



EFFETS DE L'APPORT DE PRODUITS RESIDUAIRES ORGANIQUES SUR LE STOCKAGE DU CARBONE, LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET LA LIXIVIATION DU NITRATE DANS LES SOLS AGRICOLES PERIURBAINS (PROSTOCK)

Effects of applying exogenous organic matter onto soil on soil carbon storage, greenhouse gases emissions and nitrate leaching in periurban agricultural soils



Emmanuelle VAUDOUR
Unité Mixte de Recherche INRA/AgroParisTech « Environnement et Grandes Cultures » - 78850 THIVERVAL-GRIGNON
Emmanuelle.Vaudour@agroparistech.fr



Synthèse du rapport final
11/02/2014

Numéro de contrat Ministère/ADEME : 10 60 C 0094

1. Contexte général

Une part non négligeable des sols agricoles du territoire français est menacée de disparition sous la pression de l'urbanisation. Les sols les plus touchés sont ceux des ceintures périurbaines. On estime, par exemple, qu'entre 1990 et 2003, la diminution de la superficie des sols agricoles périurbains a atteint 12 % en moyenne voire 18 % à proximité de Paris dans la ceinture verte de la capitale (sur près de 600°000 ha) contre moins de 1 % pour les espaces forestiers (Regnault, 2006). Or l'agriculture périurbaine est une chance pour les villes, tant en termes d'approvisionnement en produits frais de qualité, de limitation de leur distance et temps de transport et de bassin potentiel d'emplois. La possibilité d'intensifier et développer l'agriculture périurbaine tout en valorisant et recyclant les fractions organiques des déchets d'origine urbaine revêt un intérêt majeur, particulièrement dans les régions où l'élevage est peu présent, et participe ainsi au métabolisme urbain (Barles, 2009). Les fractions organiques contenues dans les déchets urbains constituent des sources de matières organiques (MO) pouvant être valorisées en agriculture, soit par épandage direct (boues), soit après traitement biologique (compostage ou digestion) ou physico-chimique (chaulage, séchage thermique des boues). L'intérêt du traitement par compostage est qu'il permet d'assurer l'innocuité des matières organiques apportées tout en rendant disponibles des produits répondant aux critères normatifs des amendements organiques : composts de boues de station d'épuration (NFU 44°095) ou tout autre type de composts (NFU 44 051 : compost de déchets verts, de fraction fermentescible des ordures ménagères, d'ordures ménagères résiduelles, de digestats...). Ces sources urbaines de MO viennent compléter les sources de MO d'origine agricole amendante telle que les fumiers. On désignera l'ensemble de ces MO sous la dénomination « produits résiduels organiques (PRO) ». Les PRO d'origine urbaine peuvent constituer les seules sources disponibles dans les zones où l'élevage a disparu ou se raréfie, ce qui est le cas dans la zone périurbaine de Paris en Ile-de-France. On sait par ailleurs que les sols de grandes cultures voient leur teneur en MO diminuer en l'absence de restitution organique (résidus de cultures, matières organiques exogènes...) et la diminution des teneurs en MO dans les sols est l'une des menaces vis-à-vis des sols répertoriées par l'Union Européenne (Communication sur les sols). Dans un travail d'expertise sur les potentialités de stockage additionnel de carbone dans les sols via les apports de PRO tels que des composts d'origine urbaine, l'efficacité potentielle de ces MO a été démontrée, leur efficacité réelle étant liée aux stocks de PRO disponibles et à la possibilité de les apporter régulièrement sur les sols (Houot et al., 2002). Les déchets urbains représentent 55 millions de tonnes (Houot et al., 2005) et ils sont appelés à croître corrélativement à la croissance démographique des villes. Au niveau d'un territoire, la possibilité de restaurer les stocks de carbone des sols via l'épandage de PRO dépend de leur disponibilité, de leurs concurrences réciproques selon leur origine et de leurs caractéristiques : effluents d'élevage, effluents agroindustriels, composts de déchets verts, composts de fraction fermentescible des ordures ménagères, boues de stations d'épuration compostées ou non. L'agriculture et l'agro-industrie produisent des PRO en grandes quantités, avec une forte concentration spatiale dans le cas des effluents d'élevage, tandis que les villes produisent des déchets ménagers et des eaux usées, dont l'application légale sur les sols est de plus en plus contrainte sous ses formes brutes non compostées. L'avenir est désormais au développement des

pratiques de tri suite au Grenelle de l'Environnement où l'engagement d'une augmentation à hauteur de 30% de la part des déchets recyclés a été pris. La volonté de réduire les pollutions atmosphériques liées à l'incinération des déchets urbains, celle de valoriser la fraction organique ainsi que le faible pouvoir calorifique des déchets très humides, conduisent à remettre en cause le traitement par incinération. Toutefois, le développement des filières de traitement biologique par compostage ou digestion des déchets urbains ne pourra s'envisager que si les débouchés pour ces matières organiques produites sont garantis, c'est-à-dire s'ils sont acceptés par les utilisateurs potentiels, s'il n'existe pas de source de MO concurrente et si les sols s'avèrent déficitaires en MO. Il est également important de pouvoir simuler les effets d'apports de PRO sur les sols en termes d'évolution de leurs teneurs en MO et de leurs effets « secondaires » sur les émissions de gaz à effet de serre, en particulier le N_2O , ainsi que sur les risques d'excès d'azote dans les sols donc de lixiviation des nitrates. Des outils permettant la simulation de l'évolution spatialisée des stocks de MO dans les sols sous différents *scenarii* d'apports de PRO devraient contribuer à la meilleure gestion de ces MO au niveau des territoires.

2. Objectifs généraux du projet

L'objectif principal du projet PROSTOCK était d'évaluer spatialement la possibilité d'accroître le stock de carbone des sols agricoles par le recyclage des PRO. L'objectif secondaire visait à en évaluer les impacts potentiels, au même niveau d'organisation spatiale, sur les risques d'émission de GES et de lixiviation du nitrate.

