

Évaluation des stocks de carbone organique des sols cultivés de France

Application de la méthodologie Tier 1 du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) aux sites du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS)

V. Tossier⁽¹⁾, T. Eglin⁽²⁾, M. Bardy⁽¹⁾, A. Besson⁽³⁾ et M. Martin^(1*)

- 1) INRA Val de Loire, US 1106 Infosol, 45075 Orléans, France
- 2) ADEME, Service Agriculture et Forêts, 20, avenue du Grésillé, 49000 Angers
- 3) Université de Montpellier, UMR Hydrosociétés, 2 place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5

* : Auteur correspondant : manuel.martin@orleans.inra.fr

RÉSUMÉ

Le stockage de Carbone Organique du Sol (COS) est un sujet de prime importance dans les négociations internationales visant à lutter contre le changement climatique au travers d'une réduction d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Actuellement, les variations de COS sur les terres sans changement d'affectation, qui sont majoritairement causées par l'évolution des modes de gestion, ne sont pas prises en compte dans les inventaires français d'émissions et absorptions de Gaz à Effet de Serre (GES). Pour pallier ce manque, les lignes directrices du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) proposent trois méthodes, de complexités différentes.

L'objectif de ce travail est d'étudier dans quelle mesure il est possible d'appliquer la méthodologie de Tier 1 des lignes directrices du GIEC (basée sur les facteurs d'émissions), aux sites du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS), sur une période passée, entre 1990 et 2010, et de façon prospective sur la période 2010-2030. Ce travail repose sur la constitution de séries temporelles d'évolution des pratiques culturales (travail du sol et niveau d'intrants organiques). Pour la période 1990-2010, elles s'appuient sur les données des enquêtes Pratiques Culturales, et pour la période 2010-2030 sur les scénarios d'évolution de l'agriculture de l'étude « *Agriculture et Facteur 4* ».

La méthodologie de Tier 1 montre une augmentation du stock de COS de 0,92 tC/ha entre 1990 et 2010, alors que le stockage de COS est compris entre 2,95 et 3,85 tC/ha entre 2010 et 2030.

Mots clés

Sol, carbone organique, France, pratiques culturales, terres cultivées.

SUMMARY**EVALUATION OF SOIL ORGANIC CARBON STOCKS OF FRENCH CROPLANDS****Application of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Tier 1 method to the French soil monitoring network**

Soil Organic Carbon (SOC) storage is a major topic in the international negotiations related to climate change. Currently, SOC variations of land remaining in a land use-category, which are mainly caused by land management evolutions, are not considered in the French greenhouse gas inventories. To overcome this problem, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines offer three methods of different complexity.

The aim of our work is to study in which extend it is possible to apply the Tier 1 methodology (based on emission factors) to the French soil monitoring network, between 1990 and 2030. Prior to the application of emission factors, temporal series of land management evolution were established. For the 1990-2010 period they were based on French land management surveys, and for the 2010-2030 period they on various scenarios of agricultural change for the French territory.

This method resulted in a raise of the SOC stocks of 0.92 tC/ha/y between 1990 and 2010, and between 2.95 and 3.85 tC/ha/y for the 2010-2030 period.

Key-words

Soil, organic carbon, France, land management, croplands.

RESUMEN**EVALUACIÓN DE LOS STOCKS DE CARBONO ORGÁNICO EN LOS SUELOS CULTIVADOS DE FRANCIA.****Aplicación de la metodología Tier1 del grupo de expertos intergubernamental sobre la Evolución del Clima (GIEC) a los lugares de la Red de Medida de la Calidad de los Suelos (RMQS)**

El almacenamiento del Carbono Orgánico del suelo (COS) es un tema de primera importancia en las negociaciones internacionales que buscan luchar contra el cambio climático a través de una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GES). Actualmente, las variaciones del COS en las tierras sin cambio de afectación, que están en mayoría causadas por la evolución de los modos de gestión, no se toman en cuenta en los inventarios franceses de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (GES). Para paliar esta carencia, las líneas directivas del Grupo Intergubernamental sobre la Evolución del Clima (GIEC), proponen tres métodos, de complejidades diferentes.

El objetivo de este trabajo es estudiar en qué medida está posible aplicar la metodología Tier 1 de las líneas directivas del GIEC (basada sobre los factores de emisiones), a los lugares de la Red de Medida de la Calidad de los Suelos (RMQS), sobre el periodo 2010-2030. Este trabajo se apoya sobre la constitución de series temporales de evolución de las prácticas de cultivo (trabajo del suelo y nivel de los insumos orgánicos). Para el periodo 1990-2010, se apoyan sobre datos de las encuestas Prácticas de cultivo, y para el periodo 2010-2030 sobre los escenarios de evolución de la agricultura del estudio "agricultura y factor 4".

La metodología Tier muestra un aumento del stock de COS de 0,92tC/ha entre 1990 y 2010, mientras que el almacenamiento del COS oscila entre 2,95 y 3,85 tC/ha entre 2010 y 2030.

Palabras clave

Suelo, carbono orgánico, prácticas de cultivo, tierras cultivadas.

Le sol est un système complexe tenant une place centrale au sein des écosystèmes agricoles et forestiers en intervenant dans la régulation des différents cycles naturels tels que ceux des gaz à effet de serre. De par ses fonctions agro-environnementales, le sol représente à la fois i) un lieu de stockage, un puits de carbone organique et ii) une source par l'émission de dioxyde de carbone (CO₂) vers l'atmosphère, gaz à fort effet de serre, qui a une influence sur le changement climatique (Arrouays *et al.*, 2002 ; Bernoux *et al.*, 2001 ; Hutchinson *et al.*, 2007 ; Lal *et al.*, 2007). Depuis quelques années, les engagements internationaux qui ont pour but de lutter contre le changement climatique prennent en compte les variations de Carbone Organique des Sols (COS). Par exemple, avec la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC, 1992) et le Protocole de Kyoto (1997), la réalisation d'un inventaire annuel d'émissions et absorptions de Gaz à Effet de Serre (GES) est rendue obligatoire pour les pays signataires, dont la France. Cet inventaire s'appuie sur une intégration des variations de COS par leur comptabilisation précise, comme déjà suggérée par Arrouays *et al.* (2001). Plus récemment (12/03/2012), le Parlement et le Conseil européens ont proposé l'intégration de l'Utilisation des Terres, leur Changement d'affectation et la Foresterie (UTCF) à la comptabilité carbone européenne (Commission européenne, 2012, Décision Com (2012) 93 final). Si cette décision est adoptée en l'état par le conseil de l'Union Européenne, chaque Etat membre devra être capable de comptabiliser la variation des stocks de COS dans ce secteur à l'horizon 2020.

Dans ce contexte, de plus amples efforts de comptabilisation des COS restent nécessaires en France. En effet, si la France rapporte déjà les variations de COS dues aux changements d'occupation, *i.e.* d'affectation des terres, l'influence des pratiques de gestion, notamment des terres agricoles (travail du sol, apports de matières organiques...), n'est que peu considérée. Seule l'activité « gestion forestière » comme référencée dans l'article 3.4 du protocole de Kyoto, des terres n'ayant pas subi de changement d'affectation ou de conversion autre que boisement, déboisement et reboisement, est rapportée. Il s'avère pourtant que les modes de gestion, tels que les pratiques agricoles mises en œuvres sur les terres cultivées sans changement d'affectation, représentent les principaux facteurs impactant les stocks de COS (Arrouays *et al.*, 2002 ; Ciais *et al.*, 2011 ; Lal *et al.*, 2007).

Notre étude a ainsi pour objectif d'évaluer les variations de stocks de carbone organique des sols issus des terres cultivées, sans changement d'affectation, à l'échelle du territoire français, par l'application de la méthode de niveau Tier 1 des lignes directrices produites par le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2006). Ces lignes directrices permettent de quantifier l'effet des pratiques culturales sur la variation des stocks de COS et sont établies périodiquement pour régir l'élaboration des inventaires nationaux d'émissions et absorptions

de GES (OMINEA, 2012). Ces lignes directrices sont mises en œuvre (1) sur la période 1990-2010 dans une perspective de comptabilisation des émissions de CO₂ en comptabilité avec les inventaires actuels, et (2) sur des scénarios d'évolution des pratiques à l'horizon 2030 à des fins de prospective et d'appui aux politiques publiques. Afin d'adapter la méthode au contexte français, la base de donnée du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS), obtenue à l'échelle du territoire, est utilisée pour définir localement des stocks de COS de référence représentatifs. Notre étude amène à discuter également des limites de l'application de la méthode Tier 1 quant à l'évaluation des COS des terres cultivées de France.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le Réseau de Mesure de la Qualité de Sols (RMQS)

L'objectif du RMQS est la détection de l'apparition de changements et des tendances d'évolutions de la qualité des sols en France, à la fois sous l'effet de facteurs naturels et anthropiques. Une grille de 16 x 16 km couvrant la France métropolitaine a été mise en place ; cette taille de maille offre le meilleur compromis entre la représentation géographique des sols, et de leurs occupations, et le coût engendré par la création du réseau (Arrouays *et al.*, 2001), tout en permettant la détection d'évolution à des pas de temps raisonnables (Saby *et al.*, 2008). Un site d'échantillonnage a été installé au centre de chaque cellule de la grille, soit environ 2 200 sites au total, au cours d'une campagne de prélèvement qui a débuté en 2000 pour se terminer en 2012. Sur les 2 200 sites échantillonnés, 781 sites sont en terres cultivées. L'objectif du réseau est de ré-échantillonner régulièrement (périodicité : 10 à 15 ans) sur ces mêmes sites afin d'étudier l'évolution de différents paramètres du sol, dont les stocks de COS. Sur chaque site, deux échantillons de sol ont été prélevés (horizons de surface entre 0 et 30 cm et profond entre 30 et 50 cm). La teneur en COS a été analysée de façon identique (combustion et éventuellement décarbonatations préliminaires) sur l'ensemble des échantillons. Une fosse pédologique a également été creusée, permettant la détermination de masse volumique sèche de terre fine nécessaire au calcul des stocks de COS à partir des teneurs en C.

Le réseau permet ainsi de cartographier à l'échelle du territoire des stocks de COS avec une résolution spatiale relativement fine. Ces données ont déjà été utilisées pour produire des cartes nationales, estimer le stock de carbone total à l'échelle nationale et les stocks par principales occupations de sol (Martin *et al.* 2011, Meersmans *et al.* 2012).

