

Projet AMG : Développement d'outils d'aide à la décision pour gérer le stock de carbone organique des sols cultivés

- adaptation et mise en œuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage -

Alain Bouthier (a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr), Nathalie Damay (ndamay@cg02.fr), Pascal Denoroy (denoroy@bordeaux.inra.fr), Annie Duparque (a.duparque@agro-transfert-rt.org), Sabine Houot (sabine.houot@grignon.inra.fr), Bruno Mary (mary@laon.inra.fr).

Introduction

Le projet AMG est un projet CASDAR des instituts techniques agricoles, qui associe ARVALIS-Institut du Végétal (pilote), AGRO-TRANSFERT RESSOURCES ET TERRITOIRES, INRA US1158 AGRO-IMPACT, UMR TCEM Bordeaux, INRA EGC Grignon, LDAR (laboratoire départemental d'analyses et de Recherche de l'Aisne). Il a démarré le 1^{er} octobre 2009 pour une durée de 3 ans.

1. Etat des connaissances et contexte du projet

L'évolution des teneurs en matières organiques dans les sols cultivés préoccupe les agriculteurs et les professionnels agricoles depuis plusieurs années et des travaux ont été conduits dans plusieurs régions françaises pour faire le point sur cette question. Des baisses des teneurs des sols en matière organique sont constatées dans plusieurs de ces études (Walter et al, 1995, Balesdent, 1996). Wylleman et al (2001) dépeignent pour leur part une situation nuancée en Picardie, où les stocks de C organique des sols apparaissent stables dans près de 50 % des cas sur la durée de la période étudiée, mais où également, dans près de 30 % des cas, les stocks en baisse attirent l'attention.

Or, les variations dans le temps du statut organique d'un sol sont lentes. Elles ne sont détectables que sur de longues durées. Il est donc impossible à un agriculteur de vérifier par lui-même facilement l'effet de ses pratiques culturales sur le stock de carbone de ses sols pour les ajuster. Seule la modélisation de ces effets permet de les prévoir. Le premier modèle de calcul de bilan humique à long terme a été produit en 1945 (Hénin et Dupuis, 1945) pour vérifier l'effet des modifications des systèmes de culture (abandon de l'élevage, mécanisation) sur le stock de matières organiques des sols. Ce modèle, à un seul compartiment de Carbone organique du sol et deux paramètres (k_1 : coefficient isohumique et k_2 : coefficient de minéralisation annuelle) est simple à mettre en œuvre à partir d'informations classiques connues sur une exploitation agricole. Depuis, de nombreux modèles de simulation de la dynamique du carbone organique du sol ont été créés (Century, Parton et al, 1987 ; Daisy, Hansen et al, 1991 ; Roth-C, Coleman and Jenkinson, 1996) mais, plus complexes, ils restent dédiés à des activités de recherche. En 1999, Andriulo et al ont mis au point le modèle AMG, qui reprend le principe du modèle Hénin-

Dupuis. Tout en restant très simple d'utilisation, il en améliore néanmoins les performances en introduisant une partition du carbone organique du sol en carbone actif et carbone stable. Le modèle AMG a été paramétré par ajustement des données simulées aux résultats d'évolution des stocks de C dans les sols en fonction des mesures de flux de carbone réalisées sur l'essai de longue durée d'Arvalis à Boigneville (91) puis il a été testé sur une sélection de parcelles de la base de données d'analyses de terre du LDAR (Wylleman, 1999). Plus récemment, le paramétrage du modèle a été affiné dans le cadre du projet CARTOPAILLES sur les données de neuf essais de longue durée (dont Boigneville) répertoriés sous des latitudes et sur des types de sol variés et où une gestion différenciée des pailles était pratiquée (Saffih-Hdadi et Mary, 2008). En parallèle, le travail entrepris dans le cadre du projet Gestion de l'état organique des sols, GCEOS, d'Agro-Transfert (Duparque et al, 2007) a également permis d'aménager le paramétrage et le fonctionnement du modèle.