En outre, PROSTOCK comportait un objectif méthodologique visant à évaluer la faisabilité du suivi des variations de stocks de CO des sols agricoles par imagerie de télédétection et/ou spectroradiométrie visible proche infrarouge (NIRS). Le niveau d'organisation spatiale choisi était celui où se jouent la gestion des déchets et ses effets sur la qualité de l'eau et des sols : celui de petites régions agricoles périurbaines. La faible proportion des sols nus visibles par télédétection, suite à la directive européenne «Nitrates » qui conduit à couvrir les sols potentiellement nus en hiver par des cultures intermédiaires, était susceptible de constituer une difficulté méthodologique que l'on envisageait de contourner en développant la spectroradiométrie de terrain ou de laboratoire, en parallèle de l'imagerie aéroportée ou satellitaire.

3. Quelques éléments de méthodologie (et éventuelles difficultés rencontrées)

Le travail de recherche était structuré en 4 actions de recherche (AR) organisées selon une logique séquentielle, mais traitées en parallèle au cours du temps (figure 1). La première action de recherche (AR1) consistait à mesurer la teneur et le stock en carbone organique de l'horizon travaillé des sols cultivés, à l'aide de diverses techniques. Ces mesures étaient destinées à servir de base à la spatialisation des stocks de carbone organique (AR2). La prise en compte de l'impact des apports de PRO sur les cycles de C et N dans les sols nécessitait l'adaptation et le paramétrage de modèles de simulation de la dynamique de la matière organique du sol (AR3). Ces modèles visent à prédire l'évolution des stocks de C organique dans l'horizon travaillé des sols cultivés du territoire, selon

les différents *scenarii* de gestion agronomique envisagés (AR4). L'évolution mesurée ou simulée a été confrontée à la précision des techniques de mesure mises en œuvre dans l'AR1, afin d'évaluer sa détectabilité. De manière générale, on a attaché une importance particulière à l'estimation des incertitudes de mesure et d'estimation, et à leur propagation le long de la chaîne relationnelle mesure/spatialisation/simulation.

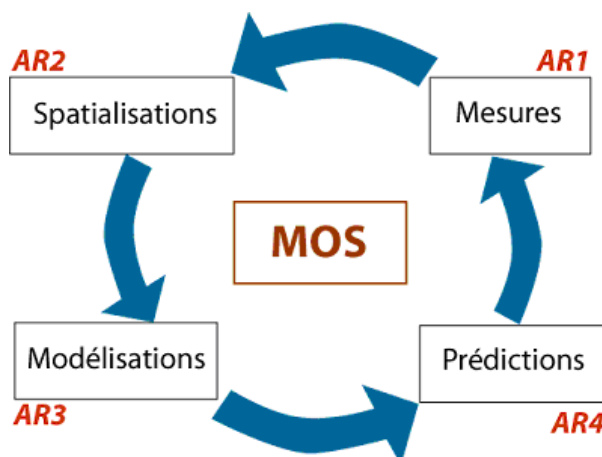


Figure 1. Schéma de l'organisation du projet PROSTOCK (MOS : matières organiques du sol)

Nous avons retenu, pour l'étude, une petite région périurbaine, unique en termes de données disponibles, de représentativité spatiale et thématique et de références sur les PRO. Les enjeux de la gestion et du recyclage des déchets comme ceux de la restauration des sols y sont particulièrement vifs, du fait de la proximité avec Paris et des risques de battance prononcés des sols issus de limons : il s'agit de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets, qui couvrent 221 km² (coin NW : 48°56'32"N, 1°50'12"E ; coin SE : 48°46'53"N, 02°07'22"E). Ce territoire associe 25 communes des Yvelines, situées à l'ouest de Versailles. Outre sa représentativité par rapport aux agrosystèmes à dominante céréalière du Bassin Parisien et par rapport à la problématique du recyclage des déchets, la plaine de Versailles présente plusieurs autres atouts. Elle inclut géographiquement les laboratoires de l'équipe porteuse du projet, ce qui permet de réaliser les mesures et observations de terrain avec le maximum de souplesse et de réactivité en fonction des conditions météorologiques, et facilite les contacts avec les agriculteurs. Elle focalise des moyens de divers autres projets. Elle inclut également des sites bénéficiant d'une longue antériorité d'acquisition de données sur les sols, en particulier la Ferme expérimentale de Grignon et surtout le dispositif expérimental QualiAgro (48°53'47"N, 1°58'20"E, commune de Feucherolles), un des sites principaux du SOERE-PRO. Ce dispositif au champ, d'une superficie de 6 ha, est un dispositif de longue durée initié en 1998 par l'UMR EGC en collaboration avec Veolia Environnement afin de suivre les effets d'épandages successifs de différents PRO sur les propriétés physico-chimiques des sols. Il est constitué de 4 blocs de répétitions de 10 traitements différents (450 m² chacun) ayant conduit à des différenciations analytiques connues. Dans ce dispositif, on a mis en évidence une efficacité variable des PRO à augmenter la teneur en matière organique (MO) d'un sol (Houot et al., 2002, 2009 ; Peltre et al., 2012).

3.1 AR1 : la mesure du stock de CO des sols agricoles

Pour l'estimation de la teneur en CO du sol, on a procédé à 2 types de mesure : des mesures analytiques classiques et des mesures spectroscopiques. La base de données géographiques, le protocole et le dispositif de mesure de la réflectance ont été mis au point et améliorés au fil des 3 années du projet. En dépit des mauvaises conditions météorologiques du printemps 2013 en particulier, les images de télédétection nécessaires au déroulement du projet ont été acquises comme prévu. Une douzaine d'images satellitaires multispectrales ont ainsi été programmées et réussies en mars 2011 (SPOT4), en mars et avril 2012 (SPOT4, RapidEye), en avril 2013 (SPOT4-Take Five, Pléiades) avec le soutien des programmes ISIS, SPOT4-Take Five et Orfeo-Recette Thématique Utilisateurs du CNES. Une image hyperspectrale aéroportée (AISA Eagle) a été acquise en collaboration avec l'UMR TSI2M de Rennes en avril 2013. Nous disposons aussi de 2 images SPOT à 2,5 m et 20 m prises en avril 2010 dans le cadre des projets ISARD et CNES-Orfeo. En mars 2012, 3 images TerraSAR ont par ailleurs été acquises dans le cadre d'une collaboration avec l'UMR TETIS de Montpellier avec le soutien de l'Agence Spatiale Européenne.

