentation moyenne de masse volumique sur 0-30 cm après le passage d'un engin, obtenue par simulation avec le modèle COMPSOIL avec deux niveaux d'information et mesurée par des essais de tassement in situ

Une simulation de base a été réalisée en introduisant les paramètres du sol effectivement mesurés avec une discrétisation du sol en 10 couches (simulation-mesure), une seconde simulation en dégradant l'information sur propriétés mécaniques et en introduisant pour les paramètres mécaniques les corrélations établies par le projet DST (simulation-corrélation).

En conclusion du volet 2, nous avons réalisé des progrès significatifs dans la compréhension des processus et de leur modélisation, grâce à la collaboration d'équipes de recherche issues de disciplines différentes (physico-chimie des sols agricoles, mécanique des sols non saturés en géotechnique, modélisation du comportement mécanique des sols, ...) ayant travaillé sur une même gamme de sols de référence. Ces travaux seront poursuivis à l'issue du projet DST (post-doctorant SIMSOL, projet innovant en préparation). Des résultats plus opérationnels ont aussi été obtenus. Ils proviennent de la mise en œuvre de modèles de déformation pour la prévision de risque de tassement des sols en interaction avec les autres volets du projet (volets 1, 3 et 5 principalement). Les résultats sont des outils informatiques ou des méthodologies : acquisition de références sur les contraintes appliquées, fonctions de pédotransfert pour les propriétés mécaniques, incertitudes des prévisions, notion de seuil critique de tassement dont la mise en œuvre a été partiellement réalisée dans le cadre du projet et sera poursuivie à l'issue du projet DST.

Volet 3 : Prévention des tassements

Mise en œuvre du modèle TEC

Ce travail, réalisé dans le cadre de la thèse de Mohamed Mumen [T2], a permis d'identifier les paramètres du modèle mécaniste de transferts couplés d'eau et de chaleur TEC, développé à l'INRA d'Avignon, les plus sensibles vis-à-vis de l'estimation de la teneur en eau dans les couches de surface (de 0 à 30 cm). 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 avec un coût raisonnable. Des stratégies de mise en œuvre ont donc été développées pour contourner cette absence de mesures 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) [M7]. L'étude a été menée sur le site expérimental de Mons. Cette étude a été complétée par des simulations réalisées sur des sols de textures différentes présentant des propriétés hydrodynamiques contrastées. Il ressort de ce travail [A2] :

- que certaines fonctions de pédotransfert telles que celle de Wösten (1997) permettent d'atteindre une précision sur la teneur en eau d'environ $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (erreur caractérisée par un écart-type) et que la réalisation d'une caractérisation hydrodynamique des couches de surface avec des méthodes de terrain (Beerkan) ou de laboratoire (Wind) n'offre pas une garantie d'amélioration des résultats. Les fonctions de pédotransfert ne permettent néanmoins pas de bien simuler l'effet de la structure du sol qui varie au cours du temps sous les actions conjuguées du travail du sol et du climat.

D'un point de vue opérationnel, on propose de retenir la fonction de pédotransfert de Wösten.

- que l'initialisation demeure un problème sérieux pouvant conduire à des erreurs comparables à celles engendrées par l'utilisation des fonctions de pédotransfert. On montre qu'il est souhaitable d'initialiser le modèle après un épisode pluvieux. En cas de doute sur la teneur en eau, il est préférable de surestimer l'humidité. En effet, cette surestimation conduit à une conductivité hydraulique plus importante favorisant les transferts et une convergence plus rapide vers la réalité. *A contrario*, un démarrage des simulations en condition trop sèche marque plus durablement les profils de teneurs en eau

obtenus. On montre également que les pluies permettent d'atténuer l'effet d'une mauvaise initialisation

D'un point de vue opérationnel, on propose d'initialiser le modèle 24 heures après un épisode pluvieux important. Cette initialisation doit se faire avec un potentiel hydrique estimé à -1 m, quitte à surestimer la quantité d'eau dans le sol. Nous recommandons de ne pas considérer la teneur en eau pendant une période de mise à l'équilibre du modèle dont la durée doit être de 70 jours (50 jours si le cumul pluviométrique dépasse 50 mm).

- que l'impact des conditions à la limite inférieure peut être très important pour des sols conducteurs dans lesquels les flux de remontées capillaires semblent exagérés si le potentiel à la base du profil est mal prescrit. Dans ces cas, il est préférable de caractériser la condition à la limite inférieure par un flux gravitaire. Une telle préconisation doit être manipulée avec précaution. En effet, si elle semble convenir pour des périodes relativement humides avec une demande climatique faible à modérée, il n'en sera pas de même en condition plus sèche avec une forte demande climatique. Dans ce cas, les remontées capillaires ne peuvent être représentées avec un flux gravitaire qui serait de sens opposé à la réalité.

D'un point de vue opérationnel, en condition de sols humides et sous une demande climatique faible à modérée, on propose d'employer un flux gravitaire pour décrire le flux à la base de la couche de sol considérée dans la modélisation.

Nous avons appliqué les recommandations précédentes à plusieurs expériences. 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). Un exemple de résultat est donné sur la figure 12.

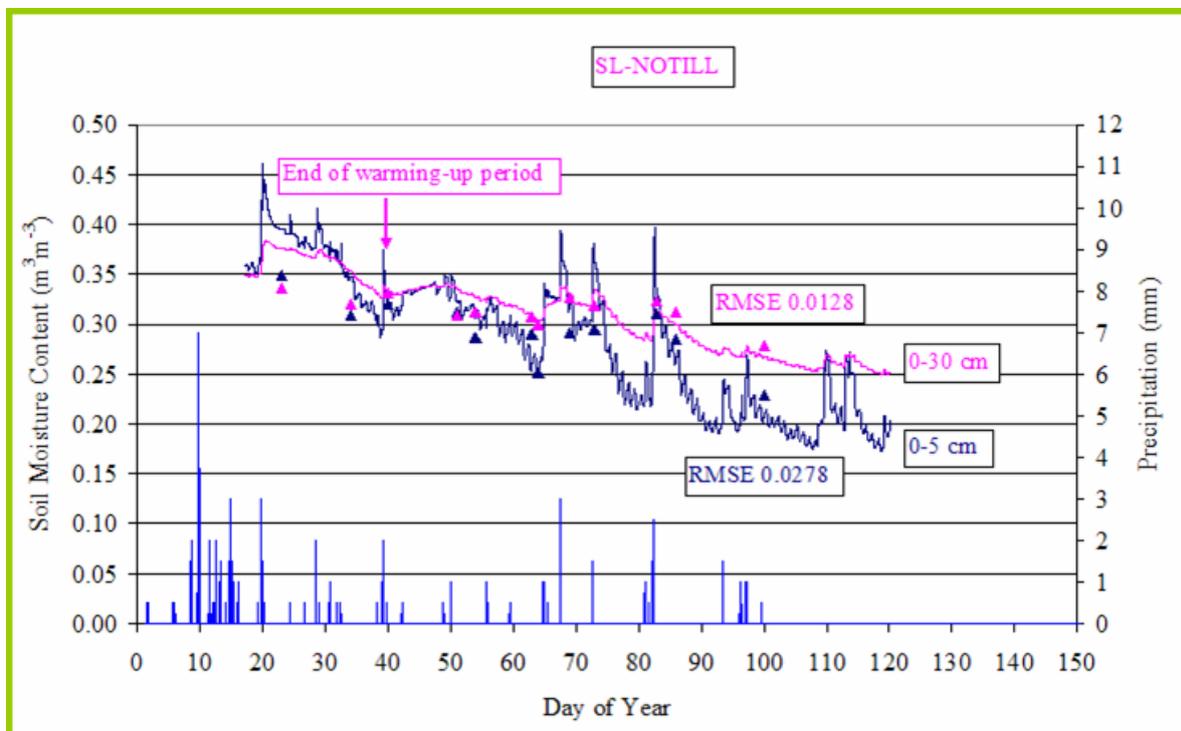


Figure 12 : Estimation de la teneur en eau des couches 0-5 cm et 0-30 cm d'un sol limoneux à l'aide du modèle de transferts d'eau TEC

Impact des mesures in situ sur la qualité des estimations de la teneur en eau

Les résultats obtenus sur l'expérimentation montrent que la mesure des propriétés hydrodynamiques par les méthodes de Wind ou BeerKan n'amène pas de résultats meilleurs que ceux obtenus en utilisant la fonction de pédotransfert de Wösten.

Concernant l'assimilation des données d'humidité [M19], les résultats montrent que l'inversion sur la courbe de rétention de la couche de surface donne des résultats légèrement meilleurs lorsqu'on cherche à estimer la teneur en eau dans les 5 premiers centimètres. Par contre, si on cherche à simuler l'humidité dans les 30 premiers centimètres, l'inversion sur la conductivité hydraulique de la première couche conduit aux meilleurs résultats. La précision obtenue sur l'humidité est inférieure à $0,025 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (donnée par un écart-type) à l'exception du sol tassé qui présente une situation très particulière (Figure 13). Ce résultat est obtenu avec une mesure tous les 15 jours et n'est guère amélioré si on double la fréquence de mesures. Ceci constitue une nette amélioration par rapport à la précision de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ obtenue dans le cas où aucune mesure de teneur en eau n'est disponible.