Les travaux récents et en cours de l'INRA sur l'effet de l'implantation de couverts intermédiaires sur le bilan du carbone et de l'azote dans le sol à long terme (Constantin et al, 2009 ; Constantin, 2010), sur l'effet de couverts prairiaux (F. Vertes, INRA de Quimper) sur le statut organique des sols, sur la valeur agronomique « Carbone » des produits résiduels organiques épandus en terres agricoles (Indice de stabilité des MO, ISMO : Lashermes et al, 2007 ; 2009) constituent dès à présent des références nouvelles, sources de progrès pour la connaissance des processus de transformation des MO dans le sol et pour l'amélioration des performances des modèles, notamment d'AMG.

Au service de cet objectif aussi, Arvalis Institut du végétal en partenariat avec l'INRA assure la mise en place et le maintien de dispositifs expérimentaux de longue ou très longue durée dont une partie des résultats sert au paramétrage de modèles décrivant l'évolution du carbone et de l'azote dans les sols cultivés. Le site de Boigneville est en particulier maintenu pour répondre à ces problématiques depuis 1970. Des programmes d'analyses lourds sont également pris en charge ainsi que le cofinancement de thèses. L'institut conduit en outre plusieurs expérimentations de longue durée et de suivis de parcelles sur ses stations expérimentales, dont les résultats sont également valorisables pour la modélisation de l'évolution du stock de carbone organique des sols sous l'effet des systèmes de cultures.

Dans le cadre du projet GCEOS, Agro-Transfert a établi une démarche de conseil proposant des préconisations de gestion de l'état organique du sol fondée sur la mise en œuvre du modèle AMG dans une gamme de cas-types représentant les principales associations de systèmes de culture et de types de sols identifiés en région Picardie. Sur cette base et à la suite du projet CARTOPAILLES, ce travail a permis de proposer une aide à la décision pour permettre l'exportation des pailles tout en préservant la fertilité des sols, destinée aux agriculteurs concernés et validée par les scientifiques et les professionnels agricoles engagés dans l'étude (Brochures et plaquettes éditées par la FRCA Picardie, 2008). Cette réalisation fournit un exemple d'outil simple, directement opérationnel, dérivé de la mise en œuvre du modèle AMG et de l'interprétation de ses sorties, que le présent projet pourrait permettre d'adapter à d'autres problématiques, dans d'autres contextes régionaux.

2. Objectifs du projet

L'objectif principal du projet est d'élargir le domaine d'application du modèle AMG et de préparer sa mise en œuvre pour l'aide à la décision dans une large gamme de situations agronomiques couvrant les principales questions de gestion du statut organique des sols en systèmes de grande culture et de polyculture-élevage en France, en mutualisant et en mobilisant les travaux de recherche et d'expérimentation disponibles au sein des différents organismes impliqués.

3. Programme de travail

Il est scindé en 4 phases, décrites ci-après.

Phase 1 : Constitution d'une base de données à partir de jeux de données : mobilisation de résultats issus d'expérimentations et de suivis de parcelles

Les données valorisables dans le cadre du projet sont issues d'expérimentations ou de suivis de parcelles sur des durées suffisamment longues (supérieures à 10 ans) pour évaluer correctement l'évolution du stock de MOS sous l'effet de modes d'occupation du sol (grandes cultures, prairie) et de pratiques culturales.

Ces suivis doivent disposer d'un certain nombre de variables mesurées pour pouvoir être valorisés dans le cadre de cette étude : teneur et stock de carbone organique mesurés périodiquement au cours de la période de suivi (au moins début et fin et si possible, mesures en cours d'essai), caractéristiques du sol nécessaires au fonctionnement du modèle, rendements des cultures, part exportée, ainsi que les enregistrements des pratiques culturales ayant un impact sur le statut organique des sols (travail du sol, apport de MO exogènes...).

