

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

Bouthier A.¹, Duparque A.², Mary B.³, Sagot S.⁴, Trochard R.¹, Levert M.², Houot S.⁵, Damay N.⁴, Denoroy P.⁶, Dinh J.-L.², Blin B.⁴, Ganteil F.¹

¹ ARVALIS-Institut du végétal, 3 rue Joseph et Marie Hackin, 75116 Paris

² Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2 chaussée Brunehaut, 80200 ESTREES-MONS

³ INRA, UMR d'Agronomie, Laon Pôle du Griffon, 180 rue Pierre-Gilles de Gennes, 02000 Barenton-Bugny

⁴ LDAR (Laboratoire départemental d'analyse et de recherche), Pôle du Griffon, 180 rue Pierre Gilles de Gennes, Barenton-Bugny, 02007 Laon Cedex

⁵ UMR INRA – AgroParisTech EGC, 78850 Thiverval-Grignon

⁶ INRA, UMR INRA-Bordeaux Science Agro ISPA, Centre de recherches de Bordeaux Aquitaine 71 avenue Edouard Bourlaux, CS 20032 33882 Villenave d'Ornon Cedex

Correspondance : a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr

Résumé

Le très faible nombre de références expérimentales de longue durée disponibles, nécessite de recourir aux modèles de simulation pour prévoir les variations de l'évolution à long terme du stock de carbone des sols sous l'effet de différents facteurs pédoclimatiques ou cultureux. Parmi les modèles disponibles, le modèle AMG (du nom de ses auteurs : Andriulo, Mary, Guérif), mis au point dès 1999 par l'INRA de Laon, simple d'utilisation et robuste, a servi de base au développement d'outils informatisés mobilisables via Internet, par Agro-Transfert, l'INRA, le LDAR et d'autres organismes partenaires sur la région Picardie. L'objectif principal du projet était 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 relatives à la 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.

Les travaux conduits dans le cadre du projet ont permis de (i) constituer une base de données issue d'essais de longue durée sur des thématiques et dans des contextes pédoclimatiques très variés ; (ii) de réaliser un moteur de calcul « AMG-Recherche » en langage informatique C++ interfacé avec la base de données, qui constitue un support dédié aux travaux de paramétrage du modèle ; (iii) d'effectuer une évaluation de la valeur prédictive du modèle AMG, par modélisation statistique de l'erreur à partir du jeu de données constitué par les essais regroupés dans la base de données créée au cours du projet; (iiii) d'actualiser certains paramétrages du modèle (coefficients racinaires, coefficients isohumiques des produits résiduels organiques ou PRO) ; (iiii) de formaliser un document de synthèse méthodologique pour la mise en œuvre d'AMG pour différents types d'utilisation

Mots-clés : matières organiques des sols, carbone organique des sols, évolution des stocks/des teneurs, modèle de simulation, systèmes de culture

Abstract: Adaptation and use of the long term humic balance calculating model AMG in a wide range of crops and mixed-farming systems

The very low number of available long term experimental data requires using simulation models to predict long term changes in soil organic carbon stock under different pedoclimatic or agronomic effects. Among available models, AMG model (derived from the name of the authors: Andriulo, Mary, Guérif),

created in 1999 by INRA of Laon, with easy use and robust, was the base for development of computerized tools usable on PC, by Agro-Transfert, INRA, LDAR and other project partner organisms on Picardie region. The project main purpose was to widen AMG model application domain and to prepare its use as a decision tool in a wide range of agronomic situations covering the main situations of soil organic status management in arable crop and crop-livestock systems in France, by sharing and mobilising available research and experimental works among the project partners.

Studies conducted in the project permitted to (i) build a long term trials database on very diversified thematic and pedoclimatic contexts; (ii) to create a calculating software « AMG-Recherche » in C++ language interfaced with database, which is a dedicated support to model parameterisation work; (iii) to perform AMG model predictive value evaluation, by statistical modelling of the error from dataset formed by trials put together in database during the project; (iv) to update some model parameters (root coefficients, organic waste products isohumic coefficients); (v) to write a methodological synthesis document for implementation of AMG model in different situations.