On dispose de mesures au sol qui ont permis de réaliser la correction atmosphérique de ces images ainsi que prévu (Vaudour et al., 2014b), afin de traiter les spectres en réflectance. Au total, nous avons collecté 154 placettes de mesures spectrales avec analyses de sol (36 en mars 2011, 79 en mars-avril 2012 et 39 en avril 2013). Si l'on additionne à celles-ci la centaine de placettes mesurées en mars-avril 2010 dans le cadre du projet ANR ISARD, on dispose, à l'issue du projet PROSTOCK, de plus de 250 placettes de mesure, en comparaison des 150 prévues initialement. En 2012, cent placettes au total, dont l'intégralité des 79 placettes de mesures spectrales, ont par ailleurs fait l'objet de mesures de rugosité via une méthode de restitution stéréophotogrammétrique mise au point dans le cadre du projet (Gilliot et al., 2012, 2013). Les échantillons séchés à l'air et tamisés à 2 mm des placettes 2010, 2011 et 2012 ont fait l'objet de mesures de réflectance en laboratoire, de même que les échantillons provenant des parcelles du site expérimental Qualiagro et prélevés à diverses années.

Deux niveaux d'organisation spatiale ont été considérés pour la prédiction des teneurs en CO : le niveau régional, correspondant à l'ensemble de la zone périurbaine étudiée, d'une part ; le niveau local, correspondant à un dispositif expérimental de 6 ha dédié au suivi des effets d'apports d'amendements organiques (dispositif Qualiagro), d'autre part. La teneur en CO de l'horizon labouré a été estimée par régression des moindres carrés partiels (PLSR) sur les spectres en laboratoire et au champ, pour un nombre de variables latentes compris entre 1 et 20. Le choix du nombre optimal de variables latentes s'est basé sur l'erreur de prédiction quadratique (RMSE). Pour les images satellitaires, la teneur en CO de l'horizon labouré a été estimée par régression linéaire multiple des bandes spectrales et son équation de régression a été appliquée aux pixels de sols nus de l'image (Vaudour et al., 2013a). La valeur de la RMSE, le biais et l'incertitude ont été comparés entre les différentes méthodes d'estimation. De plus, les prédictions réalisées sur les pixels de sols nus au moyen des modèles issus des bandes spectrales des images ont fait l'objet d'une 2^e validation externe ou ont été « post-validées » par un jeu de placettes n'ayant pas été utilisé lors de la démarche d'estimation

3.2 AR 2 : la spatialisation du stock de CO du sol

Cette action de recherche visait à :

- (i) mettre au point une stratégie d'échantillonnage et valoriser la base de données sur les teneurs et les stocks de CO dans les sols de la zone d'étude construite en AR1 ;
- (ii) élaborer différents modèles de spatialisation et caractériser la variabilité spatiale des teneurs et stocks de CO, à différents niveaux d'organisation, variant de l'infraparcellaire à la région d'étude.

Les différents modèles géostatistiques développés prennent en compte les mesures de terrain et un très grand ensemble de covariables de nature diverse ont été envisagées. Les variables les plus influentes sont l'altitude et l'unité pédologique. Les erreurs de validation se situent autour de 4-5 g.kg⁻¹.

La contrainte majeure concernait la disponibilité des parcelles pour les mesures, puisque celles-ci devaient être en sol nu. L'échantillonnage a donc été segmenté dans le temps, de manière à couvrir au maximum le champ spatial de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets. Les actions AR1 et AR2 ont été réalisées en étroite relation, les premiers résultats de l'AR2 sur les modèles géostatistiques en année 1 ont permis d'ajuster le plan d'échantillonnage de l'AR1 en années 2 et 3, en privilégiant les zones où les incertitudes d'estimation étaient élevées.

3.3 AR 3 : la modélisation spatialisée de la dynamique de la MO du sol

Suivi de la dynamique C et N en laboratoire

En 2011, les matières épandues et/ou existantes et/ou potentiellement existantes sur le territoire étudié ont été recensées et collectées : compost de déchets verts, compost de boue, fumier de cheval, boue urbaine déshydratée, fumier de bovins, fientes de volailles. On s'est appuyé notamment sur la thèse en cours de K. Dhaouadi sous la codirection de S. Houot et C. Aubry, portant sur la possibilité de substitution partielle des engrais azotés par des PRO et réalisée dans le cadre du projet ANR ISARD (soutenance prévue courant 2014). Toutes les matières épandues ont été analysées (C, N, MO, pH, teneurs en ETM). La caractérisation de la matière organique des PRO a débuté avec (1) la mesure du fractionnement biochimique des PRO et le calcul de l'indice de stabilité de la matière organique (ISMO), indicateur de la proportion de MO des PRO s'incorporant à la MO des sols (Lashermes et al. 2009, 2010) ; (2) la mise en place d'incubations en conditions contrôlées de laboratoire pour mesurer la dynamique d'évolution des PRO après apport au sol, en particulier la dynamique de minéralisation de leur matière organique par le suivi des cinétiques de minéralisation du C organique en CO₂ et de l'azote organique en NH₄⁺ puis NO₃⁻. Ces incubations ont été lancées durant 171 jours pour 4 types de PRO (co-compost de boue urbaine et déchets verts, boue urbaine déshydratée, fumier de cheval et compost de déchets verts) dans 4 sols de textures et caractéristiques physico-chimiques contrastées représentatifs du territoire étudié (Luvisol typique, Colluviosol sablo-limoneux, Néoluvisol, Calcosol) et fait l'objet de prélèvements en 2011. Cinq sols et 3 PRO étaient initialement prévus mais l'arbitrage entre temps/charge de travail a conduit à respecter les préconisations du Conseil Scientifique, selon lesquelles il importait de considérer aussi les boues non traitées et compostées.