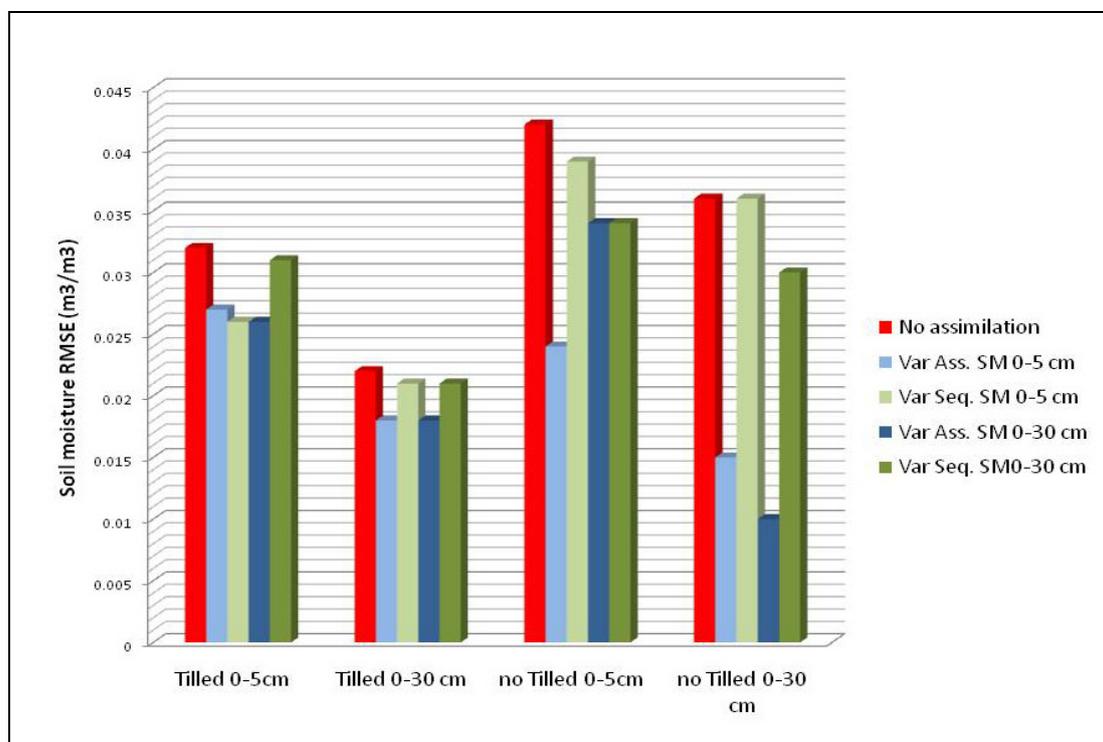


Figure 13 : Erreur sur l'estimation de l'humidité de surface lorsque l'humidité mesurée (SM) dans les 5 ou les 30 premiers centimètres est assimilée

Deux schémas d'assimilation sont considérés : l'assimilation variationnelle (en bleu) et séquentielle (en vert).

Avec la seconde technique, nous avons adopté une approche séquentielle en mettant en œuvre un filtre de Kalman. Afin de ne pas pénaliser les temps de calcul, nous avons utilisé une approche simplifiée en faisant une hypothèse sur les valeurs prises par la matrice de covariance utilisée pour calculer le gain de Kalman. Les résultats obtenus sont décevants. On montre que la correction de l'humidité dans les couches de surface présente une durée de vie limitée. Ainsi l'impact positif de la correction, lorsqu'une mesure d'humidité existe, s'atténue rapidement. Une amélioration possible est de mieux prendre en compte les covariances entre l'humidité de surface et celles des couches plus profondes. Une autre amélioration possible serait de combiner les approches variationnelle et séquentielle en exploitant l'historique de données.

Efficacité des estimations de la teneur en eau pour la prise de décision

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 optimisé pour chacun des sols. La figure 14 représente le pourcentage de jours pour lequel on commet une erreur dans l'appréciation du niveau d'humidité par rapport à un seuil [M4].

Trois méthodes d'appréciation sont comparées : 1) on s'appuie sur le scénario défini précédemment 2) on s'appuie sur les résultats d'une simulation réalisée sans prise de mesure de l'humidité ; 3) idem à 2 mais en assimilant des mesures d'humidité réalisées tous les 7 jours.

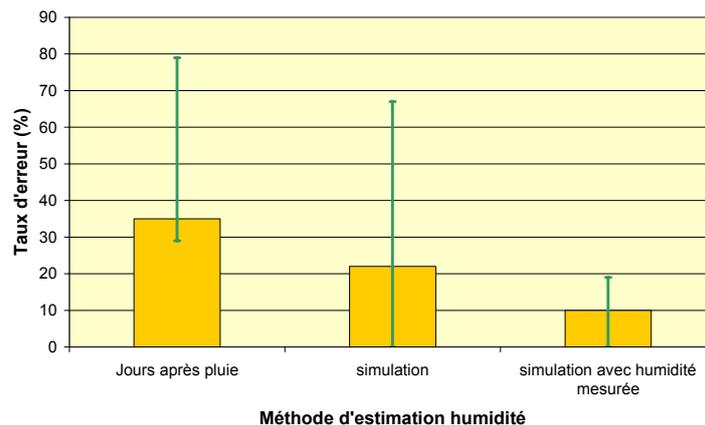


Figure 14 : Taux d'erreur dans l'appréciation du niveau d'humidité du sol par rapport à une valeur seuil prise ici comme l'humidité à la capacité au champ

L'histogramme correspond à la moyenne obtenue sur 7 sols couvrant une large gamme de sols. Les barres d'erreur correspondent à la gamme des taux rencontrés avec les 7 sols.

On voit sur la figure 14 le gain apporté par les modèles de simulation par rapport à des approches plus empiriques du type « nombre de jours après pluie ». L'apport de mesures d'humidité, même peu fréquentes, permet de réduire le taux d'erreur moyen, mais surtout d'éviter le cas des sols où l'humidité est difficile à simuler (présence de biais important) et avec lesquels les taux d'erreurs peuvent dépasser 60 %. De tels résultats montrent que la maîtrise actuelle dans la mise en œuvre de modèles de simulation du fonctionnement hydrique permet un réel progrès par rapport à des approches plus empiriques.

Cas des couverts forestiers [M3]

Variabilité de la teneur en eau sous forêt

La variabilité de l'humidité du sol mesurée sur les cinq stations de mesures installées sur le site du Breuil est relativement faible. Ceci devrait simplifier l'échantillonnage de l'humidité. Toutefois la modélisation 2D montre qu'une structuration nette de l'humidité apparaît au voisinage de l'arbre avec un impact fort de la distance au tronc. Il convient de bien établir quelle est la représentativité spatiale de l'humidité donnée par un modèle prévisionnel 1D par rapport au champ d'humidité simulé.

Validation du modèle MIN3P

Le modèle MIN3P a été mis en œuvre sur les sites forestiers de Vauxrenard et de Breuil, tous deux couverts par une plantation de Douglas (30 à 40 ans). Le travail a permis de mettre en évidence l'importance des écoulements préférentiels.

Mise en œuvre du modèle MIN3P dans un contexte d'information minimale

L'évaluation a été réalisée sur les données expérimentales du site du Breuil. L'estimation des propriétés hydrodynamiques, des conditions à la limite inférieure et de l'initialisation ont été étudiées. Pour les propriétés hydrodynamiques, les fonctions de pédotransfert de Wösten et ROSETTA ont été testées. C'est cette dernière qui donne les meilleurs résultats. Ceux-ci sont significativement améliorés dans les couches profondes (>30 cm) lorsque des informations sur les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent sont disponibles (Figure 15). L'initialisation a un impact sur les simulations sur une période de 2 mois. Ce problème peut donc être contourné en envisageant un temps de mise à l'équilibre du modèle, ou bien en optimisant les paramètres d'initialisation de telle sorte que l'humidité initiale considérée par le modèle corresponde à la mesure. Enfin les hypothèses sur la condition à la limite inférieure ont porté sur la profondeur de la nappe. Dans les conditions des simulations, on montre un impact fort de la position de la nappe sur l'humidité de surface, même si celle-ci se retrouve à 10 m de profondeur.