De nombreuses expérimentations et des suivis de parcelles répondant à ces conditions peuvent être valorisés dans le cadre du projet. Mais pour ce faire, un important travail de compilation, tri, expertise des données, nouvelles analyses sur échantillons de terre conservés, doit être réalisé.

Les données disponibles et validées seront utilisées d'une part pour compléter le paramétrage du modèle AMG et d'autre part pour évaluer le modèle.

Cet axe comportera également un travail de recherche bibliographique au niveau international, d'une part pour compléter les informations disponibles sur certaines expérimentations déjà valorisées dans le cadre du paramétrage actuel d'AMG (retour vers les auteurs pour obtenir des informations complémentaires non renseignées dans les publications existantes ou face à de nouvelles questions posées), d'autre part pour collecter des résultats d'autres travaux.

Phase 2 : Extension et amélioration du paramétrage du modèle AMG puis évaluation sur une gamme de situations pédoclimatiques et culturelles variées.

Le paramétrage actuel du modèle AMG (paramétrage publié par Saffih et Mary en début 2008 suite au projet CARTOPAILLES, auquel s'associent les évolutions opérées dans le cadre du projet GCEOS) est bien adapté aux applications recherchées en systèmes de grande culture classiques dans le contexte de production du bassin parisien et plus particulièrement de la Picardie. Il peut encore être enrichi et affiné pour ces systèmes, mais surtout, il doit être complété et étendu pour permettre la mobilisation du modèle dans des contextes de culture plus variés, tels qu'ils peuvent se rencontrer sur l'ensemble du territoire agricole français.

1. Les volets du paramétrage du modèle à développer

Les travaux de paramétrage du modèle AMG concernent d'une part, la prise en compte des quantités de carbone entrant dans le stock de carbone organique actif du sol via les résidus de cultures, les couverts intermédiaires et les apports de produits organiques résiduels, d'autre part, la vitesse de minéralisation annuelle de ce stock de carbone organique du sol et enfin, l'estimation de la part de carbone actif dans le stock total de carbone organique du sol.

1.1 Estimation des quantités de carbone entrant dans le stock de carbone actif du sol

Elle suppose la connaissance d'une part, de la biomasse de résidus restituée au sol par les parties aériennes et par le système racinaire de chaque culture de la rotation et d'autre part du rendement de la transformation de cette biomasse en humus du sol (son coefficient isohumique k_1).

Pour la prise en compte des résidus de cultures, les développements nécessaires du modèle concernent en priorité :

- Les cultures fourragères pluriannuelles et les prairies temporaires : ces cultures sont assez largement présentes dans les systèmes de production en polyculture élevage de nombreuses régions françaises et elles jouent en général un rôle important dans l'entretien du statut organique du sol des parcelles concernées.

- Les cultures à vocation énergétique : les perspectives de développement de ces cultures sont fortes et des résultats récents d'essais sont d'ores et déjà valorisables pour estimer les biomasses qu'elles laissent au sol après exploitation (essais du réseau REGIX, ..).
- Les cultures conduites en systèmes biologiques : les espèces et les variétés choisies (ex. : céréales à pailles hautes), leur culture fréquente en mélange, la production en conditions d'azote limitant, mais aussi la pratique dans certains cas de la jachère annuelle, conduisent à des régimes particuliers de restitution de biomasse au sol . A ce titre, ils méritent un travail spécifique, non encore développé par ailleurs.

Des travaux conduits précédemment à l'INRA sur un essai de longue durée (site de Kerbernez) comportant des couverts fourragers, dont des prairies, doivent permettre d'estimer la contribution carbone de ces couverts en utilisant le modèle STICS (F.Vertes, INRA Quimper ; B.Mary ; INRA Laon). Le développement du module de calcul correspondant d'AMG s'appuiera sur ces résultats et sur ceux d'autres expérimentations de longue durée comportant des prairies conduites par ARVALIS (essais de la Jaillièrre et de Jeu les Bois).