Keywords: Soil organic matter, soil organic carbon, stock/content evolution, simulation model, crop systems

Introduction : contexte et objectifs

A la recherche de pratiques compatibles avec le maintien du stock de carbone organique des sols

Les matières organiques du sol (MOS) constituent un réservoir de carbone organique et de nutriments (azote, phosphore, soufre...) et influencent ses propriétés physiques (stabilité structurale, travaillabilité...) et biologiques. L'importance et les variations du stock de MOS (mesurée en fait via le carbone organique) du sol dépendent de nombreux facteurs incluant le type de sol, le climat, le système de culture qui conditionnent la quantité et la qualité des restitutions organiques (successions culturales, gestion des résidus de cultures, apports de produits résiduels organiques) et le type et l'intensité du travail du sol.

D'autre part, les résidus de cultures et plus particulièrement les pailles de céréales constituent un gisement relativement important de biomasse potentiellement utilisable comme source d'énergie. Mais la question de la durabilité de pratiques d'exportations fréquentes de résidus de cultures est posée tout particulièrement dans les sols à faible teneur en MOS. La diminution de la teneur en MOS est une des huit menaces sur les sols, identifiées par le projet de directive européenne sur les sols. Une biomasse ne peut être considérée comme une ressource renouvelable que si sa mobilisation n'entraîne pas d'appauvrissement des stocks de matière organique des sols de la zone où elle est prélevée (UNFCCC, 2006).

Le modèle AMG mis au point par l'INRA en 1999

Le très faible nombre de références expérimentales de longue durée disponibles nécessite de recourir aux modèles de simulation pour prévoir les variations de l'évolution à long terme du stock de carbone des sols sous l'effet de différents facteurs pédoclimatiques ou culturels. Parmi les modèles disponibles, le modèle AMG (du nom de ses auteurs : Andriulo, Mary, Guérif), mis au point dès 1999 par l'INRA de Laon (Andriulo et al, 1999) a l'avantage d'être simple d'utilisation et robuste. Le modèle AMG a été adapté à partir du premier modèle de bilan humique réalisé en France par Hénin et Dupuis (1945), lequel a été largement utilisé jusque très récemment par les conseillers agricoles et les enseignants ainsi que la recherche dans le domaine agricole.

Le modèle de Henin-Dupuis est l'un des modèles de bilan humique les plus simples et est comparable à la famille de modèles ICBM (Andrén et Kätterer, 1997). Il considère deux compartiments de carbone

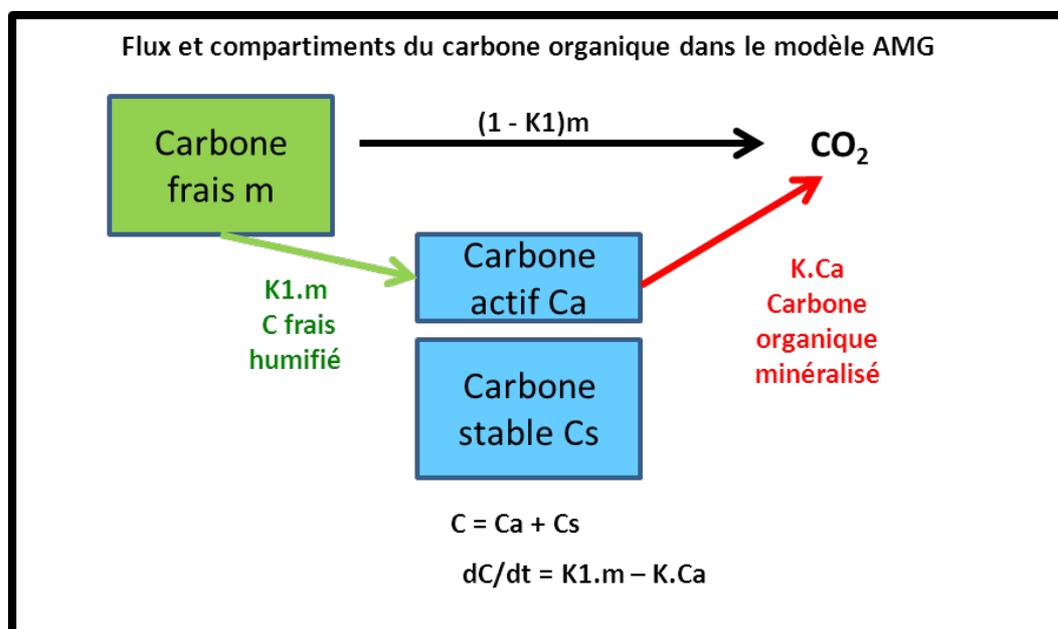
organique (CO): apports de carbone frais par les résidus aériens et racinaires des cultures et des amendements organiques et carbone organique du sol (COS).