Des données sur les pratiques culturales ont aussi été recueillies par enquête auprès des exploitants des parcelles sur

lesquelles se trouvent les sites d'échantillonnage. Ces données concernent la totalité de la rotation culturale, soit au maximum sept cultures. En particulier, nous avons accès aux informations concernant le travail du sol (trois types de travaux du sol peuvent être renseignés au maximum, ils concernent toutes les cultures de la rotation), la gestion des résidus (pour chaque culture de la rotation) et les apports organiques (quantité, type et fréquence d'apport) (Gourrat, 2012). L'inconvénient de ces enquêtes agronomiques vient de la qualité des données : certaines contiennent des erreurs (de saisie, d'unité) qui sont difficiles à déceler, et certaines variables sont très peu renseignées.

Méthode Tier 1

Les lignes directrices du GIEC (2006) définissent trois méthodes (ou Tiers), de complexité croissante :

- Tier 1 : utilisation de facteurs d'émissions de références, donnés dans les lignes directrices
- Tier 2 : utilisation de facteurs d'émissions adaptés au territoire d'étude
- Tier 3 : utilisation de modèles ou de réseau de suivi

Nous proposons ici d'appliquer la méthode Tier 1 au cas France. Le calcul de la variation annuelle des stocks de COS à l'échelle nationale se fait de la manière suivante :

$$\Delta C_{\text{Minéraux}} = \frac{COS_0 - COS_{(0-T)}}{T} \quad (1)$$

$\Delta C_{\text{Minéraux}}$: variations annuelles des stocks de carbone des sols minéraux (tC/an)

COS_0 : stock de COS dans la dernière année d'une période d'étude (tC)

$COS_{(0-T)}$: stock de COS au début de la période d'étude

T : période de temps nécessaire à la mise à l'équilibre des stocks de COS en système agropédoclimatique constant, généralement considérée égale à 20 ans (GIEC, 2006).

Le stock de COS des sols minéraux, seule variable de l'équation précédente qui, dans notre cas est issue d'observations sur site, est déterminé selon l'équation suivante :

$$COS(t) = COS_{ST} \cdot F_{LU}(t) \cdot F_{MG}(t) \cdot F_I(t) \quad (2)$$

$COS(t)$: stock de carbone organique (tC/ha) pour une année t
 COS_{ST} : stock de COS, dans les conditions de référence (c'est-à-dire lorsque la végétation indigène n'a été ni dégradée, ni améliorée), dans la couche de 0 à 30 cm de profondeur (tC/ha)

$F_{LU}(t)$: facteur d'affectation des sols, qui reflète l'influence de l'occupation du sol sur les niveaux de stocks de COS associés, suivant les différentes régions climatiques

$F_{MG}(t)$: facteur de gestion, reflétant la différence entre le stock de COS associé au type de travail du sol et le stock de COS de référence, pour une année t . Les modalités de ce facteur d'ajustement sont :

- labour complet : cette modalité correspond à tout travail du sol engendrant un mélange et un retournement des horizons à l'aide d'une charrue à versoirs et/ou un travail du sol fréquent au cours de l'année. Une faible partie de la parcelle reste couverte de résidus de culture (< 30 %),
- labour réduit : cette modalité correspond à une perturbation du sol plus faible qui en général n'engendre pas de mélange et de retournement des horizons. Une part plus importante de la parcelle reste couverte de résidus de culture (> 30%),
- pas de labour : cette modalité correspond au semis direct.

$F_I(t)$: facteur des intrants, reflétant la différence entre le stock de COS associé aux différents niveaux d'apport de carbone et le stock de COS de référence, pour une année t . Les apports peuvent être de plusieurs natures : résidus apportés par les cultures en place ou ajoutés par l'exploitant, fertilisants minéraux et organiques. Les modalités de ce facteur sont :

- intrants faibles : enlèvement des résidus de culture, mise en jachère nue, absence d'apport d'engrais minéraux et de cultures fixant l'azote,
- intrants modérés : soit enfouissement des résidus de culture, soit apport de matières organiques supplémentaires, présence de fertilisation minérale et de cultures fixant l'azote,
- intrants élevés sans fumier : apports de carbone plus importants par rapport aux systèmes de cultures avec apports modérés, grâce à l'utilisation d'engrais verts, de cultures de couvertures, de graminées dans la rotation, mais sans apport de fumier,
- intrants élevés avec fumier : apports de carbone plus importants par rapport aux systèmes de cultures avec apports modérés, en raison d'ajout régulier de fumier

Séries temporelles d'évolution des pratiques culturales

Pour pouvoir observer ou estimer l'effet des pratiques culturales sur la variation des stocks de COS entre 1990 et 2030, il est nécessaire de disposer de séries temporelles d'évolution des modes de gestion en contexte agricole. La première période étudiée, 1990-2010, s'appuie sur les enquêtes Pratiques Culturales réalisées par le Ministère en charge de l'Agriculture et mises à disposition par le SSP. La seconde période, 2010-2030, se base sur des scénarios d'évolution des pratiques déterminés dans l'étude « Agriculture et Facteur 4 » présentée par Vidalenc *et al.* (2012).

Le choix de 2010 comme année charnière entre la période passée et la période de prospective basée sur l'utilisation de scénarios, repose sur l'approximation que l'ensemble des sites RMQS considérés ont été échantillonnés à cette date. Nous supposons ainsi que les pratiques culturales n'ont pas évolué entre la date d'échantillonnage et 2010, sur tous les sites du réseau. Ce choix a été fait de façon à simplifier le

traitement des données.

Période historique : 1990-2010

L'objectif de cette étape du travail est de faire varier les pratiques culturales sur les sites RMQS, en se basant sur l'année 2010 qui constitue « l'état zéro », et en remontant le temps jusqu'en 1990, en contraignant ces évolutions de pratiques sur les sites pour qu'elles correspondent aux séries temporelles d'évolution des pratiques obtenues précédemment. Afin de relier les données des enquêtes Pratiques Culturales du SSP (1994, 2001 et 2006) aux sites RMQS, nous avons dans un premier temps reconstruit, sur la période 1990-2010, des séries d'évolution des pratiques pour la gestion (travail du sol) et les intrants pour chaque culture considérée dans les enquêtes Pratiques Culturales du SSP. Dans un deuxième temps, nous avons lié ces séries aux sites RMQS en fonction des cultures observées dans les rotations des sites RMQS (figure 1).

En considérant que la rotation d'un site RMQS renseignée au mo-

ment du prélèvement (7 cultures renseignées au maximum) se répète au cours du temps, on détermine, pour chaque site, de nouveaux facteurs d'ajustement, pondérés par les pratiques présentes sur les différentes cultures de la rotation. Ces facteurs d'ajustement, qui tiennent compte de la rotation et des pratiques par culture, sont multipliés par le COS_{ref} du site pour calculer, pour une année donnée, le stock de COS.

La réalisation de cette étape suppose que l'on dispose d'informations dans les enquêtes Pratiques Culturales sur les cultures présentes dans les rotations des sites RMQS. Les sites pour lesquels au moins une culture de la rotation n'est pas renseignée sont écartés. Sur les 781 sites en terres cultivées, on élimine 203 sites pour réaliser les simulations.

Période prospective : 2010-2030

Proposer des scénarios cohérents sur l'évolution des pratiques culturales dans le futur est un travail complexe, puisque dépendant de nombreux paramètres (agronomiques, environnementaux, sociaux...). La constitution de séries temporelles d'évolution des pratiques culturales se base, pour cette période, sur l'utilisation d'un travail existant. Il s'agit de l'étude « Agriculture et Facteur 4 », présentée par Vidalenc *et al.* (2012). La France s'est engagée à diviser par 4 ses émissions de GES d'ici à 2050, avec la loi dite Grenelle 1, du 3 août 2009 (n° 209-967). L'étude « Agriculture et Facteur 4 » vise à identifier des leviers d'action pour atteindre cette réduction des émissions de GES, dans les secteurs de l'agriculture et de la sylviculture. Pour cela, 3 systèmes de production (conventionnel, intégré et biologique) et 4 scénarios de l'évolution de l'agriculture en France à l'horizon 2050 ont été proposés (Vidalenc, 2012).

L'étude précise qu'il faut s'attendre à l'avenir à une méthanisation systématique des déjections ani-

Figure 1 - Démarche permettant la prise en compte des rotations sur les sites RMQS pour le calcul de l'évolution des stocks de COS (FA : Facteurs d'ajustement = FLU x FMG x FI)

Figure 1 - Accounting for crop rotations when estimating SOC stocks changes.

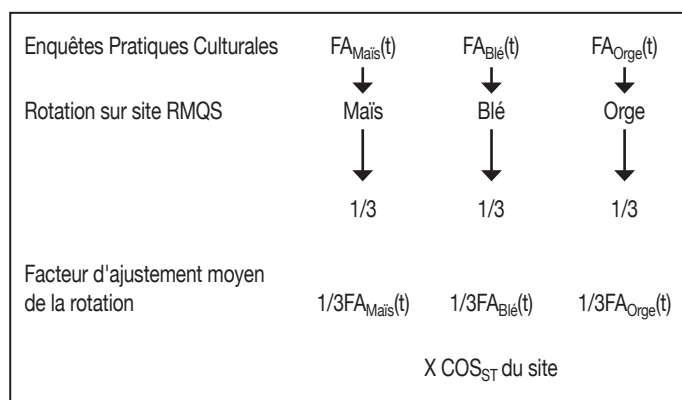


Tableau 1 - Description des scénarios de l'étude « Agriculture et Facteur 4 ».

Table 1 - Agricultural scenario from the study on "Agriculture et Facteur 4".