L'implantation de couverts intermédiaires et d'engrais verts au sein des systèmes de culture est appelée à progresser. Or, des travaux récents de l'INRA (Thèse de J. Constantin à l'INRA de Laon jusqu'en fin 2009) montrent que l'impact de l'enfouissement régulier de ces couverts sur le stockage de carbone dans les sols cultivés a été jusqu'à présent sous-estimé. Ainsi, on cherchera à la fois à intégrer dans le modèle AMG une estimation plus précise de la biomasse totale de ces couverts (mise au point d'une méthode d'estimation de la biomasse totale, fondée sur des critères d'appréciation simples de la biomasse aérienne) et à valoriser les résultats de la thèse notamment pour proposer des valeurs de k1 re-évaluées pour des espèces d'interculture courantes.

Concernant les apports de produits organiques, l'estimation de la valeur agronomique de ces produits et en particulier de leur valeur « carbone » est concrétisée par la mesure de leur Indice de stabilité biologique. Après l'Indice de Stabilité Biologique (ISB, Linères et Djakovitch, 1993), l'indice ISMO (Indice de Stabilité des MO), qui améliore ce dernier s'impose à présent (ISMO en cours de normalisation AFNOR). Un travail engagé entre S. Houot (INRA de Grignon), B. Mary (INRA de Laon), A. Duparque (Agro-Transfert) et N. Damay (LDAR) porte actuellement sur la possibilité d'estimer, via l'ISMO, le k1 des produits organiques pour le modèle AMG. Les résultats de ces travaux permettront d'enrichir très sensiblement le module « apports organiques » du modèle AMG . Cela suppose un travail de reconstruction de ce module pour intégrer ces nouvelles références et son ajustement en réalisant des tests s'appuyant sur les résultats d'expérimentations de longue durée (Essais de 10 ans avec fumiers et composts de La Jaillièrre (ARVALIS) et de Jeu les Bois (ARVALIS & OIER) ;

plusieurs essais avec apports répétés de PRO¹ conduits par ARVALIS et partenaires dont les résultats sont en cours de synthèse dans le cadre du projet CASDAR 7089, intitulé « gestion durable des sols avec des produits organiques issus d'élevages »). Des valeurs de k1 seront proposées, pour les PRO les plus « courants », à partir des données ISMO disponibles (base de données INRA) et des analyses complémentaires seront réalisées pour certains PRO non encore référencés.

1.2 Calcul de la vitesse de minéralisation annuelle du carbone actif du sol (coefficient de minéralisation k)

Le calcul du coefficient de minéralisation du carbone humifié du sol tient compte de l'influence de plusieurs facteurs sur la vitesse de minéralisation annuelle du stock de carbone organique actif du sol : effet de la texture du sol (argile vraie), de sa teneur en calcaire ; effet de la température, de l'état hydrique du sol ; effet du type de travail du sol. Les travaux en vue de l'amélioration du paramétrage du k porteront sur :

- L'examen des possibilités d'adaptation à des sols particuliers (sols de Champagne, sols de Limagne,...).
- La prise en compte de l'influence du facteur « état hydrique du sol » doit être améliorée : l'objectif du travail est ici de trouver des indicateurs climatiques simples (par exemple P-ETP sur une période...) pour estimer un nombre de jours normalisés.
- La prise en compte de l'influence du type de travail du sol (labour, non labour, semis direct) a été intégrée à la dernière version du paramétrage du k dans le cadre du projet GCEOS. Les résultats récents de suivis d'essais de long terme permettant de comparer ces effets, associés à l'examen de résultats internationaux pourront conduire à ajuster la modulation du k introduite pour tenir compte du travail du sol.

1.3 Recherche d'indicateurs du rapport C actif / C organique total du sol

A ce jour, il n'existe pas de méthode de détermination directe de ce rapport qui fasse référence. Cependant différentes méthodes chimiques ou biologiques sont proposées comme indicateur de ce rapport. Un inventaire de ces indicateurs sera réalisé. L'intérêt de certains d'entre eux (biomasse microbienne, MO particulière, ...) sera évalué sur certains essais bien différenciés, tels que ceux faisant varier le régime d'apport organique par comparaisons de traitement avec de forts apports fréquents de PRO et le témoin dans les essais « PRO » disponibles.