Suivi des émissions de N₂O en laboratoire

Le même jeu sols*PRO a été utilisé pour caractériser les émissions de N₂O au laboratoire (Laville et al., 2012, 2013). Les émissions gazeuses de CO₂ et N₂O ont

été mesurées durant 13 jours sur des échantillons de sols mélangés ou non à des PRO.

Paramétrisation du modèle CERES-EGC

Toutes ces caractérisations sont en cours d'utilisation pour la mise en œuvre de la modélisation, à l'aide du modèle CERES-EGC, des dynamiques du C et du N et des émissions de N₂O après apport de PRO dans les différents types de sol et différents systèmes de culture. Le modèle CERES-EGC (Crop-Environment REsources Synthesis) est un modèle de culture simulant la croissance et le développement d'une culture à l'échelle du cycle cultural et focalisé principalement sur les sorties vers l'environnement (Gabrielle et al., 2002, 2005, 2006). Il comprend divers modules, dont un simulant la dynamique du carbone organique du sol et celle de l'azote (NC-SOIL) et un autre les émissions de gaz à effet de serre (GES), en fonction de paramètres de culture, de paramètres climatiques et de type et entretien du sol. Il a déjà été utilisé pour spatialiser des émissions de NO et N₂O à l'échelon national ou supra-national (Gabrielle et al. 2006, Lehuger et al., 2011). Son utilisation dans ce contexte s'est doublée d'une analyse de sensibilité exhaustive (Lehuger, 2009 ; Lehuger et al., 2009) dont les résultats ont été repris dans le cadre de notre projet. Le travail de simulations via CERES-EGC a été initié par la mission post-doctorale de Laëtitia Bréchet, et approfondi dans le cadre de la thèse de Paul-Emile Noirot-Cosson (Noirot-Cosson et al., 2013) en focalisant la modélisation, en premier lieu, sur le dispositif QualiAgro dont les résultats récents permettent de compléter la paramétrisation pour les sorties azote et biomasse du modèle (Peltre, 2010 ; Chalhoub et al., 2012).

L'étape de paramétrisation de la dynamique du carbone et de l'azote s'est avérée une étape clé, verrou scientifique et logistique. En effet, si pour le dispositif Qualiagro, les sorties de teneurs en CO issues du module NC-SOIL étaient correctes (Noirot-Cosson et al., 2013), celles de la biomasse, de volatilisation d'azote ou de lixiviation de nitrate issues de CERES-EGC ont nécessité d'affiner la paramétrisation afin que les sorties soient en phase avec les données de mesure. Les ajustements sont en cours dans le cadre de la thèse de P.E. Noirot-Cosson et laissent espérer une étape d'interfaçage SIG courant 2014.

3.4 AR 4 : scenarii d'évolution de la dynamique du stock de C en relation avec les apports de PRO

En lien avec le travail de thèse de K. Dhaouadi, des *scenarii* d'utilisation des PRO ont été mis au point. Les données du RPG ont été exploitées sur 4 années successives afin de cartographier les rotations culturales pour les îlots de culture stables sur la période. Nos travaux ont également porté sur la contribution des images de télédétection à détecter spatialement les cultures et les opérations culturales caractérisant les systèmes de culture.

4. Résultats obtenus

4.1 AR1 : la mesure du stock de CO des sols agricoles

Les données recueillies sont en cours de valorisation. Pour le moment, les résultats principaux concernent tour à tour : la correction atmosphérique des images et ses incertitudes ; la mesure de la rugosité de surface ; l'estimation de la teneur en carbone de l'horizon travaillé ; l'estimation du stock de carbone.

Le projet identifie depuis son début l'étape de correction atmosphérique des images comme point crucial qui explique partiellement les difficultés relatées dans

la littérature, notamment par Stevens et al. (2012), à obtenir des prédictions acceptables de teneurs en CO en utilisant des images satellitaires ou aéroportées. Nos résultats portent donc sur les incertitudes de la correction atmosphérique en utilisant une variante bootstrap et par pixel de la correction atmosphérique par la ligne empirique, dont les performances ont été comparées à celles du modèle de transfert radiatif ATCOR2 (Vaudour et al., 2014b). Nos travaux montrent que les erreurs de la correction atmosphérique sont faibles pour les images faiblement inclinées : les erreurs standard d'estimation sont d'environ 1–2 % de réflectance, les erreurs de validation de 2–3 % de réflectance et le biais de validation $<|1|$ % de réflectance. Les erreurs et les biais sont plus élevés pour les images obliques, particulièrement dans l'infrarouge moyen réflectif.

La méthode de modélisation stéréophotogrammétrique de la rugosité (Gilliot et al., 2012, 2013) atteint une précision millimétrique. Une première application du système a été effectuée sur 23 placettes de mesure, soit 299 photographies ; le temps de calcul est de l'ordre de 20 minutes par placette, pour une résolution de 1 mm. La valorisation directe des mesures réalisées a porté notamment sur le couplage optique/radar pour la prédiction des opérations culturales (Vaudour et al., 2013b, 2014a) dans le cadre de l'AR4.