En utilisant ce modèle, Mary et Guerif (1994) ou Wylleman et al (1999; 2001) ont montré qu'il avait tendance à sous-estimer les variations réelles de COS à court terme et de les surestimer à long terme. De plus, les valeurs ajustées de k_1 (coefficient d'humification) ne correspondaient pas aux estimations qui pouvaient être faites à partir des incubations de longue durée au laboratoire.

Dans le modèle AMG, le pool de COS humifié est divisé en deux compartiments : un compartiment de carbone actif (Ca) et un second de carbone stable (Cs) qui est considéré totalement inerte sur le court et moyen terme (i.e. son temps de turnover est de l'ordre du millénaire). Le compartiment actif est le seul à être alimenté par les apports de carbone frais et affecté par la minéralisation annuelle (sorties).

Ce concept a conduit à la formalisation du modèle AMG (Figure 1) qui prend en compte le résultat généralement admis que le pool de COS humifié n'est pas homogène.

Figure 1 : Diagramme du modèle AMG



Il a trois principaux paramètres:

k_1 = " coefficient d'humification ", i.e. efficacité de conversion des apports de carbone frais en carbone humifié ; k_2 = taux annuel de minéralisation du Ca ; C_s/C_o = proportion initiale de carbone stable (C_o = teneur en COS initiale).

Selon les hypothèses de construction du modèle, k_1 dépend uniquement de la nature des apports de carbone frais, alors que k_2 dépend des caractéristiques du sol (teneur en argile et en carbonate de calcium), du travail du sol (nature, fréquence et profondeur) et des conditions climatiques (température moyenne de l'air et bilan hydrique).

Comparé au modèle de Henin-Dupuis, la valeur prédictive du modèle AMG est significativement améliorée. Par rapport aux modèles complexes tels que Century, il constitue un modèle simple bien adapté pour développer des systèmes d'aide à la décision. Les formalismes d'AMG sont intégrés dans le modèle de culture STICS qui simule les bilans de carbone et d'azote à un pas de temps journalier (Brisson et al, 2008).

Le modèle AMG a servi de base au développement d'outils informatisés mobilisables sur PC, d'une part par Agro-Transfert Ressources et Territoires (Agro-Transfert-RT) et l'INRA, en partenariat avec le LDAR

et d'autres organismes partenaires sur la région Picardie (projet régional GCEOS), et d'autre part par ARVALIS. Il a notamment permis de simuler l'évolution des stocks et des teneurs en carbone organique des sols cultivés pour évaluer des gisements de paille durablement mobilisables dans différents contextes pédoclimatiques (projet régional CARTOPAILLES, en Picardie, 2004-2007).

Élargir le domaine d'application du modèle AMG et aider à sa mise en œuvre pour le conseil

Face au développement attendu des études de gisements de biomasse, l'utilisation d'outils de simulation des stocks de carbone organique des sols va s'accroître. Compte tenu des conséquences économiques et environnementales importantes liées aux résultats des simulations, les partenaires du présent projet s'accordent (i) sur la nécessité de disposer d'outils d'aide à la décision, développés à partir d'une version unique et largement partagée du modèle AMG, (ii) sur les possibilités de développement de ce modèle pour en évaluer les performances et l'adapter en conséquence, en s'appuyant sur des résultats d'essais ou de suivi de parcelles disponibles et mobilisables par les partenaires du projet, et (iii) sur l'intérêt d'intégrer l'utilisation de ce modèle dans une démarche de diagnostic et de conseil.

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 grandes cultures 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.

Un projet en cinq volets.