2. Etudes de sensibilité du modèle aux variations de différents paramètres

L'étude de sensibilité est indissociable des travaux de paramétrage du modèle. Elle a deux vocations majeures : elle permet d'une part de hiérarchiser les efforts à consentir à l'amélioration de la précision des différents paramètres de calcul (k1, k, ...). et d'autre

¹ PRO : produit résiduaire organique

part, de définir les limites de précision et de validité du modèle, pour un paramétrage donné et connaissant la variabilité a priori des données d'entrée accessibles à l'utilisateur. En ce sens, les résultats de l'étude de sensibilité du modèle permettent de qualifier et de tracer le paramétrage du modèle retenu à un moment donné de son histoire. Sa publication constituera une sortie du projet importante à considérer.

3. Test du modèle sur des jeux de données d'expérimentations et de suivis de parcelles sur de longues durées (> 10 ans) :

La pertinence des résultats du modèle AMG dans une large gamme de types de conditions pédoclimatiques et de systèmes de culture est nécessaire à sa mobilisation dans des outils d'aide à la décision applicables dans la majorité des situations agricoles en France.

A l'issue des différents travaux de paramétrage, des jeux de données issus de nombreux essais de longue durée sur différentes thématiques (rotation et systèmes de cultures, fertilisation P et K, apports de PRO) ainsi que des suivis de parcelles sur des stations expérimentales d'ARVALIS, permettront de tester le modèle dans une large gamme de situations pédoclimatiques et de définir son domaine de validité.

Phase 3 : Travail sur l'interprétation des résultats des simulations et construction d'outils de diagnostic et de conseil, intégrant aussi les aspects méthodologiques de suivi du statut organique des sols cultivés

Le choix d'un modèle de simulation simple et l'optimisation de son paramétrage pour permettre sa mobilisation dans des conditions pédoclimatiques, des systèmes de productions, des échelles d'application potentiellement très variés, constitue déjà, implicitement la première étape du transfert d'un savoir et d'un outil issu de la recherche en réponse à des questionnements concrets des professionnels agricoles et particulièrement des agriculteurs. Si ces dispositions sont nécessaires, elles ne suffisent pas en tant que telles. En effet, plusieurs conditions sont aussi nécessaires pour que d'un modèle de simulation performant on puisse aboutir non seulement à un outil d'aide à la décision pertinent, mais au delà, à un conseil adapté. Ces conditions renvoient,

pour la mise au point de l'aide à la décision :

- à la nécessité de définir des règles d'interprétation des sorties du modèle ;
- à la nécessité que ces règles soient partagées par les scientifiques spécialistes du sujet et les professionnels du développement dépositaires de la demande des utilisateurs finaux ;
- à l'importance de disposer de données analytiques fiables permettant de prendre du recul sur les caractéristiques, voire les propriétés des sols des différentes régions où l'outil serait mobilisé.

Ces règles d'interprétation doivent en effet faire la synthèse entre les objectifs scientifiques et techniques poursuivis à l'origine de la mise en œuvre de l'outil. Dans le cadre de l'étude conduite à l'issue du projet

CARTOPAILLES pour aider à déterminer les possibilités d'exportation des pailles sans risques pour la fertilité des sols, des critères environnementaux (préservation du stock de carbone du sol en lien avec l'effet de serre) et agronomiques (maintien des teneurs de MO en lien avec les propriétés physiques des sols) ont été conjugués. De plus, alors qu'il est montré que la notion de teneur satisfaisante en matière organique d'un sol n'a qu'un sens très relatif, variable selon les propriétés du sol que l'on privilégie, le choix de la teneur en matière organique repère, pour chaque situation type Sol x Système de culture, à laquelle rattacher l'objectif de « maintien des teneurs de MO » a été déterminée sur la base d'une analyse statistique simple à partir de la base de données d'analyses de terre du LDAR et de l'expertise des conseillers agricoles.