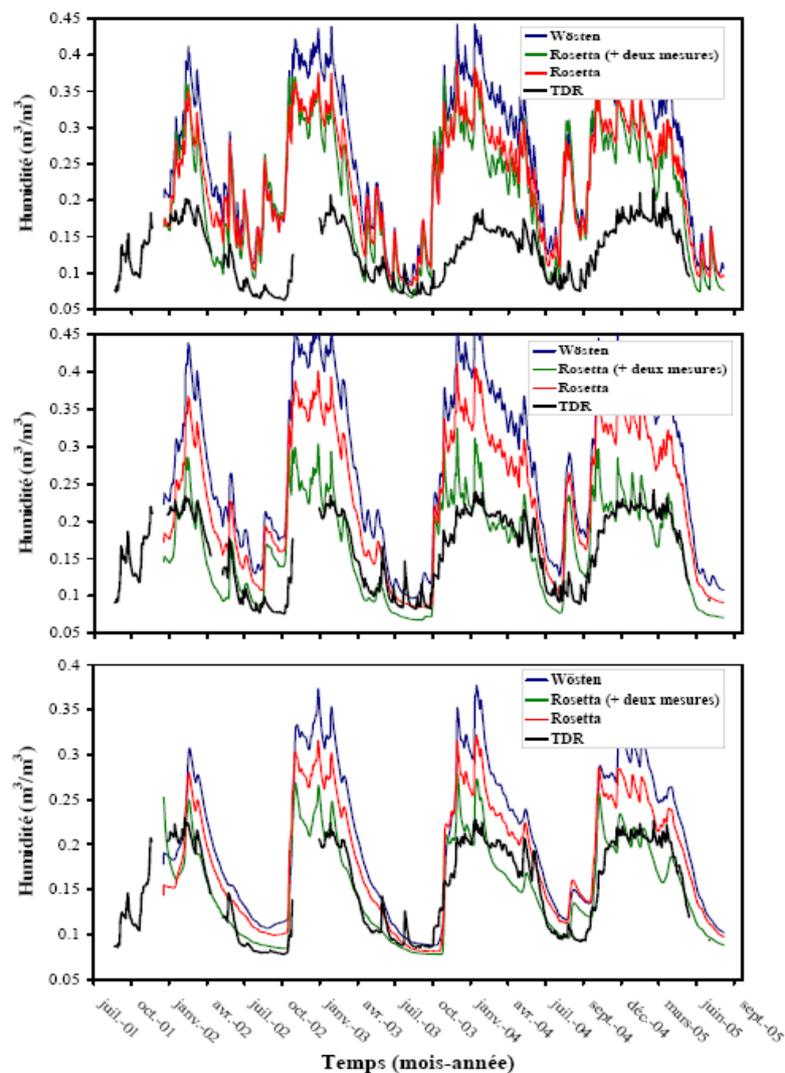


Figure 15 : Comparaison humidités mesurées-modélisation.

Simulations réalisées en utilisant les propriétés hydrodynamiques prédites par la fonction de pédotransfert de Wösten et al. (1999) et par Rosetta (Schaap et al., 2001), avec et sans prise en compte des mesures d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent.

Volet 4 : Suivi des tassements

Les approches géophysiques (« électriques » et « magnétiques »)

Détection des volumes de sol tassés

Afin d'établir la relation entre la résistivité électrique et le niveau de tassement du sol, une campagne de mesures au laboratoire a été menée sur des éprouvettes de sol reconstituées de masse volumique et de teneur en eau variables [T5]. Il apparaît que la résistivité électrique d'un sol est une propriété physique sensible aux variations de masse volumique consécutives aux tassements, et ceci pour une grande gamme de teneurs en eau. L'effet de la teneur en eau est d'autant plus marqué que la masse volumique est faible. Ce travail mené en amont des expérimentations au champ aura également permis de bâtir un modèle de résistivité de milieux à double porosité (porosité texturale et porosité structurale) pour rendre compte de l'évolution du système poral en fonction de l'intensité du tassement [M23].

Au champ, des tomographies électriques ont tout d'abord été réalisées perpendiculairement au passage des roues avec ou sans labour [A13]. Les résultats montrent qu'il est possible d'identifier les grands volumes de sol tassés et les volumes de sol très hétérogènes résultant de l'action de la charrue. Par la suite, un suivi électrique a été mis en place (une mesure chaque semaine d'avril à décembre). Ce suivi (Figure 16) a permis de montrer que (a) l'influence du compactage est sensible jusqu'à une profondeur de 30 cm, (b) la caractérisation spatiale de la zone tassée dépend fortement de l'humidité à l'instant de la mesure (conformément aux résultats acquis au laboratoire), (c) les fissures générées dans les zones tassées dès le printemps induisent un écoulement préférentiel d'eau. Ces observations ont été confirmées sur le site forestier d'Azerailles [L34, L35].

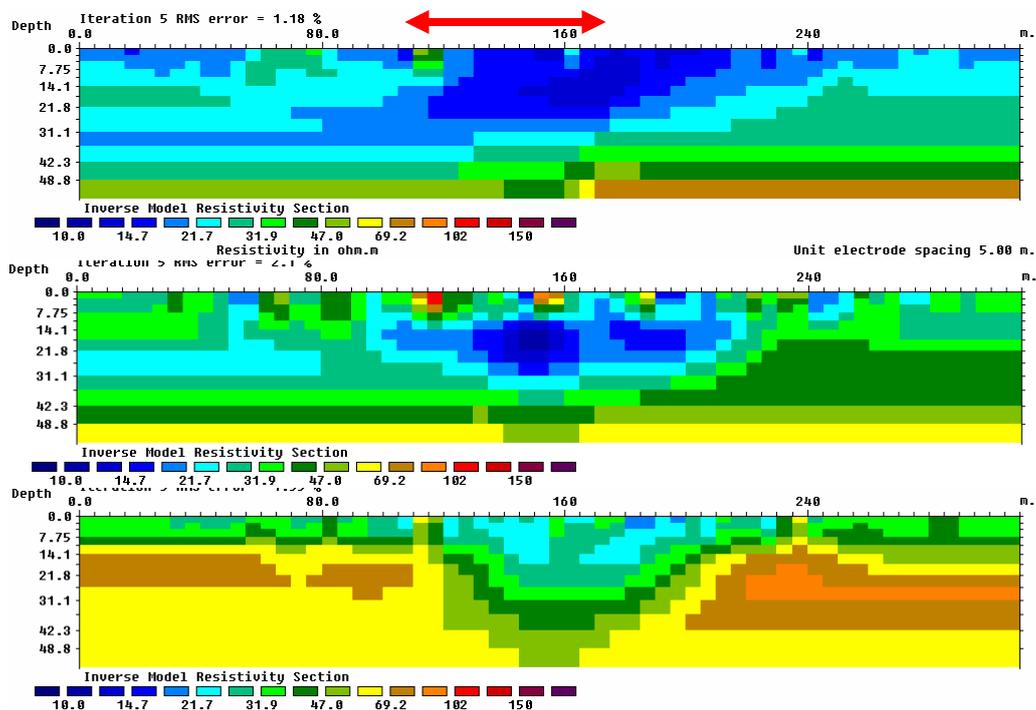


Figure 16 : Évolution de la résistivité électrique sur un profil de sol présentant une bande tassée (au centre du profil, indiquée par une double-flèche rouge).

Afin d'évaluer la faisabilité d'une caractérisation de l'état du sol à l'aide d'une mesure de ses propriétés magnétiques, des prospections magnétiques [M11, L30, L31] ont été réalisées sur plusieurs sites du projet DST : Mons-en-Chaussée (Somme), La Cage (Yvelines), Boigneville (Essonne) et Limoron (Loiret). Le traitement des anomalies de l'ensemble des parcelles

étudiées met en évidence une périodicité spatiale qui pourrait correspondre à l'écartement des roues des engins agricole utilisés. Toutefois, les résultats des campagnes menées à Mons-en-Chaussée en 2004 et 2005 montrent des pollutions en débris ferreux qui rendent inexploitable plus de 50% de la surface, et ceux de La Cage montrent des cartes très bruitées à cause de l'activité aérienne. Les sites de Limoron et de Boigneville sont apparus les plus favorables pour le projet. Des bandes tassées ont été créées durant l'hiver 2005-2006 sur ces deux sites. Elles ont fait l'objet d'un suivi magnétique en 2006, poursuivi en 2007 et 2008 sur Limoron. Le différentiel entre l'état initial et l'état après tassement, quelque soit la durée, met en évidence les zones tassées. Un échantillonnage destructif a été réalisé à l'automne 2008 afin de déterminer la source de l'anomalie magnétique associée au tassement.

Caractérisation de l'évolution des zones tassées (fissuration)

La fissuration étant provoquée par des alternances humectation/dessiccation (ou bien gel/dégel), son suivi par une méthode électrique nécessite de garantir le contact entre les électrodes et le sol. L'utilisation d'électrodes métalliques ou bien avec solution de cuivre posant des problèmes sur le terrain, la méthode électrique dite «électrostatique» a été testée. Cette méthode repose sur un principe original : le courant n'est pas injecté via un contact galvanique électrode-sol, mais par influence électrostatique. Elle permet donc de travailler sur des surfaces sur lesquelles il est très souvent difficile d'enfoncer des électrodes. Récemment, un dispositif quadripolaire de dimension décimétrique qui autorise des prospections avec un pas d'échantillonnage centimétrique, a été mis au point (dispositif dit hexapôle, [A18]). Il a été mis en œuvre avec succès sur le terrain, sur le site expérimental de Mons-en-Chaussée de mai à juin 2007 sur deux placettes.