Scénarios	Description
Tendanciel	Maintien des exportations par rapport au niveau actuel (estimation à partir d'extrapolation des séries statistiques disponibles).
Alpha : une agriculture éco-intensive	Forte modification des systèmes de culture (la production intégrée étant favorisée par rapport à l'agriculture conventionnelle), optimisation de l'efficacité énergétique, réduction des surconsommations alimentaires et des pertes alimentaires inévitables.
Beta : modification de la demande, autonomie et sobriété	Rupture plus marquée qu'au scénario précédent : à la place de l'agriculture conventionnelle se développent à la fois la production intégrée et l'agriculture biologique, modification en profondeur des régimes alimentaires, réduction des exportations de 25 % par rapport au tendanciel.
Gamma : modification de la demande, stockage de carbone et efficacité	Deux différences significatives par rapport au scénario précédent : diminution des exportations de 50 % par rapport au tendanciel, stockage de carbone favorisé par l'afforestation des terres libérées par les modifications de l'assolement national.

males, augmentant l'efficacité de l'azote organique (de 65 % en 2010 à 90 % en 2050). Ceci signifie, pour les trois scénarios autres que le tendanciel, une diminution du recours à l'azote minéral.

La première étape du travail pour cette période, a consisté à attribuer un système de production à la date $t_0 = 2010$ à chaque site RMQS en terres cultivées, en fonction des informations rassemblées lors des enquêtes auprès des exploitants des parcelles échantillonnées. Deux variables renseignées lors de la collecte ont permis de réaliser la classification : la classification se base principalement sur le mode d'exploitation général de la parcelle, c'est-à-dire les contraintes réglementaires ou les cahiers des charges auxquels est soumise l'exploitation de la parcelle (informations signalées par l'exploitant). Nous avons considéré que lorsque le second champ, concernant le système de gestion de la parcelle (informations signalées par l'enquêteur), avait pour modalité « agriculture raisonnée », même si le mode général d'exploitation de la parcelle était l'agriculture conventionnelle, nous étions en présence de production intégrée. Les règles d'affectation en fonction des modalités de ces deux champs sont indiquées dans le *tableau 2*.

Après classification des sites RMQS en fonction des systèmes de production, la répartition est la suivante : 93 % de sites en agriculture conventionnelle, 2 % en agriculture biologique, 5 % en production intégrée.

A chaque système de production ont été associées des pratiques culturales, telles qu'elles sont mentionnées dans la nomenclature des lignes directrices du GIEC. Pour ce qui est de l'agriculture conventionnelle, les pratiques culturales appliquées sur les sites RMQS au cours de la première campagne constituent le point de départ des simulations. Les pratiques en agriculture conventionnelle étant en effet très diversifiées, nous n'avons pas pu en établir une typologie unique. Peu de sites étaient en agriculture biologique ou production intégrée au cours de la première campagne de prélèvement du réseau. Ainsi, il est difficile d'associer des pratiques culturales caractéristiques à ces systèmes de production sur la base des données RMQS. Les modalités des facteurs d'ajustement ont donc été fixées (*tableau 3*) suivant les hypothèses suivantes.

Les hypothèses liées à l'agriculture biologique reposent sur le cahier des charges de l'agriculture biologique (Journal Officiel de l'Union Européenne, 2007). Il indique que « la production végétale biologique a recours à des pratiques de travail du sol et des pratiques culturales qui préservent ou accroissent la matière organique du sol, améliorent la stabilité du sol et sa biodiversité, et empêchent son tassement et son érosion ». Ceci a été traduit en un labour réduit, qui a été affecté à la fois à l'agriculture biologique et à la production intégrée, puisque ces deux systèmes de production partagent les mêmes piliers, selon les hypothèses de l'étude « Agriculture et Facteur 4 ». Ce même cahier des charges indique que l'agriculture biologique se doit de

Tableau 2 - Règles d'affectation pour l'attribution des systèmes d'exploitation de l'étude « Agriculture et Facteur 4 » aux sites RMQS en fonction des modalités de deux variables de l'enquête réalisée sur les sites RMQS.

Table 2 - Assignment rules for the production systems attribution of the "Agriculture et Facteur 4" report to RMQS sites along the modalities of two variables from the survey carried out on the RMQS sites.

Modalité	Système de production attribué
Système conventionnel	Agriculture conventionnelle (ou production intégrée si le champ système d'exploitation général a pour modalité « agriculture raisonnée »)
Système extensif	Agriculture conventionnelle
Agriculture biologique	Agriculture biologique
Agriculture raisonnée	Production intégrée
Travail réduit du sol	Agriculture conventionnelle
Réduction d'intrants	Production intégrée
Absence d'information	Agriculture conventionnelle

Tableau 3 - Hypothèses sur les pratiques culturales en agriculture biologique et en production intégrée.

Table 3 - Hypothesis on cropping practices in organic farming and integrated production.

Système de production	Facteur gestion	Facteur intrants
Agriculture biologique	Labour réduit	Intrants élevés avec fumier
Production intégrée	Labour réduit	Intrants modérés

préservé, voire d'augmenter la fertilité et l'activité biologique du sol. Les moyens à disposition sont les rotations pluriannuelles des cultures et l'épandage de matières organiques. L'agriculture biologique interdit l'emploi d'engrais azotés, contrairement à la production intégrée. Ceci est compensé par l'utilisation de matière organique, qui apporte des nutriments aux cultures et du COS, alors que les fertilisants minéraux (employés en production intégrée) n'apportent pas de matière organique au sol. Nous considérons donc que le niveau d'intrants en agriculture biologique est plus élevé qu'en production intégrée.

Dans la pratique, l'hypothèse d'un travail du sol réduit en agriculture biologique est contestable. Même si le travail réduit permet l'amélioration de la fertilité du sol (Teasdale *et al.*, 2007), le labour reste le principal moyen de lutter contre le développement des adventices, l'emploi de phytosanitaires étant interdit (Peigné *et al.*, 2007). Il reste donc fréquent en agriculture biologique (information obtenue à dire d'experts). Il n'a pas été possible d'obtenir des chiffres précis sur la part des surfaces en labour en agriculture biologique.

Pour respecter le cahier des charges de l'agriculture biologique (et notamment l'objectif d'augmentation du taux de matière organique des sols), le niveau d'intrants de ce système de production se doit d'être le plus élevé possible.

Pour la période 2010-2030, les résultats présentés s'appuient sur l'hypothèse d'un labour réduit en agriculture biologique, sauf lorsque cela est précisé. Dans ce dernier cas, nous proposons une comparaison des simulations de l'évolution des stocks de COS moyens entre 2010 et 2030 sous l'hypothèse d'un labour complet et d'un labour réduit en agriculture biologique.

La dernière étape consiste à appliquer aux sites RMQS les scénarios d'évolution des systèmes de production (et donc de pratiques culturales). Chaque scénario se traduit par des répartitions entre ces modes de production différentes à l'horizon 2050 (tableau 4). Nous avons estimé l'évolution annuelle des proportions correspondant aux différents types d'agriculture sur la période 2010-2030 par interpolation linéaire entre les proportions données par l'étude « *Agriculture et Facteur 4* » en 2010 et en 2050.

Comme pour la période passée, une matrice de probabilités de conversion d'un type d'agriculture à un autre est créée. Nous avons fait l'hypothèse que les surfaces en agriculture conventionnelle diminuent, au profit des deux autres systèmes de production (tableau 2). Nous considérons que les seules conversions possibles pour les sites RMQS se font de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture biologique ou la production intégrée (et qu'il n'y a donc pas de retour possible vers l'agriculture conventionnelle). D'après des informations à dire d'expert, cette hypothèse ne se vérifie pas toujours. En l'absence de statistiques sur ces phénomènes, c'est cependant l'hypothèse la plus logique, puisque les surfaces en agriculture biologique et en production intégrée augmentent. Il n'est par contre pas possible de juger de l'impact de cette hypothèse (absence de conversion de l'agriculture biologique et de la production intégrée en agriculture conventionnelle) sur une éventuelle surestimation ou sous estimation des stocks de COS sans réaliser les simulations.

Puis, la matrice est appliquée aux sites RMQS. Les évolutions de pratiques culturales se font aléatoirement, pour que chaque année le pourcentage de sites RMQS des différents systèmes de production ou modalités de travail du sol corresponde aux données de la matrice. Cinquante répétitions des simulations sont réalisées. Il est à noter que nous ne faisons pas l'hypothèse d'un développement du semis direct en l'absence de statistiques fiables sur cette pratique.

Estimation des stocks de COS de référence sur chaque site

Le stock de COS de référence peut être déterminé, sur chaque site i , de la manière suivante, d'après l'équation (2) :

$$COS_{IST} = COS_i(t_0) / F_{iLU} \cdot F_{iMG}(t_0) \cdot F_{iI}(t_0) \quad (3)$$

Avec t_0 l'année de prélèvement. $F_{iMG}(t_0)$ et $F_{iI}(t_0)$ sont déterminés grâce aux enquêtes agronomiques réalisées sur les sites RMQS, et $COS_i(t_0)$ est le stock mesuré sur 30 cm à cette date.

Tableau 4 - Proportions des systèmes de production dans les scénarios de l'étude "Agriculture et Facteur 4" (actuel : 2010, scénarios : 2050).

Table 4 - Proportions of production systems in « *Agriculture et Facteur 4* » study scenarios (actual : 2010, scenarios : 2050).

	Agriculture conventionnelle	Agriculture biologique	Production intégrée
Actuel	97 %	2 %	1 %
Tendancier	60 %	20 %	20 %
Alpha	25 %	20 %	55 %
Beta	20 %	35 %	45 %
Gamma	25 %	30 %	45 %

Le facteur F_{ILU} , dépendant de la zone climatique et de l'occupation des terres, est déterminé grâce aux données météorologiques, pour chaque site, suivant la classification en zones climatiques du GIEC. Ce paramètre est supposé constant tout au long des simulations, puisque nous considérons une seule catégorie d'occupation : les terres cultivées.

La détermination de F_{ILU} est basée sur les données météorologiques de Météo France (maille SAFRAN). Les données utilisées sont : les précipitations (en mm/mois), la température (°C), l'évapotranspiration (en mm/mois). Ces informations sont des moyennes mensuelles sur la période 1993-2004.

Deux zones climatiques, telles que définies par le GIEC, sont retrouvées en France : la zone tempérée sèche, et la zone tempérée humide, qui se répartissent suivant la *figure 2*.

Application aux sites RMQS de séries temporelles d'évolution des pratiques culturales

Les séries temporelles d'évolution des pratiques culturales, déterminées pour les deux périodes d'étude pour chaque site RMQS, permettent de faire varier, chaque année, les facteurs d'ajustement $F_{IMG}(t)$ et $F_{il}(t)$. Ainsi, il est possible, avec les F_{ILU} et COS_{IST} déterminés et constants au cours du temps, de calculer chaque année un nouveau $COS_i(t)$ selon l'équation (1).