- volet 1 : constitution d'une base de données avec mobilisation de résultats expérimentaux issus d'expérimentations et de suivis de parcelles.
- volet 2 : réalisation d'un moteur de calcul « AMG-Recherche » interfacé avec la base de données et dédié au test et paramétrage ainsi qu'aux études de sensibilité du modèle
- volet 3 : réalisation d'une évaluation de la valeur prédictive du modèle AMG à partir du jeu de données constitué par les essais regroupés dans la base de données
- volet 4 : travaux d'actualisation de certains paramètres du modèle : coefficients isohumiques (K1) des PRO, coefficients racinaires du maïs.
- volet 5 : élaboration d'un document de synthèse méthodologique pour la mise en œuvre d'AMG pour différents types d'utilisation sur l'interprétation des résultats des simulations.

1. Constitution d'une base de données issue d'essais de longue durée

1.1 Objectifs et méthodes :

1.1.1 Objectifs

L'objectif de cette base est de rassembler les résultats d'expérimentations et de suivis de parcelles sur des durées suffisamment longues 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. Les données disponibles et validées seront ensuite utilisées d'une part pour compléter le paramétrage du modèle AMG et d'autre part pour évaluer le modèle.

1.1.2 Rédaction d'un cahier des charges

Un cahier des charges a été rédigé pour définir les conditions et les données requises pour qu'une expérimentation ou un suivi de parcelles soit potentiellement valorisable en vue du paramétrage ou du

test du modèle. Les essais retenus devaient disposer d'un certain nombre de variables mesurées pour pouvoir être valorisées dans le cadre de cette étude : teneur et stock de carbone organique mesurés périodiquement au cours de la période de suivi, caractéristiques du sol nécessaires au fonctionnement du modèle, des rendements des cultures et de la gestion des résidus (pailles), ainsi que les enregistrements des pratiques culturales ayant un impact sur le statut organique des sols (travail du sol, apport de MO exogènes, mise en place de couverts végétaux...). Par ailleurs, les essais retenus devaient comporter un ou plusieurs traitements portant sur la rotation et/ou les apports de PRO et/ou la fertilisation et/ou le mode de gestion des résidus de culture et/ou la mise en place de CIPAN et/ou le travail du sol, avoir été suivis sur au moins cinq ans et comporter au moins deux analyses (début et fin) de teneur en carbone organique du sol par parcelle élémentaire. Des suivis de longue durée sur des parcelles agricoles sans répétitions pouvaient également être retenus à condition de disposer d'au moins dix années de suivi et trois mesures de teneur en carbone organique du sol.

1.1.3 Recensement des expérimentations et suivis de parcelles

Un recensement des expérimentations et suivis de parcelles répondant au cahier des charges a été réalisé par enquête auprès d'organismes détenteurs d'essais de longue durée. Un fichier inventaire des essais a été constitué sous tableur en vue de disposer d'un minimum d'informations sur chaque essai ou suivi, permettant d'une part de vérifier la conformité aux exigences du cahier des charges, d'autre part de préparer le travail de compilation et de saisie des données. Un inventaire spécifique a été réalisé pour les essais PK de longue durée disposant d'échantillons de terre (stockés à l'INRA de Bordeaux), en vue de planifier et d'organiser un programme d'analyses de terres complémentaires. Les analyses envisagées concernent la caractérisation du sol des sites lorsqu'elle n'a pas été réalisée antérieurement, la teneur en carbone organique du sol à certaines dates (ces essais consacrés à la fertilisation PK ne comportaient pas toujours de mesures régulières de la teneur en C organique) et la teneur en ^{13}C notamment dans les essais en monoculture du maïs.

1.1.4 Conception d'une base de données sous Excel® puis transfert sous PostgreSQL

Une structure de base de données a été élaborée sous tableur Excel® pour le stockage des données issues des essais et suivis de parcelles. La structure initialement proposée en été 2010 a été revue en début 2011, pour pouvoir être transférée sous un format de base de données relationnelle (format PostgreSQL) choisi pour la mise en lien avec le moteur de calcul AMG-Recherche.

1.1.5 Définition de critères de qualité du suivi de teneur de carbone organique

Compte tenu du temps important de saisie de chaque essai dans la base Excel®, il a été décidé de vérifier au préalable si les données concernant les teneurs en carbone étaient suffisamment précises et cohérentes pour ne saisir que les essais répondant à un niveau d'exigence donné.