pour sa mise en œuvre dans les meilleures conditions :

- au caractère indispensable de disposer de méthodes, fiables et peu coûteuses, pour acquérir des données sur l'état organique du sol à un moment donné, pour pouvoir suivre l'évolution de cet état et poser un diagnostic simple sur ces bases ;
- à l'intérêt de coupler l'usage de l'outil de simulation et le suivi effectif au champ de l'évolution de l'état organique du sol dans le temps sur le moyen ou le long terme via ces méthodes.

pour l'appropriation des outils d'aide à la décision mis au point :

- à l'importance d'accompagner ces outils de moyens de sensibilisation aux problématiques de gestion de l'état organique du sol et donc de transferts de connaissances sur le sujet (documents de vulgarisation et de communication, supports de formations) ;
- à l'intérêt de développer des systèmes de préconisations s'appuyant sur des cas-types illustrant l'application des outils à des problématiques régionalisées facilement reconnues par les utilisateurs finaux ;
- l'importance enfin de choisir pour leur mise en œuvre et leur diffusion, des supports appropriés : le choix des solutions informatiques pour la diffusion de l'outil de simulation fondé sur AMG requiert en soi un travail d'analyse préalable puis de conception spécifiques.

Les travaux au cours de cette phase du projet seront définis pour répondre aux différentes exigences posées ci-avant. Ils seront organisés autour du traitement de cas concrets, si possible diversifiés et impliqueront les concepteurs des outils partenaires du projet ou experts scientifiques associés et des représentants des utilisateurs en attente de solutions concrètes concernant la gestion de l'état organique des sols de leurs exploitations, de leur secteur, de leur région...

Phase 4 : Communication et diffusion des outils et résultats obtenus dans le cadre du projet

- Communication à destination des agriculteurs sur l'impact de pratiques culturales (gestion de pailles...) sur l'évolution du statut organique des sols à long terme.
- Communication à destination des techniciens pour accompagner la diffusion des outils de diagnostic et de conseil développés à partir du modèle AMG. Cette communication sera pour partie réalisée dans le cadre du COMIFER et du CORPEN (sous-groupe matières organiques du groupe sols du CORPEN).
- Publications scientifiques sur les nouvelles avancées de la recherche concernant le modèle AMG.
- Base de données des essais et parcelles disposant de suivis du stock de carbone des sols en fonction des sols, systèmes de cultures et pratiques culturales mise à disposition d'équipes de recherche.

Le modèle AMG partagé élaboré dans le cadre de ce projet sera intégré dans le module gestion de l'état organique des sols de l'outil REGIFERT développé dans le cadre du RMT « fertilisation et environnement » et utilisé par différents laboratoires.

Par ailleurs, il sera mobilisé par des outils informatisés mobilisables sur PC, ou sur Internet, d'une part par AGRO-TRANSFERT et l'INRA et d'autre part par ARVALIS.

4. Résultats attendus :

- Modèle conceptuel AMG (formalismes et paramètres) partagé entre les partenaires du projet
- Outils informatisés construits par les partenaires du projet sur la base du même modèle conceptuel AMG partagé
- Base de données des essais et suivis de parcelles ayant servi au paramétrage, au test et aux études de sensibilité du modèle AMG.
- Abaques d'interprétation des simulations avec le modèle AMG dans différents contextes.
- guide méthodologique pour le suivi de la teneur et du stock de carbone organique des sols.

4 pages à destination des agriculteurs pour expliquer le bilan humique, et les conséquences à long terme de différentes pratiques culturales et systèmes de culture.

Fiches d'interprétation du calcul de bilan humique fourni par les outils de diagnostic et de conseil élaborés dans le cadre du projet, mises à disposition des laboratoires d'analyses de terre.

Fiche technique sur le bilan humique AMG à destination des techniciens.

Dossier dans la revue Perspectives Agricoles sur la gestion de la MOS et le bilan humique.