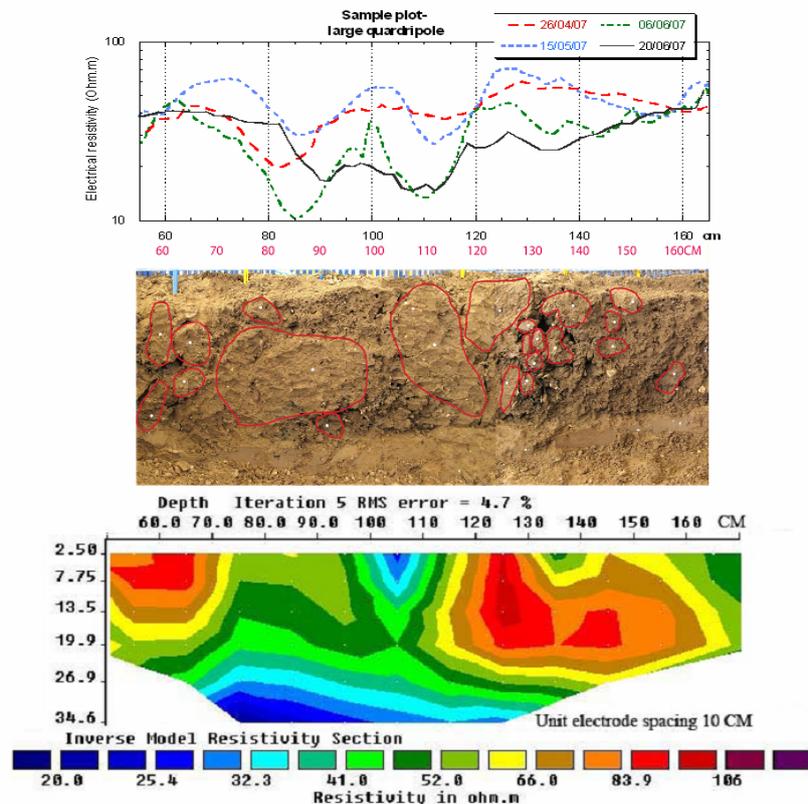


Figure 17 : Comparaison entre :a) en haut, le profil électrostatique réalisé avec le dispositif hexapôle, b) au milieu, le profil culturel et c) en bas, la tomographie électrique 2D réalisés sur la même placette. Les mottes tassées sont clairement associées aux résistivités les plus basses [C24].

Malgré sa sensibilité à la rugosité du sol, ce nouveau dispositif a été capable d'identifier les zones de sol fortement tassées (mottes tassées de taille décimétrique voire pluri-décimétrique) (Figure 17) [C24].

En parallèle à la recherche d'un nouveau dispositif de mesure électrique utilisable sur le terrain, 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) [A14]. Le code FISSEL a été validé à l'aide d'une campagne de mesures menée au laboratoire sur une fissure créée artificiellement. L'analyse de sensibilité a montré la très forte sensibilité du paramètre pendage (*i.e.* inclinaison) de la fissure sur les deux autres paramètres introduits (extension et profondeur). Il s'agit maintenant de considérer l'effet de plusieurs fissures.

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

Le bilan du suivi de la colonisation par les vers de terre des volumes de sol tassés a été effectué [A2]. Cette recolonisation est plutôt rapide (inférieure à 8 mois) et différente suivant les espèces (différence entre anéciques et endogés). Sous l'action des vers de terre, un sol tassé retrouve ses propriétés d'infiltration après 15 mois et sa macroporosité (pores d'un diamètre > 4 mm) en moins de 8 mois. Toutefois, la porosité de taille faible (< à 3 mm) met beaucoup plus de temps à retrouver son niveau initial (24 mois). Ce point remarquable suggère qu'il existerait une évolution saisonnière de certaines classes de porosité.

Concernant la régénération des sols tassés sous l'effet du climat [M15], la fissuration été étudiée par analyse d'image d'échantillons prélevés sur trois parcelles différentes : une parcelle représentant une situation sans compactage (NC), une parcelle ayant été compactée très sévèrement en 2001 (CC), une parcelle ayant subi plusieurs compactages moyens (IC). Ce travail aura permis de dégager les trois points suivants : (a) la fissuration est nettement plus importante dans la parcelle (CC) (l'effet du climat en tant qu'agent de fissuration est donc efficace après plusieurs années) ; (b) les macro-fissures se développent selon une direction subverticale (l'analyse d'image permet également d'identifier, pour la parcelle CC, un réseau de fissures plus fines et subhorizontales proches de la surface) ; (c) l'action du climat sur la régénération des sols tassés semble être limitée au-delà de 20 cm de profondeur même après une longue période de 5 années suivant le compactage.

Expérimentations sur deux sites forestiers « lourds » [L39]

Deux sites expérimentaux (sols plus ou moins acides) ont été mis en place pour l'étude 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), travail du sol dans les deux cas [A9, M13]. Les sites retenus sont les suivants :

- Forêt de Grand-Pays (parcelle 1) à Clermont-en-Argonne (55). Horizons supérieurs à texture limoneuse sur horizon textural BT peu enrichi en argile et présentant des taches d'hydromorphie. Ce limon repose sur la gaize, le pH est inférieur à 4,5 en surface (emprise sur 6 ha environ).
- Forêt des Hauts Bois (parcelles 21 ou 22) à Azerailles (54). Horizons supérieurs à texture limoneuse sur horizon riche en argile et présentant à son sommet une zone à taches d'hydromorphie. Ce limon repose sur la marne décarbonatée, le pH est de 5 en surface (emprise sur 6 ha environ).

Quatre à cinq traitements ou placeaux (50 m par 50 m), avec 3 répétitions par site, ont été effectués (Figure 18):

1. témoin absolu : sol en l'état après récolte
2. témoin relatif : placeau tassé sur une bande de 30 m
3. placeau tassé et ayant subi un travail du sol après tassement (une modalité de décompaction mécanique du sol par cover-crop a été testée).
4. placeau tassé et ayant reçu un amendement (site de Clermont-en-Argonne) ou placeau tassé avec décompaction en potets (site d'Azerailles).
5. Placeau non tassé et ayant reçu un amendement (site de Clermont-en-Argonne).

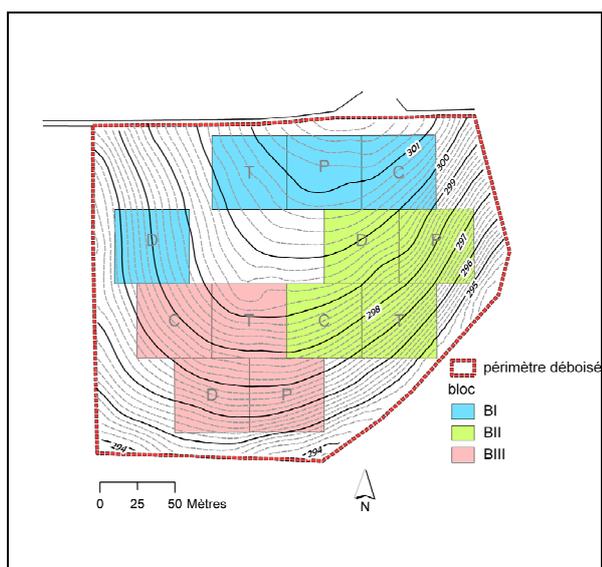


Figure 18a. Dispositif à Azerailles.

T : Tassement ; P : décompaction en Potets ;
C : Contrôle, témoin non tassé ; D : Tassement,
décompaction.

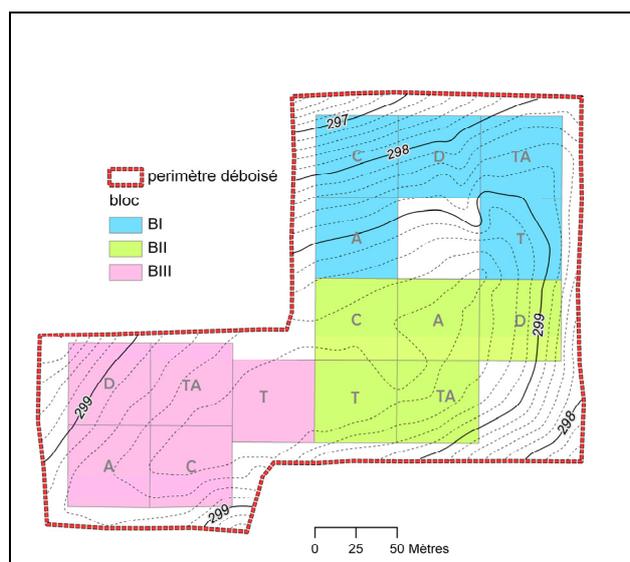


Figure 18b. Dispositif à Clermont-en-Argonne.

T : Tassement ; C : Contrôle, témoin non tassé ;
TA : Tassement avec amendement ; A : Amendement.
D : Tassement, décompaction.

La préparation des sites (route, enclos, etc.) a été mise en œuvre fin 2006 par l'ONF qui a donc apporté au projet DST un soutien très important.

Les deux sites forestiers ont fait l'objet d'une caractérisation initiale avant tassement : (1) cartographie des sols par prospection pédologique classique (une trentaine de sondages par site), (2) cartographie géophysique (électrique et magnétique) à large maille (de 1 à 5 m), (3) relevés floristiques, (4) creusement d'une fosse par bloc pour une description fine des sols et pour le prélèvement d'échantillons (caractérisation de la texture et de la structure, mesures de la masse volumique, minéralogie succincte, C et N, pH, CEC, S/T), (5) nivellement général des sites. Les résultats ont confirmé les différences de nature pédologique et physico-chimique entre les deux sols des deux sites étudiés.

Afin de limiter le tassement produit lors de la récolte prévue au cours de l'hiver, le débardage par câble a été retenu et le surcoût a été supporté par l'ONF. Le matériel utilisé pour le tassement effectué en période humide (mai 2007 pour Azerailles et mars 2008 pour Clermont-en-Argonne) est un débardeur opérationnel habituel en milieu forestier (tracteur VALMET à 8 roues motrices couplées en tandem bogies).

Les actions menées après le tassement ont concerné des mesures de :

- l'altitude de la surface du sol par tachéomètre,
- la masse volumique,
- la structure du sol,
- la conductivité hydraulique à saturation,
- la perméabilité au gaz,
- la résistance mécanique à la pénétration,
- la résistivité électrique, les anomalies magnétiques et la susceptibilité magnétique
- la composition des gaz du sol prélevés *in situ* et analysés au laboratoire par chromatographie gazeuse,
- l'émission de CO₂ sur le site d'Azerailles.