Toutes les teneurs en carbone mesurées sur les parcelles élémentaires des essais ont été saisies sur un fichier spécifique. La précision des mesures et la cohérence des évolutions de la teneur dans le temps ont été appréciées à l'aide de deux paramètres statistiques calculés pour l'ensemble des essais à l'échelle de chaque traitement : le CV (Coefficient de Variation) et la RRMSE (Relative Root Mean Square Error) de l'ajustement linéaire de l'évolution du C org dans le temps. La mise en œuvre de ces tests sur l'ensemble des traitements a permis de faire un choix objectif des traitements à retenir en vue d'une saisie dans la base de données et de définir des priorités pour la saisie des essais dans la base. Les traitements pour lesquels ces deux critères étaient inférieurs à 15 % ont ainsi été retenus en priorité 1. La saisie des données sur la base Excel® a été réalisée entre fin 2010 et début 2012.

1.2 Résultats obtenus

Le recensement a conduit à identifier 79 essais avec répétitions, 5 essais sans répétitions et 7 suivis de parcelles disposant d'une durée de suivi répondant aux exigences du cahier des charges ce qui représentait 507 traitements. Après élimination des traitements dont la qualité du suivi de teneur en

carbone organique du sol ne satisfaisait pas les critères de qualités, il restait 172 traitements. Sur ces 172 traitements, seulement 75 répartis sur 23 essais ont été pris en compte dans la base de données après élimination de traitements ne disposant pas de toutes les données requises pour le fonctionnement du modèle. Les 23 essais sont répartis sur l'ensemble du territoire français avec toutefois une majorité d'entre eux située dans la moitié Nord.

Le nombre de traitements retenus est faible par rapport au nombre d'essais inventoriés. Le rejet important est lié au fait que peu d'essais disposent de suivis rigoureux de la teneur en carbone organique du sol au cours du temps. Sur de nombreux essais initialement réunis, les conditions de prélèvement (notamment la profondeur de prélèvement) ne sont pas mesurées précisément, les mesures sont trop espacées dans le temps se limitant bien souvent à une mesure initiale et une mesure finale, la teneur initiale était mesurée seulement à l'échelle de l'essai et non pas à l'échelle de la parcelle élémentaire. D'autre part, les expérimentations sont pour la plupart insuffisamment renseignées en matière de travail du sol. Ainsi, la profondeur de labour n'est pas souvent mesurée de façon rigoureuse, ce qui ne permet pas de faire des calculs précis de stock de carbone.

2. Réalisation d'un moteur de calcul « AMG-Recherche » interfacé avec la base de données

2.1 Objectifs

Non prévue lors de la conception du projet, la réalisation d'un outil de calcul intégrant le modèle AMG interfacé à la base de données est apparue nécessaire pour permettre le paramétrage du modèle (avec un module spécifique pour l'optimisation des paramètres) ainsi que des études de sensibilité. Cet outil de calcul a été conçu dans l'objectif d'être utilisé pendant le projet et au-delà, comme un outil dédié à l'amélioration du modèle AMG. Il a aussi été conçu pour être utilisé par l'ensemble des partenaires, en local, dans la mesure où le moteur de calcul est intégré dans une feuille Excel.

2.2 Méthodes

Le moteur de calcul a été réalisé (mise au point conceptuelle et informatisation en C++) entre avril et octobre 2011 à Agro-Transfert-RT avec l'appui scientifique de l'INRA de Laon. Ce moteur intègre une version adaptée du modèle AMG (version « partagée » du modèle AMG, élaborée au cours du projet).

Un interfaçage permettant, sur la base de requêtes, l'extraction des données nécessaires au calcul depuis la base de données, a été conçu sous PostgreSQL (langage qui offre des facilités de programmation) en août et septembre 2011 et réalisé entre décembre 2011 et mars 2012.

La structure de la base de données Excel® a été revue au cours de l'été 2011 pour faciliter son transfert en format PostgreSQL. Ainsi, cette base de données PostgreSQL reprend l'ensemble des données de la base Excel® et les organise effectivement au format de base de données relationnelle.

Des requêtes ont été créées en vue de réaliser un calcul de variables élaborées à partir des données initiales de la base PostgreSQL, et la création du fichier CSV nécessaire en entrée de l'outil AMG-Recherche.