Les résultats des traitements de spectres de réflectance mesurés en laboratoire, sur le terrain ou issus des images multispectrales, en vue d'estimer les teneurs superficielles en carbone organique (CO) des sols (Vaudour et al., 2012a-d, 2013a), se traduisent par des valeurs de RMSE d'environ 3 g.kg^{-1} pour les spectres de laboratoire, d'environ 4 g.kg^{-1} pour les spectres de terrain, de $4\text{-}6 \text{ g.kg}^{-1}$ pour les prédictions issues d'images. Nos travaux sont originaux en ce qu'ils portent l'accent sur les incertitudes des erreurs de validation des prédictions issues d'images avec un jeu de données externe (« post-validation »). La précision obtenue et les biais associés ne permettent donc pas de percevoir des changements sur un site objet d'apport massif de PRO depuis 15 ans tel que QualiAgro, où les variations maximales de teneurs en CO liées aux PRO, par rapport aux parcelles témoins, sont de l'ordre de 4 g.kg^{-1} . L'image hyperspectrale ainsi que les images Pléiades de très haute résolution spatiale acquises au printemps 2013 sont en cours de traitement afin d'étudier la précision de la prédiction des teneurs en CO issue de ces images. Les diverses approches de spatialisation des stocks sont en train d'être répertoriées dans le cadre de la thèse de P.E. Noirot-Cosson. Une première approximation des stocks de carbone a été réalisée à partir des données mesurées sur les placettes (Lemonnier, 2012). Nous prévoyons d'approfondir ces résultats en comparant diverses méthodes d'évaluation des stocks.

4.2 AR 2 : la spatialisation du stock de CO du sol

Outre les modèles d'estimation des teneurs en CO issus des images satellitaires multispectrales (Vaudour et al., 2012a-d, 2013a), d'autres modèles s'appuyant sur les données ponctuelles des sites prélevés, sur une carte pédologique existante et sur un modèle numérique d'altitude ont été développés: modèle linéaire spatialisé et modèle géostatistique par co-krigeage avec dérive externe (Hamiache et al., 2012a-c). Les erreurs de validation se situent dans des gammes similaires autour de $4\text{-}5 \text{ g.kg}^{-1}$. La comparaison entre les modèles issus d'imagerie satellitaire et les modèles géostatistiques a pour le moment été limitée aux valeurs globales de RMSE. La variabilité inter-parcellaire qui ressort de l'image satellitaire n'est pas restituée par les modèles géostatistiques développés. Une modélisation

dans le cadre bayésien hiérarchique, exploitant l'information de l'imagerie satellitaire, n'est pas finalisée dans le cadre du projet mais en cours.

4.3 AR 3 : la modélisation spatialisée de la dynamique de la MO du sol

Suivi de la dynamique C et N en laboratoire

Les dynamiques de minéralisation de carbone et d'azote s'avèrent très semblables entre les sols et diffèrent du fait des caractéristiques des PRO : deux PRO sont très labiles (fumier de cheval, boue urbaine déshydratée) contrairement aux deux autres, bien plus stables (compost de boue urbaine, compost de déchets verts).

Suivi des émissions de N₂O en laboratoire

Les sols additionnés de fumier de cheval et de boue urbaine déshydratée ont donné lieu aux plus fortes émissions quels que soient les sols. L'étude a montré des variations d'émissions importantes entre les types de sols, liées à l'aération du sol et à la granulométrie. Les émissions étaient plus élevées pour les sols argileux et en particulier le sol calcaire.

4.4 AR 4 : scénarii d'évolution de la dynamique du stock de C en relation avec les apports de PRO

Scénarii d'utilisation des PRO

En lien avec le travail de thèse de K. Dhaouadi (ANR ISARD), la constitution des scénarii de substitution d'engrais par des PRO a été réalisée mais tardivement et leur test est en cours car il s'est avéré beaucoup plus coûteux en temps, qu'initialement prévu, de correctement paramétrer les modèles. Ces scénarii existants de l'utilisation des PRO et des pratiques de fertilisation minérale ont été mis au point à travers des enquêtes réalisées sur 15 exploitations représentatives parmi les 82 présentes sur le territoire d'étude, dont 60 sont céréalières (Dhaouadi et al., 2013). Les principales successions culturales présentes sur 80% du territoire sont des successions de 3 ou 4 ans basées sur le colza et les céréales. Les PRO les plus nombreux sont des amendements organiques, notamment les composts de déchets verts et le fumier de cheval. La substitution des engrais minéraux par les engrais organiques et les amendements organiques répertoriés comme potentiellement disponibles semble envisageable dans le territoire car elle permet de répondre à la fois aux besoins des cultures et à la nécessité de restaurer les stocks de carbone des sols. Elle suscite un intérêt grandissant parmi les agriculteurs du territoire ainsi que l'attestent les échanges sur ce thème lors d'une journée « portes ouvertes » réalisée en février 2013, pour présenter les travaux des projets ANR ISARD et PROSTOCK.

Extraction spatialisée des pratiques agricoles par télédétection

La synergie SPOT4/ASAR permet de distinguer les pixels caractérisés par une reprise de labour ou en lit de semence d'une part, des pixels caractérisés par un labour d'hiver non repris avec une précision d'environ 72% des parcelles observées (Vaudour et al., 2014a). Ceci permet d'envisager l'estimation de la fréquence de labour via une série temporelle d'images sur la durée de la rotation. Par ailleurs, les images Pléiades permettent également de distinguer les états de surface de sols nus de ceux caractérisés par un début de végétation y compris aux stades les plus précoces des cultures (Membrive, 2013 ; Vaudour et al., 2014c, d). On y distingue les parcelles ayant récemment fait l'objet d'un épandage de compost. L'apport de Pléiades pour cartographier les types de cultures et leurs

stades phénologiques est en cours d'approfondissement. Ces travaux apportent une contribution théorique à la spatialisation des *scenarii*.

5. Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation

5.1 Implications pratiques

Le projet a permis des avancées significatives sur l'utilisation de données imagées en lien avec les mesures spectrales au sol, pour l'estimation des teneurs en CO du sol. La précision que l'on peut en espérer dépend non seulement du type de capteur, mais aussi des conditions atmosphériques et angulaires de la prise de vue, et des opérations culturales, qui affectent la performance de la correction atmosphérique. Contrairement aux prédictions issues de spectres de laboratoire ou même de terrain, les données multispectrales satellitaires de résolution moyenne haute ne permettent pas de distinguer des changements liés à des apports de PRO sur une durée de 15 ans, mais contribuent à une cartographie sommaire des teneurs en CO sur de vastes superficies. Couplées à des données radar, elles permettent de caractériser spatialement les *scenarii* des pratiques d'utilisation des PRO en lien avec les rotations et la fréquence de labour.

Le projet PROSTOCK ouvre la voie à de nombreuses questions connexes qui portent notamment sur le domaine de validité des modèles agri-environnementaux lorsque les types de sols et les opérations culturales varient à l'échelon d'une petite région agricole.

5.2 Recommandations

A l'issue du projet, les résultats obtenus permettent de définir des compromis coût/précision d'estimation. Grâce à notre base de données de spectres et d'analyses conventionnelles, le suivi ponctuel des teneurs superficielles en CO est désormais possible via des prélèvements de sol par le biais de spectres mesurés en laboratoire, ou encore mesurés sur le terrain. Le suivi spatialisé est également possible via des images multispectrales de résolution moyenne (20 m) mais suppose des changements de teneurs supérieurs à 5 g.kg^{-1} i.e des durées longues d'apports continus de PRO. Il nous reste à vérifier si le suivi spatialisé est également envisageable à l'échelle de 15 ans si les données prises dans des conditions optimales sont dotées d'une résolution spatiale et/ou spectrale fine. Le projet a ainsi permis d'avancer sur les méthodes de diagnostic et de suivi du carbone organique du sol, et des impacts des épandages de PRO, et celles-ci pourraient servir au calcul de critères utiles aux décideurs publics. Il demeure encore quelques étapes à franchir avant de pouvoir produire des critères directement utiles à la décision publique, tels que des bilans GES en fonction des sols et des PRO, par exemple. En ce qui concerne les émissions de N_2O , les résultats montrent des émissions variables selon les types de sol, et permettent de cibler des situations pour lesquels un PRO donné épandu est susceptible d'émettre davantage de N_2O . La liste des PRO disponibles répertoriés sur le territoire étudié suggère qu'il serait bénéfique, pour restaurer les teneurs en CO des sols agricoles, d'envisager des *scenarii* d'apports de PRO amendants tels que le fumier de cheval et les composts de déchets verts, ceux-ci étant les mieux à même de restaurer les stocks de carbone quels que soient les sols, avec des émissions de GES réduites. Le compostage de fumier de cheval permet en plus de limiter les problèmes de faim d'azote au moment de leur apport et permettrait d'homogénéiser ces fumiers qui sont souvent très hétérogènes (Dhaouadi, thèse

en cours). Les premiers résultats de simulation des *scenarii* réalisés après la fin du projet PROSTOCK montrent que des PRO de type fertilisant comme le lisier de porc séché commercialisé par la coopérative ou les boues d'épuration pourraient se substituer aux engrais minéraux azotés en situation de limon profond sans perte de rendement (Dhaouadi, thèse en cours). Cependant, cela s'accompagne d'une sur-fertilisation en phosphore. Il semble donc nécessaire de panacher fertilisation minérale et organique pour gérer l'équilibre des fertilisations azotées et phosphatées. La seule augmentation des teneurs en matière organique des sols permet de limiter fortement le besoin de fertilisation des cultures comme le maïs ou le colza mais une fertilisation minérale reste nécessaire pour le blé.

5.3 Réalisations pratiques et valorisation

Le projet PROSTOCK a abordé chacun de ses objectifs initiaux, et permis des avancées significatives sur les questions posées, qu'il s'agisse de déterminer où épandre des PRO, quels PRO épandre, quels effets sur les émissions de N₂O et la faisabilité de la surveillance spatio-temporelle des stocks par télédétection. Il s'est fait en lien et avec l'engagement des agriculteurs du territoire et s'avère fécond en possibles approfondissements au service de ces derniers, que permet d'envisager l'ampleur inédite des données recueillies.

6. Partenariats mis en place, projetés, envisagés

Le projet PROSTOCK pourrait donner lieu à une suite qui valoriserait les résultats en cours dans la perspective de l'évaluation spatialisée des services écosystémiques des sols sous l'effet de l'apport des PRO. Deux projets faisant la suite de PROSTOCK ont été déposés dans ce sens auprès de l'AO du Labex BASC en novembre 2013 et retenus en janvier 2014 (SOLTER et SOCSENSIT).

En outre, le projet PROSTOCK a favorisé le tissage des partenariats suivants :

- UMR TETIS Montpellier : expertise sur l'imagerie radar (N. Baghdadi) ;
- UMR TSI2M Rennes : expertise sur l'acquisition et la correction d'imagerie hyperspectrale aéroportée (K. Chehdi, J. Lefèvre) ;
- UR INFOSOL : mise à disposition des données de masse volumique apparente du RMQS (C. Jolivet, L. Boulonne) ;
- Centre National d'Etudes Spatiales : appui pour l'acquisition d'images, leur orthorectification et collaboration dans le cadre des programmes Orfeo-Recette Thématique Utilisateur et SPOT4-Take Five (C. Tinel, M. Grizonnet, O. Hagolle).