Les résultats acquis par ces méthodes peuvent se résumer par les points suivants :

- Compte tenu de la topographie du terrain et de sa relative rugosité initiale, l'effet du tassement n'est pas directement mesurable par l'approche topographique.
- Malgré son hétérogénéité spatiale, le tassement est bien mis en évidence par les mesures de densité apparente, de conductivité hydraulique à saturation et de résistance mécanique à la pénétration.
- Les observations en fosse réalisées à Azerailles un an après le tassement montrent que la contrainte de surface se traduit toujours sur la morphologie du profil, avec une zone réduite située entre 20 et 30 cm de profondeur. Il semble que l'installation du jonc, espèce adaptée au milieu hydromorphe (transfert d'oxygène par les aerenchymes vers le sol rhizosphérique), soit responsable de l'oxydation de la couche superficielle, dans sa zone d'enracinement maximum (suivi nécessaire en période de saturation en eau).
- L'impact du tassement est très significatif sur la résistivité électrique (facteur 2 à 3 entre les zones tassées et non tassées en période sèche). Les mesures électriques obtenues plus d'un an après le tassement sur le site d'Azerailles suggèrent le début d'un processus de régénération du sol tassé. Les prospections magnétiques ont mis en évidence de très fortes variations du signal magnétique dans les zones tassées, attribuables à des effets micro-topographiques (fluage du sol sous l'effet du tassement) et/ou à la destruction d'oxyde magnétique, induit par l'anoxie créée également par le tassement, toujours visible après la 3^e année de suivi.
- L'atmosphère du sol varie fortement avec le tassement du sol car celui-ci modifie les propriétés de transfert du sol [M9, M18]. D'une manière générale, à Azerailles, la teneur en CO₂ augmente et les teneurs en O₂ et N₂O diminuent (sous l'hypothèse de convection limitée et de pression totale de gaz invariante). Le gaz CH₄ peut aussi apparaître mais pas dans tous les blocs ni à toutes les profondeurs. La variabilité des mesures est plus forte pour les sols tassés où, par ailleurs, l'engorgement du sol conduit souvent à l'impossibilité de prélèvement de gaz.

Concernant les aspects biologiques, un suivi de la végétation (plantations et végétation spontanée) (ONF), est actuellement assuré. Une caractérisation des systèmes racinaires (INRA Nancy), de l'activité biologique du sol (lombriciens, INRA Avignon) et de la microflore a été entreprise. Concernant plus particulièrement le site d'Azerailles, le suivi de la végétation a montré une évolution spectaculaire en fonction des traitements, en particulier parce que l'année climatique a été favorable à son développement (été 2007 humide). Dans les traitements tassés, la végétation dominante est constituée de joncs, alors que dans les témoins non tassés, c'est la ronce qui domine.

L'équipement permanent des sites forestiers a été mis en place dès le nettoyage du site, après installation d'un enclos et d'un abri. Des appareils de mesure ont été également installés pour un suivi plus régulier (plots béton pour le suivi altimétrique, pluviomètre et capteur de température de l'air, système TDR pour l'humidité du sol, piézomètres pour le contrôle du niveau de nappe, capteur de température du sol, capteurs pour la mesure des gaz du sol analysés au laboratoire par chromatographie gazeuse, perméamètre pour la mesure *in situ* de la diffusion des gaz, analyse chimique de la solution des sols à partir de 2009) [T3].

Volet 5 : Cartographie des risques de tassement à l'échelle nationale

Les résultats du volet 5 concernent (1) la cartographie des contraintes appliquées sur les sols par les matériels utilisés en agriculture et en forêt, et (2) la mise au point d'une méthodologie pour la cartographie des risques de tassement.

Inventaire spatialisé des contraintes

Il 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 grandes cultures et les systèmes viticoles. Cette cartographie s'est basée sur les travaux du volet 2 où une enquête sur les différents équipements utilisés dans les différents systèmes de culture a permis d'établir une classification des régions françaises en fonction des équipements utilisés. Lors de cette enquête, les instituts techniques ont également indiqué par expertise des zones qu'ils ont considérées comme homogènes en termes de matériels.

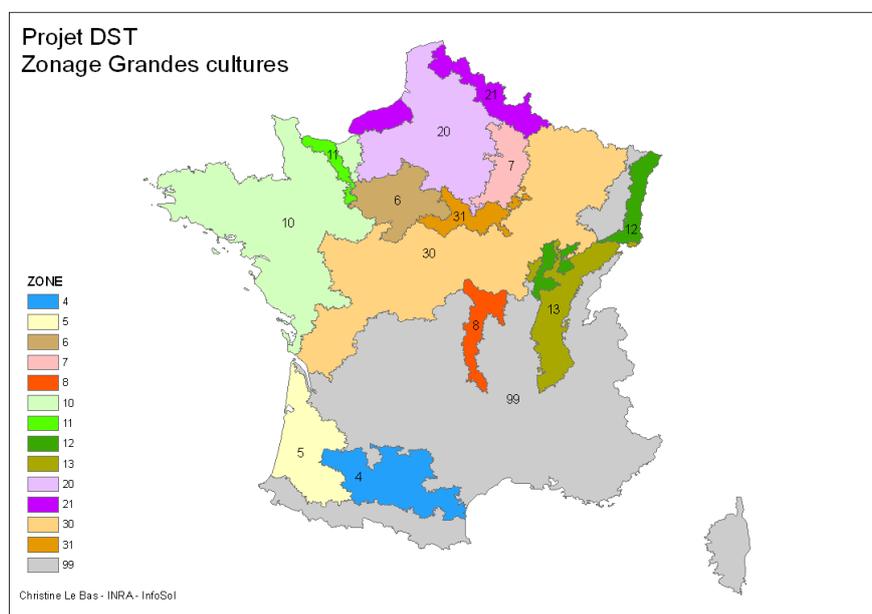


Figure 19 : Zonage Grandes cultures les chiffres représentent le numéro de chaque zone

Le zonage Grandes cultures (Figure 19) a été défini en croisant diverses sources d'information :

- le zonage Arvalis en bassins de production ;
- le recensement agricole 2000 en données cantonales : celui-ci a été utilisé pour filtrer les cantons sur des critères de surface en grandes cultures et en betterave ;
- les limites des Petites Régions Agricoles.

Une expertise d'Arvalis et de l'ITB a permis de définir les règles de regroupement des zones obtenues par le croisement de ces différentes sources de données.

Pour le zonage Vigne (Figure 20), une carte des zones en vigne en France a été réalisée en utilisant les données cantonales du recensement agricole 2000 (cantons ayant des exploitations en OTEX vins d'appellation + cantons ayant une surface en vigne par rapport à la SAU supérieure à 10 %). L'expertise du CIVC a ensuite permis de délimiter sur cette carte les zones présentant des vignes larges, ou des vignes étroites ou des mélanges des deux types de vigne. En effet, c'est essentiellement la largeur des rangs de vigne qui conditionne le type de matériel utilisé.

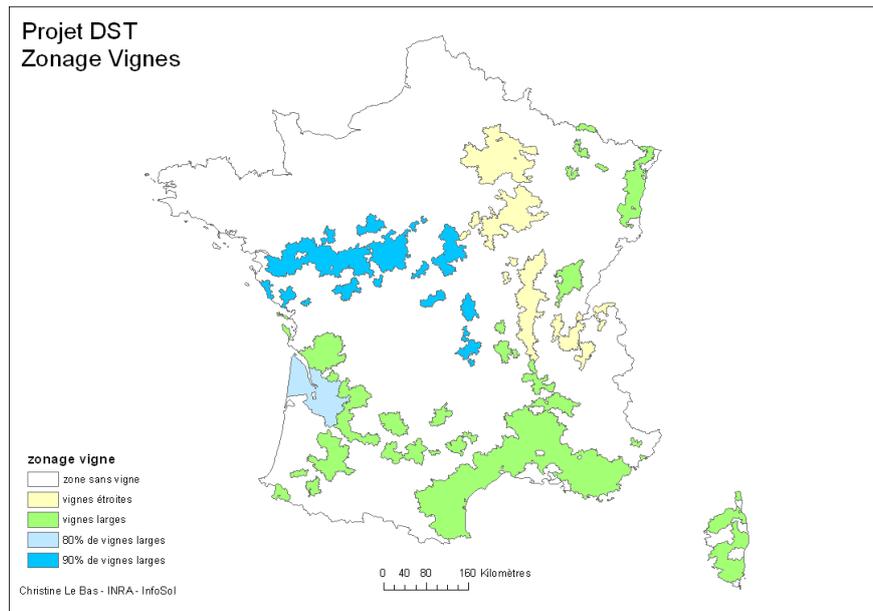


Figure 20 : Zonage vigne

Une base de données a été créée sous SIG fournissant pour chaque zone, chaque culture et par type d'opération culturale la contrainte moyenne (en kPa) et la surface affectée (en %). Cela a permis ensuite de réaliser une cartographie par culture et par type d'opération culturale de la contrainte moyenne et de la surface affectée (Figure 21). Pour la zone Grandes cultures n°30, une distinction a été introduite entre les matériels utilisés pour les exploitations faisant du non labour et les autres.

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 par l'ONF. Un premier essai d'utilisation des données statistiques de l'Inventaire Forestier National a été réalisé mais ne s'est pas montré concluant. En effet, les données fournies par l'IFN ne concernent que les volumes exportés et non pas des critères de surface.