Pour les deux périodes d'étude, nous considérons que lorsque les pratiques culturales sont modifiées, le stock de COS met 20 ans à retrouver son équilibre. Cette durée est préconisée dans les lignes directrices du GIEC, comme l'indique l'équation (2).

Calcul de l'incertitude associée aux résultats

Les lignes directrices du GIEC proposent également une méthode de calcul pour déterminer l'incertitude qui est associée aux évolutions de stocks de COS. La méthode utilisée ici en est dérivée.

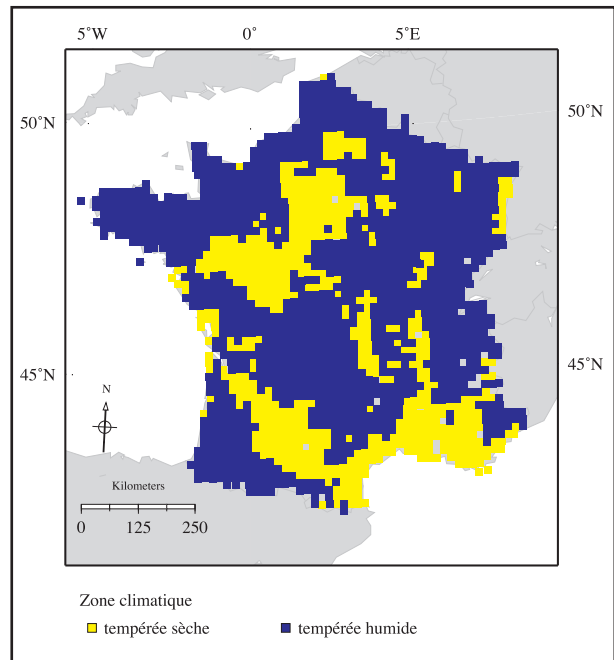
Pour pouvoir réaliser les calculs, il est normalement nécessaire de connaître l'incertitude qui pèse sur tous les paramètres rentrant en compte dans la détermination des stocks de COS. Nos calculs n'incluent pas les incertitudes pesant sur le calcul du stock de référence, ni sur les données des enquêtes Pratiques Culturales, ni sur les scénarios de l'étude « Agriculture et Facteur 4 », car ces dernières informations ne sont pas connues.

Les informations connues, qu'il faut combiner pour les calculs, sont donc les incertitudes sur les facteurs d'ajustements liés à la gestion et aux intrants, données dans les lignes directrices du GIEC (*tableau 5*)

La méthode GIEC pour la combinaison de quantités incertaines par multiplication utilise l'équation suivante :

Figure 2 - Sites RMQS selon la classification en zones climatiques du GIEC.

Figure 2 - RMQS sites according the IPCC climatic zones classification.



$$I_{totale} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (4)$$

I_{totale} : pourcentage d'incertitude du produit des quantités

I_i : pourcentage d'incertitude associé à chaque quantité

Pour combiner des incertitudes par addition et soustraction, c'est l'équation suivante qui est utilisée :

$$I_{totale} = \frac{\sqrt{(I_1 \times x_1)^2 + (I_2 \times x_2)^2 + \dots + (I_n \times x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|} \quad (5)$$

I_{totale} : pourcentage d'incertitude de la somme des quantités

x_i et I_i : quantités incertaines et leur pourcentage d'incertitude respectif

Pour notre étude, l'équation (4) devient, pour chaque site RMQS, chaque année, et pour chaque scénario :

$$I = \sqrt{I_{flu}^2 + I_{fmg}^2 + I_{fi}^2 + I_{cos}^2} \quad (6)$$

- I : incertitude sur l'évolution des stocks de COS, en pourcentage
 I_{flu} : incertitude sur le facteur utilisation des terres, en pourcentage
 I_{fmg} : incertitude sur le facteur gestion, en pourcentage
 I_{fi} : incertitude sur le facteur intrants, en pourcentage
 I_{cos} : incertitude sur le stock de COS en pourcentage, faisant intervenir l'estimation d'erreur de mesure de 11,2 % (Aldana-Jague, 2011)

L'équation (6) est ensuite utilisée pour combiner l'incertitude sur tous les sites.

$$I_{totale}(t) = \frac{\sqrt{(I_1(t) \times COS_1(t))^2 + (I_2(t) \times COS_2(t))^2 + \dots + (I_m(t) \times COS_m(t))^2}}{COS_1(t) + COS_2(t) + \dots + COS_m(t)} \quad (7)$$

$I_{totale}(t)$: incertitude associée à l'évolution du stock de COS moyen sur les sites RMQS, pour l'année t

$I_i(t)$: incertitude sur l'évolution du stock de COS du site i, i dans 1...m, pour l'année t

$COS_i(t)$: stock de COS du site i, pour l'année t

RÉSULTATS

Le stock de COS moyen en terres cultivées

Le stock de COS moyen des terres cultivées échantillonnées dans le cadre du RMQS est, pour la première campagne, de 52,8 tC/ha. Ce résultat est plus élevé que celui de Arrouays *et al.* (2002, 43 tC/ha en moyenne en France) et correspond à celui de Smith *et al.* (2011, 53 tC/ha en moyenne en Europe). La différence avec Arrouays *et al.* (2002) s'explique notamment par le fait que les analyses ne portent pas sur les mêmes jeux de données.

Les stocks de COS et pratiques culturales sur les sites RMQS

La figure 3 présente les stocks de COS de référence et les stocks de COS calculés lors de la première campagne

Tableau 5 - Incertitudes de la méthodologie de Tier 1 (sans objet signifie que les incertitudes se reflètent dans les stocks de COS de référence et les facteurs de variation des stocks pour l'affectation des terres).

Table 5 - Tier 1 methodology uncertainties (NA means that uncertainties are reflected in the reference SOC stocks and stock change factors for land use).

Facteur	Modalité	Zone climatique	Incertitude
FLU	Tempérée/boréale, sèche		±9 %
	Tempérée/boréale, humide		±12 %
FMG	Total	Toutes	NA
	Réduit	Tempérée/boréale, sèche	±6 %
		Tempérée/boréale, humide	±5 %
	Aucun	Tempérée/boréale, sèche	±5 %
Tempérée/boréale, humide		±4 %	
FI	Faibles	Tempérée/boréale, sèche	±13 %
		Tempérée/boréale, humide	±14 %
	Moyennes	Toutes	NA
	Élevées sans fumier	Tempérée/boréale, sèche	±13 %
		Tempérée/boréale, humide	±10 %
	Élevées avec fumier	Tempérée/boréale, sèche	±12 %
Tempérée/boréale, humide		±13 %	

du RMQS. Les deux cartes présentent une structure spatiale commune :

- le stock de COS moyen est plus élevé en Bretagne, Normandie et Bourgogne ;
- le stock moyen est plus faible dans le Sud ouest et dans un territoire qui s'étend de la Picardie aux Pays de la Loire.

Nous pouvons en conclure que le stock de COS observé sur les sites RMQS est dépendant du stock de COS de référence.

La *figure 4* montre la répartition spatiale des modalités de facteurs d'ajustement sur la gestion et les intrants lors de la première campagne du RMQS. Si aucune structure spatiale ne se dégage de la répartition de l'intensité du travail du sol sur le RMQS, ce n'est pas le cas pour le niveau d'intrants. En effet, les sites recevant une quantité modérée d'intrants sont retrouvés en Bretagne, Normandie, Picardie et Nord pas de Calais, alors que les niveaux faibles (cohabitant avec des niveaux élevés sans fumier) se retrouvent dans le Sud Ouest, en région parisienne et en Champagne-Ardenne.

En conclusion, si le stock de COS observé sur les sites RMQS ne dépend visiblement pas du travail du sol, il pourrait être relié avec le niveau d'intrants.

Validation des évolutions de pratiques culturelles et de systèmes de production simulées

Des séries temporelles d'évolution des pratiques culturelles ont été reconstituées à partir des enquêtes Pratiques Culturelles pour la période passée. Ceci a permis d'établir des matrices de probabilité de passage d'une pratique vers une autre, qui ont ensuite été appliquées aux sites RMQS. Pour la période 1990-2010, les surfaces simulées sont conformes à la série temporelle d'évolution du travail du sol, issue des enquêtes Pratiques Culturelles.

Pour les quatre scénarios, les simulations surestiment les surfaces en production intégrée d'environ 5 %, chaque année,

au détriment de l'agriculture conventionnelle. Ceci s'explique par la répartition initiale des sites RMQS selon les différents modes de production qui diffère de celle proposée dans l'étude facteur 4.

Evolution du stock de COS moyen entre 1990 et 2030

Pour la période 1990-2010, l'étude montre que l'évolution des pratiques en France a conduit à une augmentation du stock de COS moyen sur les sites RMQS en terres cultivées de 52,02 à 52,95 tC/ha, soit + 1,8 %, soit un stockage de 0,046 tC/ha/an. L'incertitude associée à ces résultats est limitée, du fait du nombre de répétitions : elle passe de 0,12 % en 1990 à 0,115 % en 2010.

Entre 2010 et 2030, quelque soit le scénario considéré, il est dans tous les cas constaté un stockage de carbone (*figure 5 et tableau 6*), compris entre 2,95 et 3,85 tC/ha suivant les scénarios. Ici encore, l'incertitude associée aux résultats est faible (*figure 5*).

La *figure 6* montre le stock de COS simulé sur les sites RMQS en 1990. On note une structure similaire aux stocks de COS en 2010, à savoir des stocks élevés en Bretagne, Normandie et Bourgogne.

La *figure 7* présente la répartition des systèmes de production sur le RMQS en 2010. Cette carte ne montre pas de structure spatiale particulièrement. Ceci vient principalement du fait qu'une large majorité de sites sont en agriculture conventionnelle (la répartition des sites en agriculture biologique et production intégrée ne suit pas de schéma particulier).

La *figure 8* montre le stockage moyen simulé sur les sites RMQS entre 2010 et 2030 pour le scénario le plus stockant (scénario beta) et le scénario le moins stockant (scénario tendanciel).

Deux remarques peuvent être faites :

- alors que nous nous attendions à un stockage de COS sur tous les sites RMQS, du fait des hypothèses prises sur l'évolu-

Tableau 6 - Evolution du stock de COS moyen des scénarios de l'étude « Agriculture et Facteur 4 ».