7. Liste des opérations de valorisation et de transfert issues du contrat (articles de valorisation, participations à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hamiache J., Bel L., Vaudour E., Gilliot J.M., 2012a. Spatial stochastic modeling of topsoil organic carbon content over a cultivated peri-urban region, using soil properties, soil types and a digital elevation model. In: Digital Soil Assessments and Beyond, Minasny, Malone & McBratney (eds), CRC press, Balkema, pp. 161-166. 2. Laville P., Michelin J., Houot S., Gueudet J.-C., Rampon J.N., Labat C., Vaudour E., 2013. Soil N₂O Emissions from Recovered Organic Waste Application in Versailles Plain (France): A Laboratory Approach. Waste and Biomass Valorization. Published online. http://dx.doi.org/doi:10.1007/s12649-013-9249-4. 3. Vaudour, E., Baghdadi, N., Gilliot, J.M., 2014a. Mapping tillage operations over a peri-urban region using combined SPOT4 and ASAR/ENVISAT images. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 28, 43-59. http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.005 4. Vaudour E., Bel L., Gilliot J.M., Coquet Y., Hadjar D., Cambier P., Michelin J., Houot S., 2013a. Potential of SPOT multispectral satellite images for mapping topsoil organic carbon content over peri-urban croplands. Soil Science Society of America Journal, 77, 2122-2139. http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2013.02.0062 5. Vaudour, E., Gilliot, J.M., Bel, L., Bréchet, L., Hadjar, D., Hamiache, J., Lemonnier, Y., 2014b. Uncertainty of soil reflectance retrieval from SPOT and RapidEye multispectral satellite images using a per-pixel bootstrapped empirical line atmospheric correction over an agricultural region. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 26, 217-234. http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.07.003
Publications scientifiques prévues	<ol style="list-style-type: none"> 1. Gilliot, J.M., Vaudour, E., Michelin, J., 2013. A fully automatic toolchain for measuring soil surface roughness of agricultural bare fields using photogrammetry from pictures taken without geometric constraints. Soumis à Soil & Tillage Research.
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	<ol style="list-style-type: none"> 1. Gilliot J.M., Michelin J., Vaudour E., 2012. Une chaîne de traitement automatique pour l'estimation de la rugosité des sols agricoles par photogrammétrie 3D à partir de photographies prises sans contraintes pour le suivi radiométrique des sols. 11èmes Journées d'Etude des Sols, 2012, Versailles,

- présentation orale.
2. Hamiache J., Bel L., Vaudour E., Gilliot J.M., 2012b. Spatial stochastic modeling of topsoil organic carbon content over a cultivated peri-urban region, using soil properties, soil types and a digital elevation model. Digital Soil Mapping 2012- Pedometrics, Sydney (Australia), oral presentation.
 3. Hamiache J., Bel L., Vaudour E., Gilliot J.M., 2012c. Spatial stochastic modeling of topsoil organic carbon content over a cultivated peri-urban region, using soil properties, soil types and a digital elevation model. EUROSIL 2012, Bari (Italy), poster.
 4. Laville P., Michelin J., Houot S., Djerrah A., Gueudet J.C., Rampon J.N., Labat C., 2012. Characterization of N₂O emissions in relation to the soil characteristics and the organic wastes spread in the Versailles plain (France). ORBIT 2012, Rennes.
 5. Noirot-Cosson P.E., Bréchet L., Gilliot J.M., Eden M., Molina J., Rampon J.N., Gabrielle B., Vaudour E., Houot S., 2013. Simulation with the NCSOIL model of carbon and nitrogen dynamics in a loamy soil after various compost applications. In: 15th International Conference RAMIRAN 2013 : Recycling of organic residues in agriculture: From waste management to ecosystem services, INRA, VEOLIA Environnement, Versailles (FRA), 03-05/06/2013. (poster).
 6. Vaudour E., Baghdadi N., Gilliot J.M., 2013b. Mapping tillage practices over a peri-urban region using artificial neural networks applied to combined SPOT and ASAR/ENVISAT images. In: IEEE-WHISPERS 2013, 5th Workshop on Hyperspectral Image and signal processing, Gainesville, Florida USA, 25-28/06/2013. (poster).
 7. Vaudour E., Gilliot J.M., Bel L., 2012a. The mapping of soil carbon content using spectroscopy and very high resolution images. Pleiades Days, 17-18 January, CNES, Toulouse, France, oral presentation.
 8. Vaudour E., Gilliot J.M., Bel L., De Junet A., Michelin J., Hadjar D., Cambier P., Houot S., Coquet Y., 2012b. Topsoil organic carbon prediction using VIS-NIR-SWIR reflectance spectra at lab, field and satellite levels over a periurban region. EUROSIL 2012, Bari (Italie), poster.
 9. Vaudour E., Gilliot J.M., Bel L., De Junet A., Michelin J., Hadjar D., Cambier P., Houot S., Coquet Y., 2012c. Performance degradation in predicting topsoil organic carbon contents using reflectance spectra from lab, field to SPOT scales over a periurban region. EGU 2012, Vienna (Austria), oral presentation.
 10. Vaudour E., Gilliot J.M., Bel L., De Junet A., Michelin J., Hadjar D., Cambier P., Houot S., Coquet Y., 2012d. Prédiction régionale des teneurs superficielles en carbone organique de sols cultivés périurbains au moyen de spectres de réflectance mesurés en laboratoire, au champ ou issus d'images satellitaires multispectrales. 11èmes Journées d'Etude des Sols, 2012, Versailles, présentation orale.