Méthodologie de cartographie des risques de tassement à l'échelle de la France

La méthodologie de cartographie des risques de tassement 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.

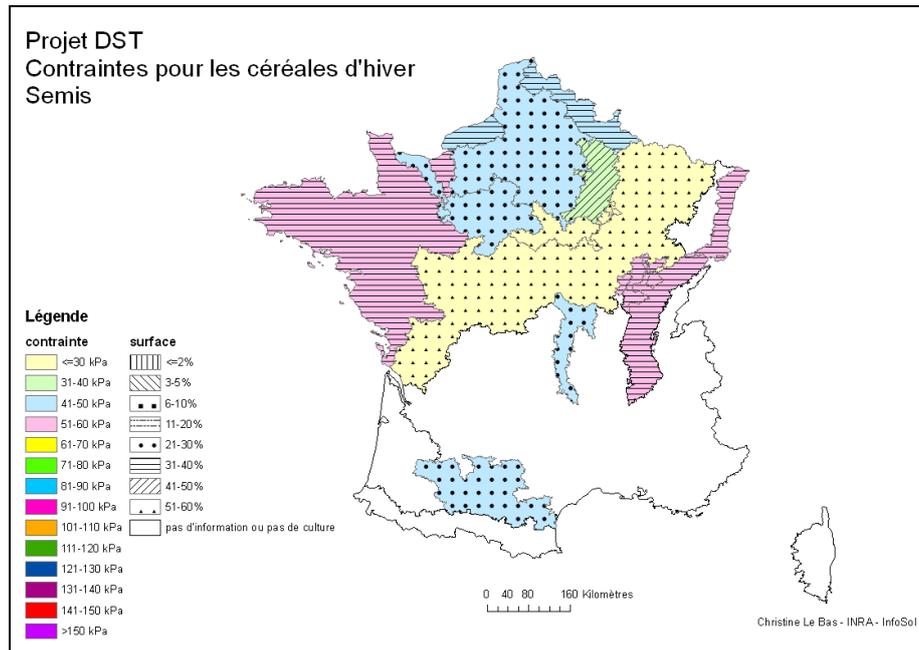


Figure 21 : Contraintes moyennes pour les céréales d'hiver pour le semis

Détermination de l'évolution dans le temps de la teneur en eau du sol aux périodes d'intervention

Pour déterminer l'évolution dans le temps de la teneur en eau du sol aux périodes d'intervention, nous utilisons le modèle de culture STICS afin de tenir compte de l'impact de la culture sur l'évolution de la teneur en eau. Pour réaliser des simulations sur l'ensemble du territoire français avec le modèle STICS, plusieurs étapes sont nécessaires :

- modification du modèle STICS afin de faire varier certains paramètres en fonction du type de sol,
- élaboration des fonctions de pédotransfert d'estimation de certains paramètres du sol déterminants les processus d'infiltration et d'évaporation (q_0 , $cfes$, z_{esx} et z_{0solnu}),
- adaptation des procédures informatiques couplant le SIG Arcinfo® et le modèle STICS pour tenir compte de la variabilité climatique,
- élaboration des fichiers de paramètres concernant les sols, les itinéraires techniques, les données d'initialisation,
- création des unités de simulation en croisant les informations sur les sols, le climat, les itinéraires techniques.

L'adaptation des procédures informatiques de couplage d'Arcinfo® et de STICS a été réalisée pour permettre la prise en compte de la variabilité climatique. Ces procédures permettent la création des unités de simulation de STICS et le lancement des simulations.

Concernant la détermination des paramètres sols de STICS, des travaux antérieurs avaient permis l'établissement de règles de pédotransfert pour estimer un certain nombre de paramètres, avec des qualités diverses. Certaines de ces règles ont été modifiées pour les adapter aux objectifs du projet ou améliorer leur qualité. De nouvelles règles de pédotransfert ont été développées notamment pour les paramètres déplacés du param.par vers le param.sol

[L49]. Un nouveau paramétrage de STICS pour l'ensemble du territoire français est maintenant disponible à la suite du travail conduit dans le projet DST [L50].

Pour les itinéraires techniques du maïs, deux types ont été envisagés : l'un pour la partie Nord de la France et l'autre pour la partie Sud. Les différences entre les deux zones sont liées à la variété prise en compte (précocité). On s'est placé en maïs non irrigué.

Les données climatiques proviennent du modèle Arpège de Météo-France. Trois séries de données seront utilisées : une série de contrôle correspondant au climat actuel (1970-1999) et deux séries de climat futur (2070-2099) correspondant aux scénarios A2 et B2 de changement climatique. Les données issues d'Arpège ont été régionalisées par la méthode des biais. Ainsi, les biais entre les données actuelles et les données simulées pour la même période (série de contrôle) ont été calculés pour neuf stations de référence réparties sur l'ensemble du territoire. Ces biais ont été affectés à des espaces établis par la méthode des polygones de Thyssen (Figure 22) en fonction de la distance à la station de référence et ont ensuite été appliqués à toutes les mailles Arpège, pour les trois scénarios (contrôle, A2 et B2). Les données ont ensuite été mises au format du modèle STICS.

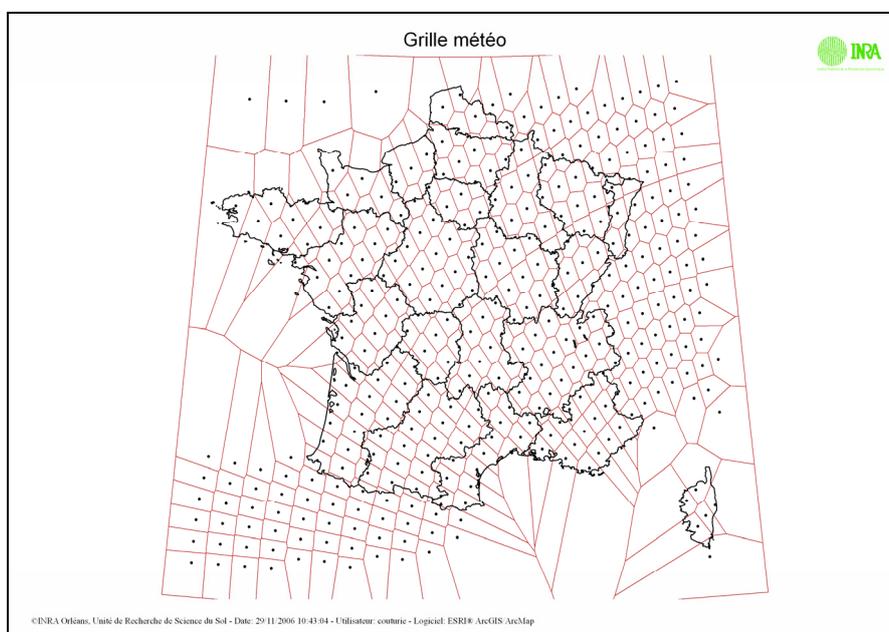


Figure 22 : Segmentation du territoire par station climatique ARPEGE

Le croisement des couches sol, climat et région permet ensuite de déterminer les unités de simulation de STICS et ensuite de restituer les résultats cartographiquement.

Détermination par type de sol de la teneur en eau critique au-delà de laquelle le sol sera considéré comme tassé

Pour déterminer ces teneurs en eau critiques, nous devons d'abord estimer les propriétés mécaniques des sols utilisés pour les simulations avec le modèle STICS. Pour cela, nous avons regroupé les types de sol de la Base de données Géographique des sols de France selon plusieurs critères : la texture de surface (30 premiers cm), la ou les textures de profondeur, la profondeur du changement textural et la profondeur du sol. Nous avons ainsi déterminé 30 groupes de sol. Dans le cadre du volet 2, les propriétés mécaniques de plusieurs sols de référence de texture homogène ont été mesurées. Nous avons caractérisé les propriétés

mécaniques de ces 30 groupes de sol par les sols de référence en se basant sur les textures. Le modèle COMPSOIL est ensuite utilisé pour déterminer, pour chacun des 30 groupes, les teneurs en eau critiques au-delà desquelles le sol peut subir un tassement.

Estimation du nombre de jours aux périodes d'intervention où la teneur en eau du sol dépasse cette teneur en eau critique

Deux couches de sol sont considérées : la couche 0-10 cm et la couche 10-30 cm. Nous avons donc une teneur en eau critique pour chacune des deux couches (appelée seuil max dans la figure 23). Cependant, nous avons aussi considéré que lorsque la teneur en eau de la couche 0-10 cm était inférieure à un certain seuil d'humidité, le risque de tassement était nul dans la couche 10-30 cm même si celle-ci est au-dessus du seuil critique. Donc il faut déterminer le nombre de jours durant la période d'intervention (Figure 23) où :

- la teneur en eau est supérieure au seuil critique dans la couche 0-10 cm : N1
- la teneur en eau est supérieure au seuil critique dans la couche 10-30 cm : N2
- la teneur en eau est inférieure au seuil minimal dans la couche 0-10 cm : N3
- la teneur en eau est supérieure au seuil critique dans la couche 10-30 cm et la teneur en eau est supérieure au seuil minimal dans la couche 0-10 cm : N4
- l'union entre N1 et N4 : N5.

On a donc trois périodes critiques : N1 est la période critique où il y a risque de tassement pour la couche 0-10 cm, N4 est la période critique où il y a risque de tassement pour la couche 10-30 cm, et N5 est la période critique où il y a risque de tassement sur 0-10 cm et/ou 10-30 cm.