Table 6 - Evolution of mean SOC stock of "Agriculture et Facteur 4" study scenarios.

Scénario	Stock COS 2010 (tC/ha)	Stock COS 2030 (tC/ha) - Labour réduit en agriculture biologique	Stockage (tC/ha/an sur 20 ans) - Labour réduit en agriculture biologique	Stock COS 2030 (tC/ha) - Labour complet en agriculture biologique	Stockage (tC/ha/an sur 20 ans) - Labour complet en agriculture biologique
Tendanciel	52,02	55,90	0,15	55,70	0,14
Alpha		56,00	0,15	55,80	0,14
Beta		56,80	0,19	56,40	0,17
Gamma		56,60	0,18	56,30	0,17

Figure 3 - Carte des stocks de COS de référence (gauche) et des stocks de COS calculés en 2010 (droite) sur les terres cultivées RMQS.
Figure 3 - Maps of the reference C stocks (left) and calculated SOC stocks in 2010 (right) on the cropland of the French soil monitoring network.

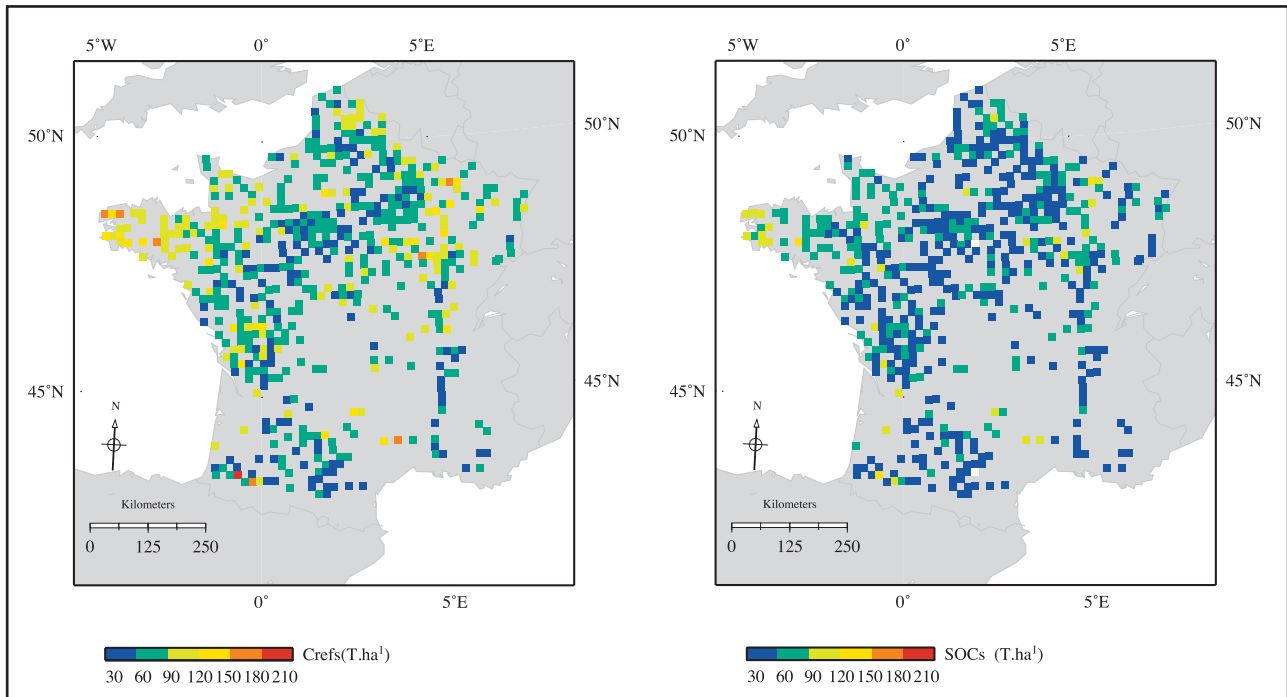


Figure 4 - Niveau de travail du sol (gauche) et d'intrants (droite) sur le RMQS (1^{re} campagne du réseau).
Figure 4 - Maps of tillage (left) and carbon inputs (right) levels on the French soil monitoring network (first sample campaign).

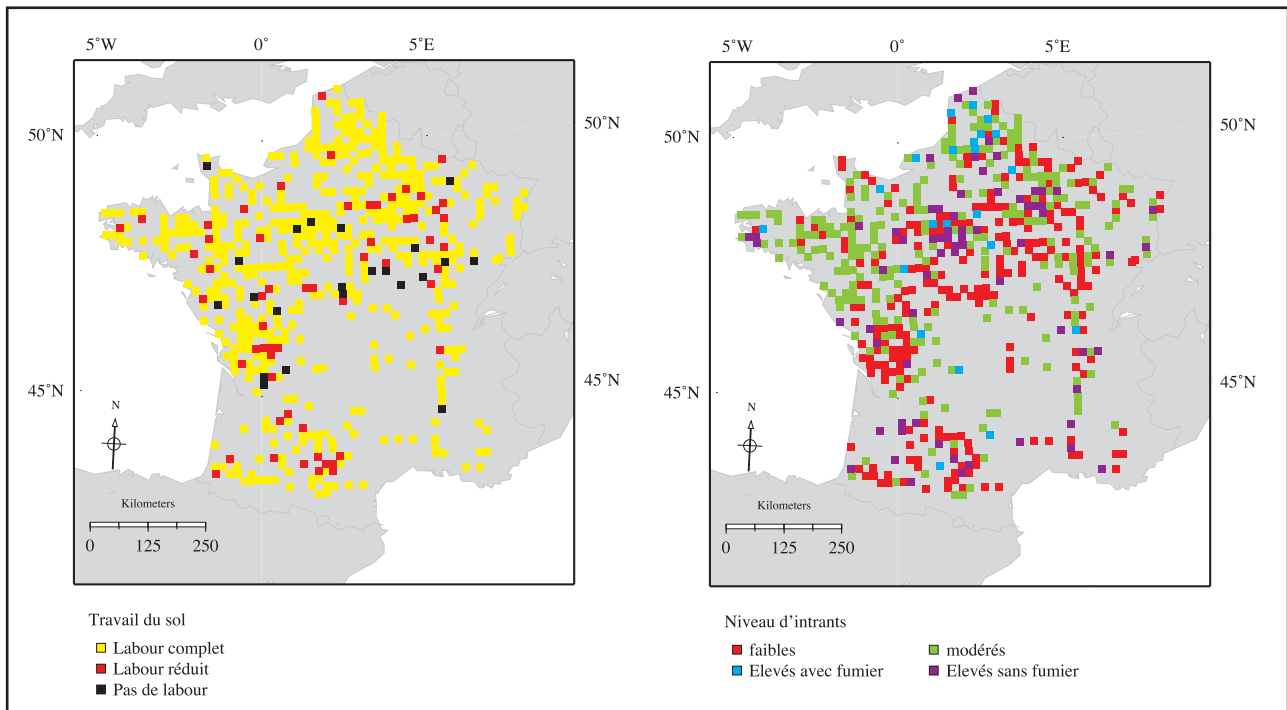


Figure 5 - Evolution du stockage de COS en France entre 1990 et 2030.

Figure 5 - SOC storage change in France between 1990 and 2030.

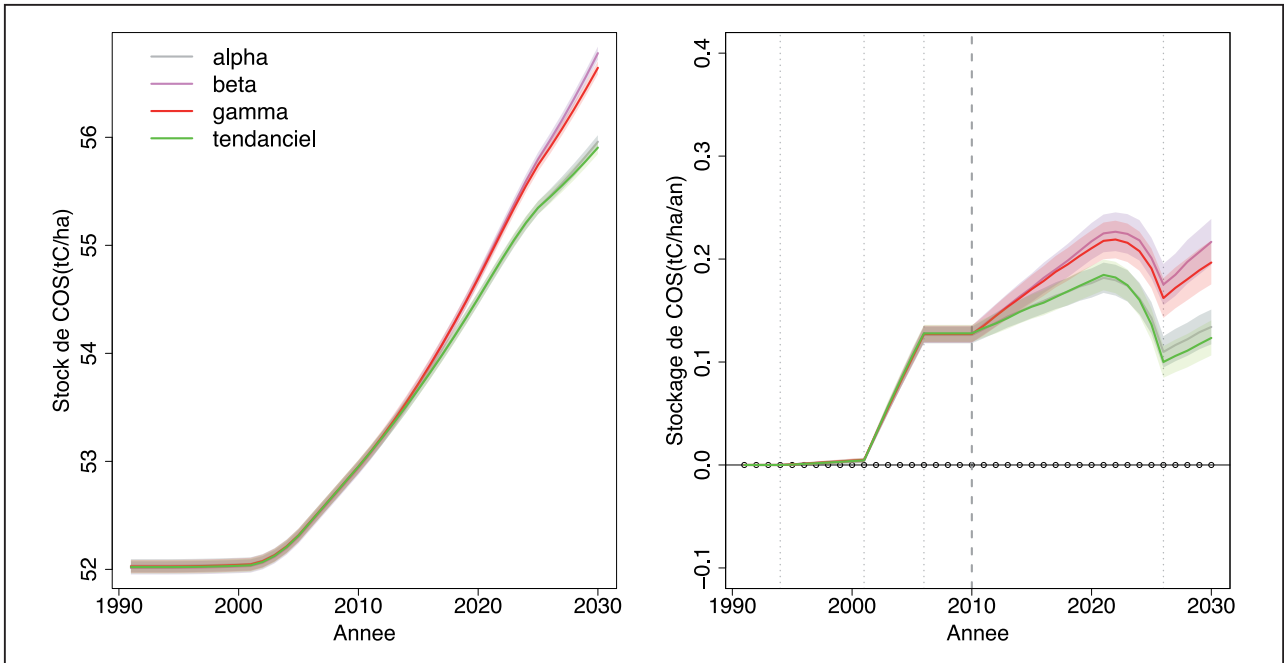


Figure 6 - Stock de COS sur le RMQS en 1990.

Figure 6 - SOC stocks on the French soil monitoring network in 1990.