Participations futures à des colloques	<ol style="list-style-type: none"> 1. Noirot-Cosson P.E., Vaudour E., Aubry C., Gilliot J.M., Gabrielle B., Houot S., 2014. Scenarios of organic amendment use to increase soil carbon stocks and nitrogen availability in cropped soils at the territory scale: spatial and temporal simulations with the NCSOIL/CERES-EGC crop model. EGU 2014, Vienne, Autriche. 2. Vaudour E., Baghdadi N., Gilliot J.M., 2014. Mapping tillage operations over peri-urban croplands using a synchronous SPOT4/ASAR ENVISAT pair and soil roughness measurements. EGU 2014, Vienne, Autriche. 3. Vaudour E., Noirot-Cosson P.E., Membrive O., Hadjar D., 2014c. Potential of very high spatial resolution Pleiades images for discriminating between crops at early growth stage and bare agricultural soils. EGU 2014, Vienne, Autriche. 4. Vaudour E., Membrive O., Noirot-Cosson P.E., Hadjar D., 2014d. Apport des images THRS Pléiades à la caractérisation des systèmes de culture d'une région périurbaine francilienne. Pleiades Days 2014, Toulouse 1/04/14-4/04/14.
THESES	
Thèses passées	
Thèses en cours	<p>Dhaouadi K., 2014. Substitution partielle de l'utilisation des engrais azotés par des produits résiduaux organiques sur le territoire de la Plaine de Versailles et du plateau des Alluets. Thèse de doctorat AgroParisTech, soutenance courant 2014.</p> <p>Noirot-Cosson P.E., 200X. Dynamique territoriale du carbone organique des sols agricoles franciliens sous influence urbaine : <i>scenarii</i> agronomiques pour leur gestion soutenable. Thèse de Doctorat AgroParisTech, soutenance fin 2015.</p>
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	<p>Bel L., Vaudour E., Hamiache J., 2013. L'engrais des villes. Mathématiques de la Planète Terre. Un jour, une brève. http://mpt2013.fr/engrais-des-villes/, publié le 24 janvier 2013</p>
Articles de valorisation à paraître	
Articles de valorisation prévus	
AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	<p>De Naurois M., 2013. L'APPVPA sur France Inter dans Carnets de campagne. Emission "Carnets de campagne" du lundi 12 mars 2013 sur France Inter. http://www.plainedeversailles.fr/video/film.php</p>
Actions vers les médias prévues	<p>Gilliot et al., 2014. Animation autour du thème «Utilisation des drones et de la télédétection pour suivre les stocks de C dans les sols. Contexte : Plaine de Versailles, Systèmes d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement - Produits résiduaux organiques (Soere-Pro)». Diaporamas et maquette du</p>

	paysage de la Plaine de Versailles+fiche de présentation du projet PROSTOCK, stand INRA du Salon International de l'Agriculture, 22/02-02/04/14, Paris. www.salon-agriculture.com
ENSEIGNEMENT – FORMATION	
Enseignement s/formations dispensés	<p>Boucat B., 2013. Suivi temporel et répartition géographique des états de surface des sols agricoles de la Plaine de Versailles : relations avec la réflectance et des propriétés physiques du sol. Rapport de stage de Master 1, Université Paris 6, UMR INRA AgroParisTech, 27 p.</p> <p>David M., 2011. Apport de la spectroscopie visible, proche et moyen infrarouge réflectif à l'estimation des teneurs en carbone organique des sols de la région de Versailles. Rapport de stage de Master 1, Université Paris 6, UMR INRA AgroParisTech, 28 p.</p> <p>Hamiache J., 2011. Modélisation spatiale de la teneur en carbone organique dans le sol à l'échelle d'une petite région agricole. Mémoire de Master 2, Univ. Paris Sud, UMR INRA AgroParisTech MIA, 72 p.</p> <p>Lemonnier Y., 2012. Apport de la spectroscopie visible-proche infrarouge à l'estimation du stock de carbone de l'horizon labouré de sols ayant reçu des apports de composts. Mémoire de Master 2 Géographie et sciences des territoires, spécialité «Télédétection et géomatique appliquées à l'environnement », Université Diderot Paris 7, UMR INRA AgroParisTech, 49 p.</p> <p>Membrive O., 2013. Apport des images THR Pléiades diachroniques à la caractérisation des systèmes de culture d'une région périurbaine francilienne. Mémoire de Master 2, Univ. Paris 6, 41 p.</p>
Enseignement s/formations prévus	
EXPERTISES	
Expertises menées	
Expertises en cours	
Expertises prévues	
METHODOLOGIES (GUIDES...)	
méthodologies produites	
méthodologies en cours	
d'élaboration	
méthodologies prévues	
AUTRES	
Précisez...	GERER LA FERTILITE DES SOLS AVEC DES MATIERES ORGANIQUES DANS LA PLAINE DE VERSAILLES : RESULTATS DE RECHERCHE ET PERSPECTIVES DE MISE EN PRATIQUE : Journée Portes Ouvertes destinée aux

agriculteurs de l'APPVPA, 1er février 2013, Grignon. Organisation : INRA UMR EGC (S. Houot, E. Vaudour), SADAPT (C. Aubry) et Bioemco (C. Chenu). Demi-journée de présentation des travaux de recherche faits en plaine de Versailles.

Dhaouadi K., Panardeau V., Akkal N., 2013. Scénarios de substitution des engrais chimiques par les produits résiduaux organiques dans les successions culturales de la Plaine : résultats des modélisations et confrontation à la pratique. In: Journée Portes Ouvertes avec l'APPVPA « Gérer la fertilité des sols avec des matières organiques dans la Plaine de Versailles - Résultats de recherche et perspectives de mise en pratique », Grignon (FRA), 01/02/2013 diaporama. (présentation orale).

Houot S., 2013. Gestion des stocks de carbone dans le sol avec les produits résiduaux organiques de la Plaine : résultats de modélisation et incidences sur la fertilité chimique des sols. In: Journée Portes Ouvertes avec l'APPVPA « Gérer la fertilité des sols avec des matières organiques dans la Plaine de Versailles - Résultats de recherche et perspectives de mise en pratique », Grignon (FRA), 01/02/2013 diaporama. (présentation orale).

Vaudour E., 2013. Les stocks de carbone dans les sols de la Plaine : résultats et questions vives. In: Journée Portes Ouvertes avec l'APPVPA « Gérer la fertilité des sols avec des matières organiques dans la Plaine de Versailles - Résultats de recherche et perspectives de mise en pratique », Grignon (FRA), 01/02/2013 diaporama. (présentation orale).

Vaudour E., 2013. Territoire péri-urbain de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets. Projet PROSTOCK-Gessol3. Ecole-Chercheurs : « Evaluation des services fournis par les sols pour une prise en compte dans le développement territorial », organisée par le Labex BASC - Réseau SOLFIT. Chaussy, 24-25/01/2013. (Poster)