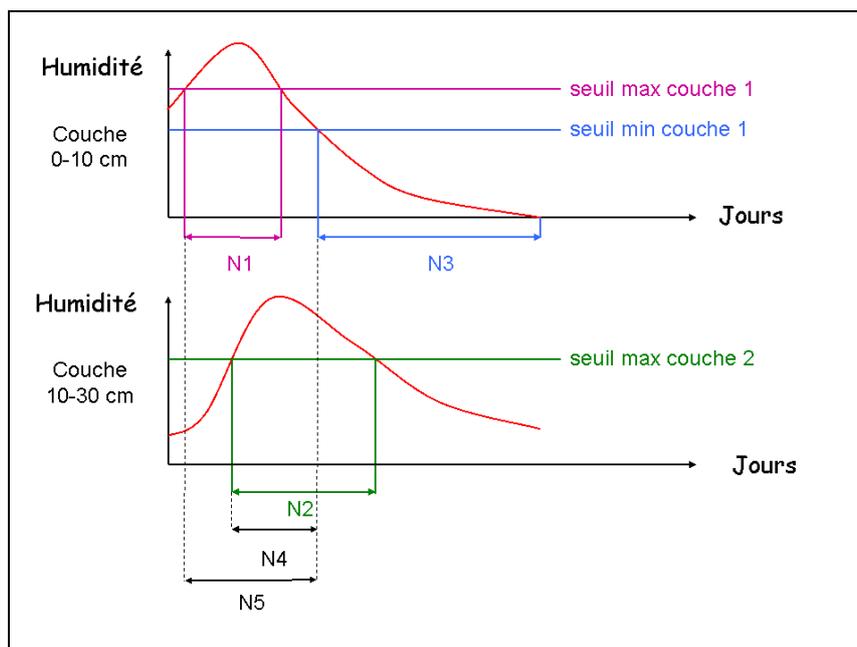


Figure 23 : Principe d'utilisation des seuils de teneur en eau critiques

Pour chaque année climatique et chaque période d'intervention, on calcule alors des statistiques sur le nombre de jours caractérisant ces trois périodes : moyenne et écart-type, médiane, minimum et maximum. On caractérise ensuite chaque zone par le pourcentage d'années où le nombre de jours ayant un 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 a un nombre de jours ayant un risque représentant plus de 33 % ou de 66 % du nombre de jours total de la période d'intervention. Les figures 24a et 24b montrent un exemple de cartographie du risque de tassement, en climat actuel ou

futur. Le risque est exprimé en pourcentage d'années pour lesquelles il y a 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. Les risques les plus élevés sont situées dans l'ouest de la France et sur la bordure est du Bassin Parisien. Le climat futur (scénario A2) modifie significativement la cartographie des risques.

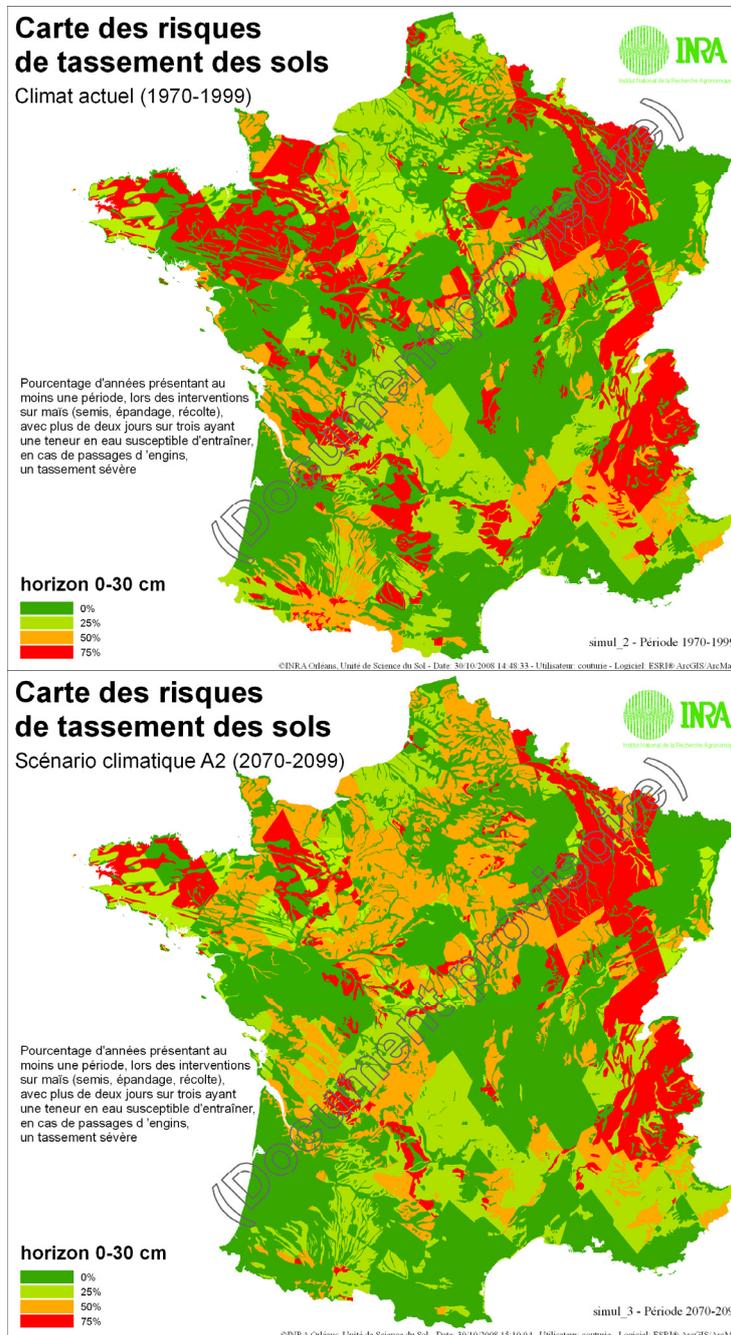


Figure 24a : Cartographie des risques de tassement des sols français (climat actuel)

Figure 24b : Cartographie des risques de tassement des sols français (climat futur scénario A2)

Il reste à (1) valider ces simulations à partir d'une analyse fine des entrées et sorties du modèle, (2) évaluer l'incertitude autour des simulations à partir des différents jeux de paramètres pour STICS et COMPSOIL dont nous disposons, (3) confronter les cartographies aux mesures réalisées dans le cadre du RMQS. Ces perspectives seront réalisées dans l'année qui vient dans le cadre de la thèse de M.-P. Lefebvre [T4].

Conclusion

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 que ceux du changement climatique. La limite de ces travaux concerne la non prise en compte de la diversité des types de sol. Toutefois, les méthodologies proposées sont applicables à différentes conditions pédoclimatiques, les modèles étant à paramétrer et à évaluer pour d'autres types de sol et de climats.

☛ 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 SOILFLEX a été environné 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 et 5 ans dans un sol limoneux. Des références similaires seraient à établir en fonction du type de sol.

☛ La quantification, à l'échelle régionale, des effets du tassement sur les marges brutes, les allocations de culture et les émissions de gaz à effet de serre à l'aide d'un modèle d'offre agricole en fonction du niveau d'une taxe de premier (N_2O émis) ou de second rang (N minéral apporté) et l'analyse de l'effet de l'introduction d'une taxe de 1^{er} rang comme outil public d'incitation à la protection des sols. Nos résultats montrent qu'en fonction d'une taxe sur le N_2O , les producteurs auraient intérêt, dans le cas d'une succession betterave/blé, à avancer la date de récolte de la betterave et à avancer la date de semis du blé plutôt qu'à retarder au maximum la récolte de la betterave (pour maximiser le rendement de la betterave). La méthodologie proposée serait à étendre à l'ensemble des systèmes de culture d'une région donnée.

☛ 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 réalisation (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 RMQS 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 basée sur la prévision à cinq jours de la teneur en eau du sol 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 méthodologies issus du projet DST apparaissent riches et répondant aux objectifs initiaux. Les résultats sont à consolider pour des conditions beaucoup plus diverses que celles qui ont été étudiées au cours du 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. Le couplage biophysique/économique a été productif et demande à être poursuivi.

Bibliographie citée

- Alakukku L., 2000. Response of Annual Crops to subsoil compaction in a field experiment on clay soil lasting 17 years. *Advances in GeoEcology*, 32, pp. 205-208.
- Alblas J., Wanink F., Van den Akker J., Van der Werf H.M.G., 1994. Impact of traffic-induced compaction of sandy soils on the yield of silage maize in the Netherlands. *Soil & Tillage Research*, 29, 157-165.
- Bertrand M., Guichard L., Saulas P., 2004. *Présentation de l'essai de La Cage*, Document interne INA P-G, 3 p.
- Bodet J.M., Nolet J.M., Perroy J., Fourbet J.F., 1976. Présentation de l'essai de Boigneville. In *Simplification du travail du sol en production céréalière*. Colloque ITCF, Décembre 1976, Paris, pp. 25-40.
- Boizard H., Richard G., Roger-Estrade J., Dürr C., Boiffin J., 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. *Soil & Tillage Research*, 64, 149-164.
- Boussinesq, J., 1885. Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Gauthier-Villars, Paris, France, 30 p.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durrr C., Nicoulaud B., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R.- 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.