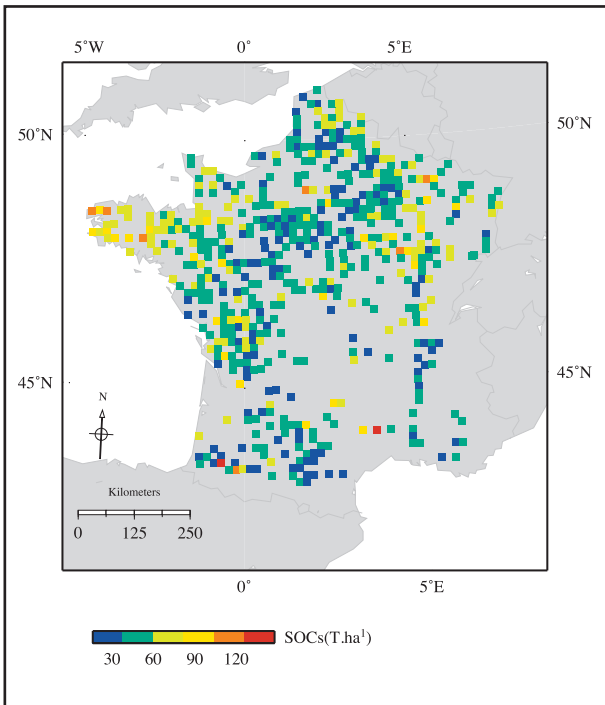


Figure 7 - Répartition des systèmes de production sur le RMQS en 2010.

Figure 7 - Distribution of production systems on the French soil monitoring network in 2010.

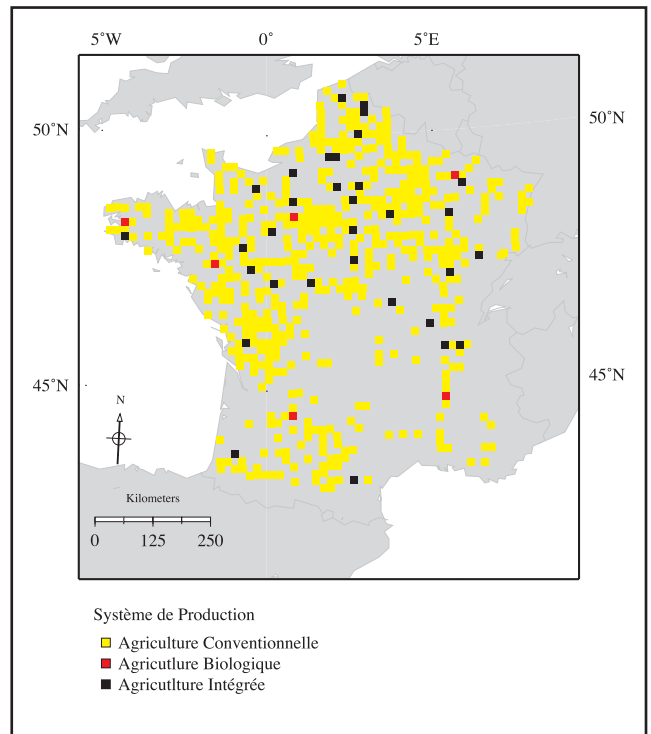
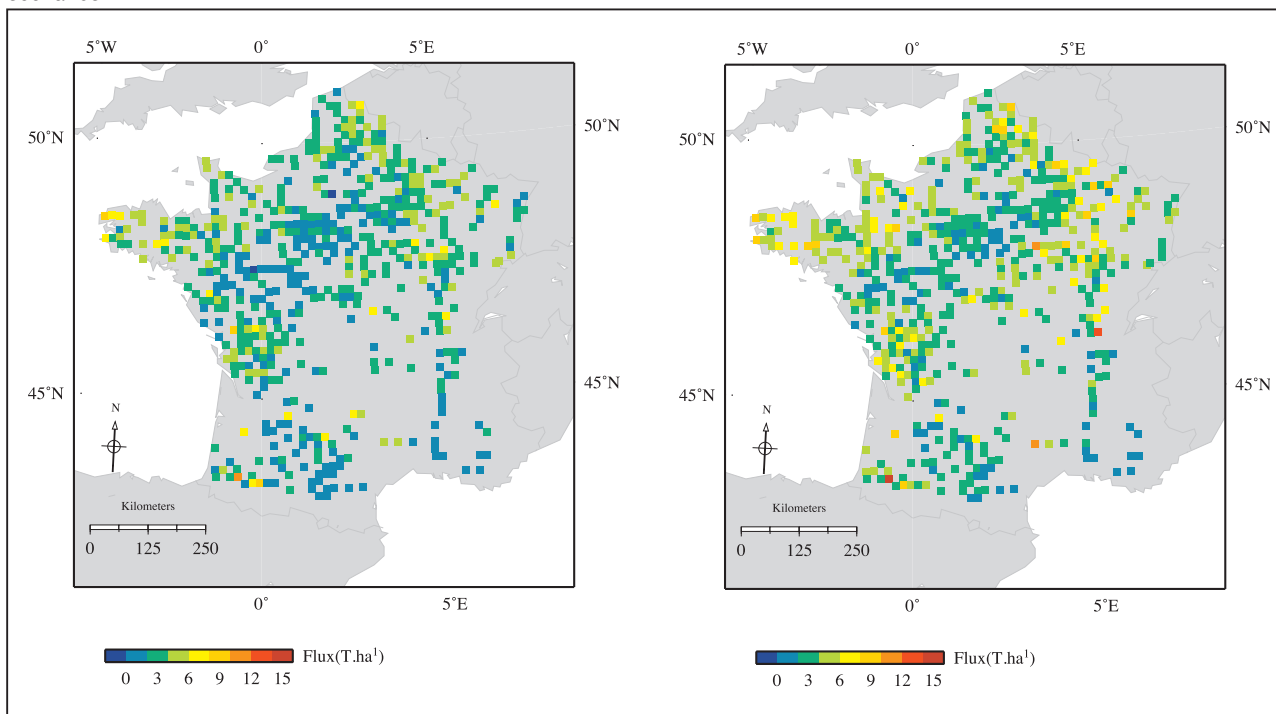


Figure 8 - Stockage de COS moyen sur les sites RMQS entre 2010 et 2030 pour le scénario tendanciel (gauche) et le scénario beta (droite).

Figure 8 - Mean SOC storage on the French soil monitoring network between 2010 and 2030 for the underlying (left) and beta (right) scenarios.



tion de l'agriculture, nous notons quelques sites qui destockent du COS. Ces sites sont ceux qui étaient en 2010 en agriculture conventionnelle, avec des pratiques plus stockantes que celles considérées en agriculture biologique ou production intégrée, et qui sont convertis en un de ces deux modes de production entre 2010 et 2030. Par exemple, un site pouvait recevoir une quantité d'intrants élevée avec fumier en agriculture conventionnelle et ne plus recevoir qu'une quantité modérée en production intégrée ;

- les structures spatiales de ces stocks de COS sont identiques à celles observées en 1990 et 2010. Nous en concluons que lorsqu'un site avait à la base un stock de COS élevé, le stockage de COS entre 2010 et 2030 est également élevé.

Comparaison des deux hypothèses de travail du sol en agriculture biologique

Le stock de COS moyen en 2030 est entre 0,2 et 0,4 tC/ha plus faible si un labour complet est considéré en agriculture biologique au lieu d'un labour réduit. Les conclusions générales restent cependant identiques, sur l'augmentation des stocks et l'importance de l'incertitude.

Potentiel de stockage des systèmes de production

En 2010, le stock de COS moyen des sites RMQS en agriculture conventionnelle est de 52,9 tC/ha. Une conversion de l'ensemble des sites RMQS en agriculture biologique entre 2010 et 2030, sous l'hypothèse des pratiques culturales considérées pour ce système de production (labour réduit et intrants élevés avec fumier), résulterait en un stock de COS moyen en 2030 de 66,6 tC/ha. Ceci correspond à un potentiel de stockage de + 0,68 tC/ha/an entre 2010 et 2030, par rapport à l'agriculture conventionnelle.

Une conversion de l'ensemble des sites RMQS en production intégrée entre 2010 et 2030, toujours sous l'hypothèse des pratiques culturales considérées (labour réduit et intrants modérés) résulterait en un stock de COS moyen de 55,2 tC/ha, soit un potentiel de stockage de 0,11 tC/ha/an par rapport à l'agriculture conventionnelle, entre 2010 et 2030.

DISCUSSION

L'évolution du stock de COS entre 1990 et 2010

Notre étude conclut à une augmentation du stock de COS moyen de 0,92 tC/ha (passant de 52,02 à 52,95 tC/ha, soit + 1,8 %) sur les terres cultivées des sites RMQS entre 1990 et 2010. Ces chiffres sont cohérents avec ceux de Ciais *et al.* (2010) qui, entre 1990 et 2000, estiment une augmentation des stocks entre 0 et 5,2 % dans les sols français en terres cultivées. Leur étude considère différentes reconstitutions d'évolutions de pratiques culturales correspondant à différents niveaux d'intrants et de travail du sol.

Notons que ces évolutions simulées ne sont pas confirmées par les données de la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT). La médiane des teneurs en carbone, pour les quatre périodes où ont été réalisées les analyses de terre, est :

- 1990-1994 : 15,11 g/kg,
- 1995-1999 : 14,53 g/kg,
- 2000-2004 : 13,92 g/kg,
- 2005-2009 : 15,12 g/kg.

La médiane de la teneur en carbone diminue ici entre les périodes 1990-1994 et 2000-2004 (- 1,19 g/kg, soit -7,9 %), puis augmente entre 2000-2004 et 2005-2009 (+ 1,20 g/kg soit +8,6 %).

L'évolution du stock de COS entre 2010 et 2030

L'étude « Agriculture et Facteur 4 » propose quatre scénarios d'évolution de l'agriculture, dont les ruptures avec la situation actuelles sont plus ou moins marquées. Ces scénarios sont composés d'un mélange de trois systèmes de production : l'agriculture conventionnelle, l'agriculture biologique et la production intégrée.

Les scénarios les plus stockants sont, dans l'ordre : le scénario tendanciel, le scénario alpha, le scénario gamma et le scénario beta (avec un stockage compris entre 2,9 et 3,6 tC/ha en 20 ans), le scénario alpha étant très proche du scénario tendanciel, et le scénario beta très proche du scénario gamma. On note ainsi que même le scénario tendanciel, le plus pessimiste, aboutit à un stockage de COS.