Communication aux colloques COMIFER-GEMAS en 2011 et 2013.

Organisation d'un colloque COMIFER (RMT fertilisation environnement- Académie d'Agriculture) sur la gestion de la MOS en début 2013.

Références bibliographiques

Andriulo A., B. Mary et J. Guérif. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*. 19. 365-377

Balesdent J. 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Etude et Gestion des Sols*. 3(4). 245-260

Coleman K., DS, Jenkinson. 1996. RothC-26-3. A model for the turn over of carbon in soil. In *Evaluation of soil organic matter models. Using existing Long Terme Data sets*, Powlson DS, P. Smith and JU Smith. Springer-Verlag. Berlin. 237-246

Constantin J., B. Mary, F. Laurent, G. Aubrion, A. Fontaine, P. Kerveillant, N. Beaudoin. 2009 Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on N leaching and balance in three long-term experiments. *Soumis à Plant and Soil*

Constantin J. 2010. Quantification et modélisation du bilan d'azote à long terme : impact des cultures intermédiaires, du semis direct et de la fertilisation réduite. Thèse réalisée à l'INRA, US 35-1158 Agro-Impact, Agrosystèmes et impacts des pratiques agricoles sur les cycles Carbone Azote, Laon.

Duparque A., H. Boizard, N. Damay, JL Julien, C. Leclercq, B. Mary. 2007. Evolution de l'état organique du sol à l'échelle de la parcelle : de nouveaux outils pour une démarche de conseil fondée sur le bilan humique AMG In *Fertilisation et analyse de terre : quoi de neuf ?* Huitièmes rencontres de la fertilisation azotée (COMIFER) et de l'analyse de terre (GEMAS). 20-21 novembre 2007, Blois, France.

Hansen S., HE, Jansen, NE, Nielsen and H. Svendsen. 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. *Fertilizer research*. 27, 245-259

Héhin S. et M. Dupuis. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales Agronomiques*. 19-29

Lashermes G., S. Houot, B. Nicolardot, V. Parnaudeau, B.Mary, T. Morvan, R. Chaussod, M. Linères, L.Metzger, L. Thuries, C; Villette, A. Tricaud, ML Guillotin. 2007. Apports de matières organiques en agriculture : indicateur de stockage de carbone dans les sols et définition de classes de disponibilité d'azote. *Echo-MO n°64.mars-avril 2007*

Lashermes G., B. Nicolardot, V. Parnaudeau, L. Thuries, R. Chaussod, ML Guillotin, M. Linères, B.Mary, L.Metzger, T. Morvan, A. Tricaud, C; Villette, S. Houot 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogeneous organic matter application. *European Journal of soil science*, sous presse

Linères M et JL Djakovitch, 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. In *Matières organiques et Agricultures*, Quatrièmes journées de l'analyse de terre (GEMAS) ; Cinquième forum de la fertilisation raisonnée (COMIFER) 16-18 novembre 1993, Blois-France. 159-168

Parton WJ, DS Schimel, CV Cole and DS Ojima, 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter level in Great plain grasslands. *Soil Science Society of America Journal*. 51, 1173-1179

Saffih-Hdadi K. et B. Mary, 2008. Modelling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 40. 594-607.

UNFCCC/CDM, 2006. Definition of renewable biomass. EB23 report, Annex 18, P1-2 http://cdm.unfccc.int/EB/023/eb23_repan18.pdf

Walter C. T. Bouedo et P. Arousseau, 1995. Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. *Rapport ENSA Rennes*. 30p

Wylleman R., 1999. *Caractérisation et modélisation de l'évolution des stocks de matière organique des sols de grande culture en Picardie*. Rapport de fin d'étude. INRA Laon, 87 pp + annexes.

Wylleman R., Mary B., Machet J.M., J. Guérif et Degrendel M., 2001. Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture : analyse et modélisation. *Perspectives Agricoles*, n°270, juillet-août 2001 : 8-14.