- Capowiez Y., Pierret A., Moran C.J., 2003. Characterisation of the three-dimensional structure of earthworm burrow systems using image analysis and mathematical morphology. *Biology and Fertility of Soils*, 38, 301-310
- Chanzy, A., and L. Bruckler. 1993. Significance of soil surface moisture with respect to daily bare soil evaporation. *Water Resources Research*, 29, 1113-1125.
- 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.
- De Condappa D., Soria Ugalde J., 2002. Méthode Beer Kan : caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés. Rapport interne LTHE, 48 p.
- Crolla D.A., El-Razaz A.S.A., 1987. A review of the combined lateral and longitudinal force generation of tyres on deformable surfaces. *Journal of Terramechanics*, 24, 199-225.
- Défossez P., Richard G., 2002. Compaction of tilled topsoil due to traffic : a review of models tested in field conditions. *Soil & Tillage Research*, 67, 41-64
- 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.
- Findeling, A., Chanzy A., de Louvigny N., 2003. Modeling water and heat flows through a mulch allowing for radiative and long-distance convective exchanges in the mulch. *Water Resources Research*, 39, 1-12.
- Gérard, F., M. Tinsley, and K.U. Mayer. 2004. Preferential flow revealed by hydrologic modeling based on predicted hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 68:1526-1538.
- Griffiths, D.H. and Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29: 211-226.
- Godard C., Roger-Estrade J., Jayet P.A., Brisson N., Le Bas C., 2008. Use of available information at a European level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the EU. *Agricultural Systems*, 97(1/2), 68-82.
- Gupta, S.C., Raper, R. L., 1994. Prediction of soil compaction under vehicle. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C., (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*, Developments in Agricultural Engineering, 11, Elsevier Amsterdam, pp. 53-71.
- 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
- Jones, R.J.A., Spoor, G., Thomasson, A.J., 2003. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil & Tillage Research*, 73, 131-144.
- Lagacherie et collaborateurs, 2006. Dégradation des sols de vignes et impacts sur la ressource en eau en milieu méditerranéen viticole. Programme GESSOL, Journées d'échanges et de prospective, 21-22/11/2006, Paris. Recueil des interventions, 4 p.
- Lamandé M., Lefèvre Y., Ranger J., 2004. *Conséquences des dégâts au sol de l'exploitation forestière*. Document interne INRA/ONF, 64 p. + annexes.
- Lebert M., Horn H., 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil & Tillage Research*, 19, 275-286.
- Mathé V., Lévêque F., 2003. High resolution magnetic survey for soil monitoring: *Earth and Planetary Science Letters*, 212, 241-251.
- 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.
- Oldeman L.R., Kakkeling R.T.A., Sombroek W.G., 1991. *World map of the status of human-induced soil degradation, an explanatory note*. ISRIC , Wageningen, Pays-Bas, 34 pp.
- O'Sullivan, M.F., Henshall, J.K., Dickson, J.W., 1999. A simplified method for estimating soil compaction. *Soil & Tillage Research*, 49, 325-335.

- Quemada M., Cabrera M.L., McCracken D.V., 1997. Nitrogen release from surface-applied cover crop residues : evaluating the CERES-N sub-model. *Agronomy Journal*, 89, 723-729.
- PLAXIS, 1998. *Finite element code for soil and rock analysis*. Balkema, Rotterdam. ISBN 905410449X.
- Ranger J., Gelhaye D., 2002. *Effets de l'essence forestière sur le fonctionnement biogéochimique et biologique d'un écosystème forestier*. Présentation du site expérimental de la forêt de Breuil-Chenue, Morvan. Nancy, INRA, Unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers, Document Interne, 18 p.
- Ranger J., Brêthes A., coordinateurs, 2007. Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. 37 p.
- Roo A. P. J. de, Wesselin, C. G., Ritsema C. J., 1996. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 10, 1107-1117.
- Rounsevell M.D.A., Jones R.J.A., 1993. A soil and agroclimatic model for estimating machinery work-days: the basic model and climatic sensitivity. *Soil & Tillage Research*, 26, 179-191.
- Samouëlian A., 2004. *Analyse tri-dimensionnelle non destructive de la fissuration d'un sol cultivé à partir de résistivité électrique*. Thèse de l'Université d'Orléans, 220 p. (soutenance le 26/3/2004)
- Samouëlian A., Richard G., Cousin I., Bruand A., Tabbagh A., 2004. Three-dimensional crack monitoring by electrical resistivity measurement. *European Journal of Soil Science*, 55, 751-762.
- Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M. Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251:163-176.
- Stenitzer E., Murer E., 2003. Impact of soil compaction upon soil water balance and maize yield estimated by the SIMWASER model. *Soil & Tillage Research*, 73, 43-56.
- Stengel P., Douglas J.T., Guérif J., Goss M.J., Monnier G., Cannell R.Q., 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. *Soil & Tillage Research*, 4, 35-53.
- Tabbagh A., Dabas M., Hesse A., Panissod C., 2000. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma*, 97: 393-404.
- Terzaghi K., Peck R B., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, J. Wiley and Sons, New York, 729 p.
- Union Européenne, 2002. *Vers une stratégie thématique pour la protection des sols*. Communication de la commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social. 20 pp.
- Van den Akker, J.J.H., 1997. Construction of a wheel-load bearing capacity map of the Netherlands. *Proc. 14th ISTRO conference*, Pulawy, Poland, 1997. Bibliotheca Fragmenta Agronomica, Vol 2A/97: 15-18
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., Goodrich, D.C., 1990. *KINEROS, a kinematic runoff and erosion model*: Documentation and user manuel. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 p.
- Wösten J.H.M., 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality, in *Developments in Soils Sciences*, edited by E.G. Gregorich, and M.R. Carter, pp. 221-245, Elsevier, Amsterdam.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169-185.
- Ziesak M., 2003. Avoiding soil damages caused by forest machines. *2nd Forest Engineering Conference*, Växjö, Suède, 3-11.

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de l'organisation générale du projet DST.....	8
Figure 2 : Rendements du blé en fonction de la teneur en Δ de la couche labourée sur 6 parcelles de l'essai de Mons. Valeurs mesurées entre 1999 et 2006.	18
Figure 3 : Simulation avec STICS de l'effet de la masse volumique (g cm^{-3}) sur le ruissellement annuel, sous blé et sous maïs.	19
Figure 4 : Simulation avec STICS de l'effet de la masse volumique (g.cm^{-3}) sur la dénitrification sous blé et sous maïs.	19
Figure 5 : Volumes de ruissellement simulés en sortie de rigole pour les différentes situations analysées.	20
Figure 6 : Effet d'une taxe sur l'engrais azoté sur la réduction de l'émission de N_2O en Région Picardie .	21
Figure 7 : Variation des marges brutes agricoles agrégées à l'échelle régionale, exprimée en M€ en fonction de la taxe sur les émissions de gaz à effet de serre exprimée en $\text{k€}/\text{tCO}_2\text{eq}$	23
Figure 8 : Position des horizons prélevés pour DST sur le triangle de texture en 15 classes de texture	25
Figure 9 : Propriétés mécaniques d'un sol sous forêt : site de Breuil	26
Figure 10 : Simulations des distributions de contrainte verticale à la surface du sol pour un sol argileux (à gauche) et pour un sol sableux (à droite).....	27
Figure 11 : Augmentation moyenne de masse volumique sur 0-30 cm après le passage d'un engin, obtenue par simulation avec le modèle COMPSOIL avec deux niveaux d'information et mesurée par des essais de tassement in situ	28
Figure 12 : Estimation de la teneur en eau des couches 0-5 cm et 0-30 cm d'un sol limoneux à l'aide du modèle de transferts d'eau TEC.....	30
Figure 13 : Erreur sur l'estimation de l'humidité de surface lorsque l'humidité mesurée (SM) dans les 5 ou les 30 premiers centimètres est assimilée.....	31
Figure 14 : Taux d'erreur dans l'appréciation du niveau d'humidité du sol par rapport à une valeur seuil prise ici comme l'humidité à la capacité au champ.....	32
Figure 15 : Comparaison humidités mesurées-modélisation.....	33
Figure 16 : Évolution de la résistivité électrique sur un profil de sol présentant une bande tassée.....	34
Figure 17 : Comparaison entre :a) en haut, le profil électrostatique réalisé avec le dispositif hexapôle, b) au milieu, le profil cultural et c) en bas, la tomographie électrique 2D réalisés sur la même placette.	35
Figure 18a. Dispositif à Azerailles.....	37
Figure 18b. Dispositif à Clermont-en-Argonne.....	37
Figure 19 : Zonage Grandes cultures les chiffres représentent le numéro de chaque zone.....	39
Figure 20 : Zonage vigne.....	40
Figure 21 : Contraintes moyennes pour les céréales d'hiver pour le semis	41
Figure 22 : Segmentation du territoire par station climatique ARPEGE	42
Figure 23 : Principe d'utilisation des seuils de teneur en eau critiques.....	43
Figure 24a : Cartographie des risques de tassement des sols français (climat actuel)	44
Figure 24b : Cartographie des risques de tassement des sols français (climat futur scénario A2).....	44

Liste des tableaux

Tableau 1 : Modèles utilisés	9
Tableau 2 : Sites expérimentaux utilisés pour le projet	10
Tableau 3 : Réduction (en %) de la marge brute due au tassement.....	21
Tableau 4 : Dates de simulation utilisées dans le modèle STICS pour les arrachages de la betterave et les semis du blé ainsi que les pondérations retenues pour chaque date pour la proportion de sol non tassé par rapport au sol tassé (en %).....	22

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