Ceci est cohérent avec les hypothèses prises sur les pratiques culturales des systèmes de production.

Le stockage annuel correspondant pour les quatre scénarios, sur 20 ans, est donc compris entre 0,14 et 0,19 tC/ha/an. A titre de comparaison, Arrouays *et al.* (2002) donnent les potentiels de stockage sur 20 ans de quelques pratiques culturales que nous avons considérées :

- réduction du travail du sol : + 0,24 tC/ha/an
- présence d'engrais verts : + 0,16 tC/ha/an
- exportation des résidus de culture : - 0,16 tC/ha/an (par rapport à un enfouissement)

Le potentiel de stockage des quatre scénarios est finalement comparable aux chiffres donnés pour chaque pratique par Arrouays *et al.* (2002).

L'incertitude associée aux stocks moyens est négligeable : elle est de 0,12 % en 1990 et de 0,115 % en 2010. Ce chiffre peut être comparé à l'incertitude liée aux estimations des changements totaux de stock de carbone pour les terres cultivées (croplands) aux Etats-Unis. Cette incertitude est de 59 % pour le Tier 1 (Del Grosso *et al.*, 2011). L'incertitude sur le stock moyen est donc ici nettement inférieure, mais le manque de détail dans la publication de Del Grosso *et al.*, 2011 n'a pas permis d'explicitier le mode d'estimation de cette incertitude. Notons néanmoins que selon les formules du calcul de l'incertitude (somme et multiplication), celle-ci diminue avec le nombre de répétitions réalisées. Nous avons réalisé ici un nombre $N_r = 50$ de répétitions afin de moyenniser l'effet des tirages aléatoires de changement de pratiques. Ce nombre N_r intervient dans le calcul de l'incertitude, et en l'état actuel du code de calcul, il diminue ainsi artificiellement l'incertitude qui, elle, porte principalement sur les observations de stocks de carbone et les valeurs associées aux facteurs d'émission. Les valeurs d'incertitude produites ici sont donc artificiellement basses, et dans le futur, il conviendrait de remplacer ce calcul analytique, délicat lorsqu'il s'agit de prendre en compte les corrélations entre les différents termes des calculs d'incertitude, par un traitement de type Monte-Carlo, lui aussi préconisé dans les lignes directrices : pour chacune des répétitions, les valeurs des facteurs d'émissions correspondant aux pratiques sur un site donné seraient fixées par tirage aléatoire en début de simulation, et constantes dans le temps, afin de représenter l'incertitude quant à la valeur du facteur d'émission pour le site en question. Les valeurs d'incertitude globales seraient calculées par analyse *a posteriori* des distributions de stocks de carbone simulés pour une année donnée.

Le potentiel de stockage des systèmes de production

Sous les hypothèses formulées concernant les pratiques culturales associées aux trois systèmes de production, notre étude démontre un potentiel de stockage de +0,684 tC/ha/an sur 20 ans de l'agriculture biologique par rapport à l'agriculture conventionnelle (la plupart des sites, en 2010, ont un système de production de type conventionnel), lorsque les pratiques liées à l'agriculture sont traduites en termes de facteurs d'émissions. Le potentiel de stockage de la production intégrée est de 0,11 tC/ha/an sur 20 ans.

Ce chiffre est cohérent avec ceux rencontrés dans la littérature. Freibauer *et al.* (2004) proposent une revue européenne des pratiques permettant de stocker du carbone dans les sols, où le potentiel de stockage de carbone de l'agriculture biologique est estimé entre 0 et 0,5 tC/ha/an, à partir de deux

études basées sur de la modélisation (Smith 2000a, Smith 2000b in Freibauer *et al.*, 2004). Gattinger *et al.* (2012) ont exploité des jeux de données issus de 74 études pour déterminer un potentiel de stockage de l'agriculture biologique de 0,45 tC/ha/an, par rapport à l'agriculture conventionnelle.

Les données nécessaires pour préciser les séries temporelles d'évolution des pratiques culturales sur les périodes passées

Les enquêtes Pratiques Culturales ont été réalisées en 1994, 2001 et 2006. L'évolution du travail du sol entre 1990 et 2010 a été reconstituée à partir de ces données. Pour cela, plusieurs hypothèses ont été posées, pour construire une variation entre deux années d'enquêtes, mais aussi pour les extrapoler entre 1990 et 1994 et entre 2006 et 2010 :

- 1990-1994 : Stabilité des pratiques au niveau de 1994,
- 1994-2001 : Evolution linéaire,
- 2001-2006 : Evolution linéaire,
- 2006-2010 : Stabilité des pratiques au niveau de 2006.

Une collecte de données, en passant par exemple par le dire d'experts, permettrait de compléter ces informations, pour préciser les hypothèses qui ont été formulées. Il serait possible de contacter (par le biais d'un questionnaire ou d'entretiens téléphoniques) les conseillers des Chambres Régionales ou Départementales d'Agriculture, dont les conseillers ont une excellente connaissance de l'évolution de l'agriculture du territoire sur lequel ils travaillent.

La récolte d'informations croisées sur les surfaces concernées par la combinaison des modalités de travail du sol et de quantité d'intrants permettrait de prendre en compte ce dernier facteur, ce qui n'a pas été possible jusqu'à maintenant.

L'utilisation des scénarios de l'étude « Agriculture et Facteur 4 »

L'objectif de cette étude n'étant pas d'établir des scénarios d'évolution des pratiques culturales, le choix a été fait de se reporter sur un travail existant le proposant. A ce jour, nous n'avons pas trouvé de scénarios qui représentent explicitement les pratiques, mais avons dérivé nos séries temporelles des scénarios de l'étude « Agriculture et Facteur 4 ».

Les scénarios de l'étude sont volontairement optimistes, puisque l'objectif de ce travail est de définir comment diviser par quatre les émissions de GES en agriculture et en sylviculture et une définition de scénarios plus réalistes permettrait de mieux juger de l'évolution future des stocks de COS.

Une piste pour la définition de tels scénarios est la récolte d'informations à dire d'experts, notamment auprès des Chambres Régionales d'Agriculture (un travail à une échelle régionale serait une bonne avancée pour notre étude. Il n'est pas certain que l'on puisse obtenir des données à une échelle

inférieure), ou encore des instituts techniques ou d'autres unités de l'INRA travaillant sur ce sujet. Il serait aussi possible de prendre en compte des contraintes régionales rationnelles, telles que le type de sol, le type de production, les ressources organiques disponibles... pour définir des scénarios d'évolution des pratiques culturales.

De plus, nous avons dû poser des hypothèses sur les pratiques culturales des trois systèmes de production pour construire les scénarios d'évolution dans le futur. Les hypothèses prises (labour réduit et intrants élevés avec fumier en agriculture biologique, labour réduit et intrants modérés en production intégrée) sont contestables, puisqu'elles ne sont pas forcément justes d'un point de vue agronomique. De plus, certaines parcelles en agriculture conventionnelle ont, en 2010, des pratiques culturales plus stockantes que celles considérées pour l'agriculture biologique et la production intégrée. Lorsque ces sites en agriculture conventionnelle sont convertis en agriculture biologique ou production intégrée entre 2010 et 2030, cela aboutit à un déstockage de COS.

Extrapolation des résultats à la France

L'étude est basée sur l'application de séries temporelles d'évolution des pratiques culturales aux sites du RMQS. L'extrapolation des résultats aux terres cultivées du territoire impliquerait la vérification de la représentativité du réseau en termes agronomiques (systèmes de production et modes de gestion), pédologiques et climatiques.

Un certain nombre d'études tendent à confirmer cette hypothèse, au moins pour les aspects occupation du sol, pédologie et climat. Par exemple, Arrouays *et al.* (2001) ont démontré que la grille de 16 km² offrait le meilleur compromis entre la représentation géographique et le coût engendré par la mise en place du réseau. Les éléments suivants ont été démontrés :

- Occurrence sol x occupation : plus de 97,5 % des occurrences couvertes

- Situations locales : absence de prise en compte de la totalité des situations locales, sans remettre en cause la représentativité du réseau

- Type de sol sur le point d'échantillonnage par rapport au sol dominant de la cellule : quelques cellules hétérogènes, qui nécessiteraient une diversification du réseau

- Petites régions agricoles : nécessité de densifier le réseau pour caractériser la totalité des petites régions agricoles.

Voisin *et al.* (2012) ont montré que le RMQS était représentatif de l'occupation des sols en France. Ceci a été prouvé en comparant les données de l'occupation des sols du RMQS et celles de Corine Land Cover.

Pour compléter ces conclusions, il faudrait donc étudier la représentativité du RMQS en termes de système de production et de pratiques culturales. Pour cela, une comparaison des données des enquêtes réalisées auprès des exploitants des

parcelles sur lesquelles sont situés les sites de prélèvement avec les données des enquêtes Pratiques Culturelles doit être entreprise (Gourrat, 2012).

Sous l'hypothèse que le RMQS soit représentatif des sols français, l'équation (7) permet de convertir l'évolution des stocks de COS en flux de CO₂.

$$\Delta CO_2 = \frac{(COS_{fin} - COS_{ini}) \times S}{t} \times \frac{44}{12}$$

équation (8)

- ΔCO₂ : flux de CO₂ annuel sur la période d'étude (teq CO₂/an)
- COS_{fin} : stock de COS en fin de période (tC/ha)
- COS_{ini} : stock de COS en début de période (tC/ha)
- S : surface en terres arables cultivées (ha). Nous considérons que les sites RMQS sont représentatifs des cultures en terres arables et fixons donc ce paramètre à la valeur des surfaces en terres arables cultivées en France en 2010, soit 18,3 Mha (source <http://agriculture.gouv.fr/alim-agri-Chiffres-cles-2012>). Nous faisons l'hypothèse que la surface en terres cultivées n'évolue donc pas sur toute la durée de l'étude.
- t : durée de la période d'étude (années)
- 44/12 : facteur de conversion entre le carbone et le CO₂
- Période 1990-2010

Le flux de CO₂ sur la période est déterminé, en considérant les valeurs suivantes : COS_{fin} = 52,9 tC/ha, COS_{ini} = 52,0 tC/ha, S = 18,3 Mha, t = 20 ans. La variation des stocks de COS entre 1990 et 2010 correspond à un stockage de 3 095 kteq CO₂ par an.

A titre de comparaison, le secteur agricole a émis en France (CITEPA, 2012) :

- 104 562 kteq CO₂ en 1990,
- 94 355 kteq CO₂ en 2010.

Le secteur de l'UTCF a, quant à lui, permis de stocker (CITEPA, 2012) :

- 22 372 kteq CO₂ en 1990,
- 35 494 kteq CO₂ en 2010,
- Période 2010-2030.

L'évolution du stock de COS moyen pour les quatre scénarios entre 2010 et 2030 conduit aux flux suivants : Tendanciel = 9 918 kteqCO₂/an sur 20 ans, Alpha = 10 102 kteqCO₂/an sur 20 ans, Beta = 12 852 kteqCO₂/an sur 20 ans, Gamma = 12 398 kteqCO₂/an sur 20 ans.

Bilan : l'application de la méthode de Tier 1 aux terres cultivées françaises

Cette étude a permis de montrer que la méthodologie de Tier 1 des lignes directrices du GIEC pour la quantification de l'impact des pratiques culturelles sur la variation des stocks de COS des terres cultivées françaises n'est applicable que partiellement sur

la période historique, en l'état actuel des choses. Ceci vient principalement du fait qu'il existe seulement des informations ponctuelles (trois années) sur l'évolution des modes de gestion (travail x intrants). Il convient de poursuivre le travail pour compléter ces données, à deux fins : le reporting, qui se rapporte à l'évolution des pratiques culturelles dans le passé, et la prospective qui concerne l'évolution des modes de gestion dans le futur.

Les méthodes de Tier 2 ou 3 devraient permettre de mieux intégrer le contexte local dans l'estimation des flux liés aux changements de pratiques culturelles. Cependant, pour appliquer ces méthodes, des données complémentaires issues d'expérimentations seraient indispensables, pour dériver des facteurs d'ajustement nationaux pour le Tier 2, et pour alimenter les modèles en Tier 3. De nombreux essais de longues durées sont en cours ou terminés dans la zone climatique tempérée (Smith, 2012). Des travaux complémentaires sont nécessaires pour envisager l'application de ces données au cas français. Les informations qui seront issues de la deuxième campagne du RMQS permettront, par exemple, de vérifier l'évolution des stocks de COS en France.

CONCLUSION

L'application d'une méthodologie de Tier 1 des lignes directrices du GIEC a montré que l'évolution des pratiques en France aurait permis un gain dans les sols des terres cultivées de 0,92 tC/ha, entre 1990 et 2010, soit un stockage d'environ 3 095 kteq CO₂ par an sur cette période, sous l'hypothèse de représentativité des sites RMQS.

Entre 2010 et 2030, les quatre scénarios d'évolution de l'agriculture de l'étude « Agriculture et Facteur 4 » conduisent à une hausse des stocks de COS, comprise entre 2,95 et 3,85 tC/ha. Ceci provient de la baisse des surfaces en agriculture conventionnelle, au profit de l'agriculture biologique et de la production intégrée (ces deux modes de production se fondant sur des pratiques culturelles permettant un stockage de carbone plus important). Quel que soit le scénario considéré, la hausse de COS est plus marquée en région climatique tempérée humide qu'en région tempérée sèche, les stocks de COS moyens initiaux étant également plus élevés dans cette première zone climatique.

Les perspectives de nos travaux reposent sur l'établissement de scénarios d'évolution de modes de gestion plus réalistes, ceux de l'étude « Agriculture et Facteur 4 » étant volontairement optimistes, et la révision des hypothèses prises sur les pratiques culturelles en agriculture biologique et production intégrée, et sur l'amélioration du traitement de l'incertitude. Enfin, une application possible du travail présenté ici serait la mise en relation de l'impact des pratiques sur le stockage de carbone avec l'impact de ces mêmes changements sur les quantités d'aliments produites.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'ADEME, qui a financé cette étude, ainsi qu'aux organismes impliqués dans le comité de pilotage : APCA, Ministère en charge de l'agriculture, Ministère en charge de l'environnement, le CITEPA, Arvalis, l'INRA, Agrotransfert (Convention n° 0975C00746).

BIBLIOGRAPHIE

- Aldana Jague E., 2011 - Estimation des sources de variabilité du stock de carbone dans les sols du RMQS. Rapport de stage pour l'obtention de la 1^{re} année de Master Sciences de la Terre, de l'Eau et de l'Environnement - Ingénierie des Hydrosystèmes et des Bassins Versants - Parcours Bassin Versant-Transferts. Université François Rabelais de Tours. 23 p.
- AGRESTE, 2009 - Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - Agreste - La statistique, l'évaluation et la prospective agricoles - *Pratiques Culturelles*. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-culturelles/>
Consulté le 15 avril 2013.
- Arrouays D., Thorette J., Daroussin J., King D., 2001 (a) - Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 8, 1, pp. 7-17.
- Arrouays D., Deslais W., Bateau V., 2001 (b) - The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. *Soil Use and Management*, 17, pp. 7-11.
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P., 2002 - Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Rapport d'expertise INRA, 320p.
- Arvalis, 2007 - Evaluation des impacts environnementaux des techniques culturales sans labour en France - Partie 2 : Synthèse des impacts environnementaux des TCSL par milieu. Rapport pour le compte de l'ADEME. 58pp.
- Bernoux M., Chenu C., Blanchart E., Eglin T., Bispo A., Bardy M., King D., 2011 - Le programme GESSOL 2 : Impact des pratiques agricoles sur les matières organiques et les fonctions des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 18, 3, 137-145.
- Ciais P., Gervois S., Vuichard N., Piao S.L., Viovy N., 2011 - Effects of land use change and management on the European cropland carbon balance. *Global Change Biology*, 17, pp. 320-338.
- Commission Européenne, 2012 - Décision du Parlement européen et du conseil relative aux règles comptables et aux plans d'action concernant les émissions et les absorptions de gaz à effet de serre résultant des activités liées à l'utilisation des terres, au changement d'affectation des terres et à la foresterie. COM (2012) 93 final.
- Del Grosso S.J., Ogle S.M., Parton W.J., 2011 - Soil Organic Matter Cycling and Greenhouse gas Accounting Methodologies. In : Lei Guo, Amrith S. Gunasekara and Laura L. McConnell, Eds, Understanding Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Management. Chapter 17, pp. 331-341.
- Freibauer A., Rounsevell M.D.A., Smith P., Verhagen J., 2004 - Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 122, pp. 1-23.
- Gattinger A., Muller A., Haeni M., Skinner C., Fliessbach A., Buchmann N., Mäder P., Stolze M., Smith P., El-Hage Scialabba N., Niggli U., 2012 - Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *PNAS*, 109, 44, pp. 18 226-18 231.
- Gourrat M. ; 2012. Valorisation des enquêtes agronomiques du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols. Etude Infosol. 53 pp.
- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 2006 - Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres.
- Hutchinson J.J., Campbell C.A., Desjardins R.L., 2007 - Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142, pp. 288-302.
- Janssens I.A., Freibauer A., Ciais P., Nabuurs G.J., Folberth G., Schlamadinger B., Hutjes R.W.A., Ceulemans R., Schulze E.D., Valentini R., Dolman A.J., 2003 - Europe's Terrestrial Biosphere Absorbs 7 to 12 % of European Anthropogenic CO₂ Emissions. *Science*, 300, 5625, pp. 1538-1542.
- Journal Officiel de l'Union Européenne, 2007 - Règlement (CE) n° 834/2007 du conseil du 28 juin 2007 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques et abrogeant le règlement (CEE) n° 2092/91.
- Lal R., Follett R.F., Stewart B.A., Kimble J.K., 2007 - Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Science*, 172, 12, pp. 943-956.
- Martin M.P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Boulonne L., Arrouays D., 2011 - Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences*, 8, pp. 1053-1065.
- Meersmans J., Martin M., Lacarce E., De Baets S., Jolivet C., Boulonne L., Lehmann S., Saby N., Bispo A., Arrouays D., 2012 - A high resolution map of French soil organic carbon. *Agronomy for sustainable development*, 32, 4, pp. 841-851.
- Organisation et Méthodes des Inventaires Nationaux des Emissions Atmosphériques de France (OMINEA) ; 2013. Rapport national d'inventaire - 10^e édition. 1 309 pp.
- Peigné J., Ball B.C., Roger-Estrade J., David C., 2007 - Is conservation tillage suitable for organic farming ? A review. *Soil Use and Management*, 23, 2, pp. 129-144.
- Saby N., Bellamy P.H., Morvan X., Arrouays D., Jones R.J.A., Verheijen F.G.A., Kibblewhite M.G., Verdoot A., Berenyi Uveges J., Freudenstschu A., Simota C., 2008 - Will European soil-monitoring networks be able to detect changes in topsoil organic carbon content ? *Global Change Biology*, 14, 10, pp. 2432-2442.
- Smith P., Smith J.U., Powlson D.S., 2001 - Soil Organic Matter Network (SOM-NET) : 2001 Model and Experimental Metadata. GCTE Report 7, Seconde Edition, GCTE Focus 3, Wallingford, Oxon, 223 p.
- Smith P., Davies C.A., Ogle S., Zanchi G., Bellarby J., Bird N., Boddey R.M., McNamara N.P., Powlson D., Cowie A., Van Noordwijk M., Davis S.C., de B. Richter D., Kryzanowski L., VanWijk M., Stuart J., Kirton A., Eggar D., Newton-Cross G., Adhya T.K., Braimoh A.K., 2012 - Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon : current capability and future vision. *Global Change Biology*, 18, pp. 2089-2101.
- Teasdale J.R., Coffman C.B., Mangu R.W., 2007 - Potential long-term benefits of no-tillage and organic cropping systems for grain production and soil improvement. *Agronomy Journal*, 99, pp. 1297-1305.
- Vidalenc E., 2012 - Agriculture et Facteur 4. Synthèse de l'étude.
- Vleeshouwers L.M., Verhagen A., 2002 - Carbon emission and sequestration by agricultural land use : a model study for Europe. *Global Change Biology*, 8, pp. 51-530.
- Voisin E., Boulonne L., Jolivet C., Ratié C., Arrouays D., 2012 - Analysis of the representativeness of land use in France by the french soil monitoring network. Poster. Eurosoil 2012 (Bari, Italie, 02-06 juillet).