2.3 Résultats obtenus

AMG-Recherche constitue l'outil de calcul intégrant le modèle AMG, pour permettre l'évaluation du modèle AMG et l'optimisation de son paramétrage, en utilisant les jeux de données d'essais de longue durée rassemblés et organisés dans la base de données PostgreSQL construite au cours du projet. L'outil AMG-Recherche est interfacé avec la base PostgreSQL mais peut aussi être alimenté par des jeux de données organisés au format du fichier d'entrée CSV tel que généré par requêtage via la base de données PostgreSQL.

AMG-Recherche permet (i) la réalisation de simulations de l'évolution de l'état organique du sol ; (ii) leur comparaison à l'évolution observée dans les essais ; (iii) les calculs statistiques évaluant l'erreur de prédiction du modèle ; (iv) des calculs d'optimisation du paramétrage du modèle par une méthode statistique bayésienne de type MCMC ; (v) les représentations graphiques adaptées des différentes sorties des calculs.

Plusieurs documents ont été réalisés (i) pour formaliser les règles de décision utilisées pour générer le fichier d'entrée de l'outil « AMG-Recherche », (ii) pour faciliter l'utilisation du moteur de calcul (Guide d'utilisation de l'outil « AMG-Recherche »).

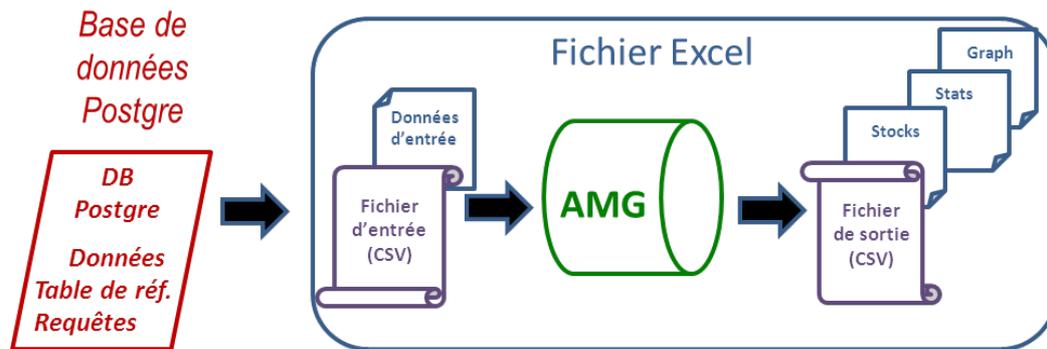


Figure 2 : Diagramme de l'outil «AMG-Recherche

3. Évaluation de la valeur prédictive du modèle AMG

3.1 Objectifs et méthodes

Il a été jugé préférable de procéder à une évaluation de la précision du modèle, avant d'envisager des modifications de paramétrage et d'engager des travaux d'amélioration AMG selon les pistes dégagées par cette évaluation. Ce travail a été réalisé en 2012 (Dinh, 2012). Pour ce faire, on a cherché à modéliser l'erreur du modèle par des modèles linéaires à effets mixtes, afin de la prédire au mieux. Ces modèles faisaient intervenir des covariables à l'échelle de l'essai ou du traitement. Ces covariables qui sont des variables d'entrée du modèle AMG, sont liées soit au sol (% argile, pH, teneur en C initiale, C/N), au climat (température, P-ETP) et aux pratiques agricoles (densité apparente, apports de C par les produits organiques, apports de C par les résidus de culture, profondeur de travail du sol) caractérisant les parcelles agricoles étudiées.

3.2 Résultats obtenus

La Figure 3 montre la performance globale du modèle AMG avec son paramétrage actuel, évaluée sur le jeu de données des 75 traitements des 23 essais de la base de données. Le modèle a tendance à légèrement surestimer le stock de carbone total (différence moyenne entre les stocks de carbone organique total observés et simulés est de -1.0 t C ha^{-1}) et l'erreur moyenne sur la prédiction évaluée par le RMSE (Root Mean Square Error) est de 3.4 t C ha^{-1} . Cette erreur peut être considérée comme acceptable pour des applications où la valeur réelle du stock de carbone joue un rôle important, comme le conseil aux agriculteurs et le calcul d'émission de gaz à effets de serre. Les modèles d'erreurs testés montrent que la prise en compte de certaines covariables peut amener un gain de précision de l'ordre de 20 % au niveau de la prédiction et supprimer le biais.

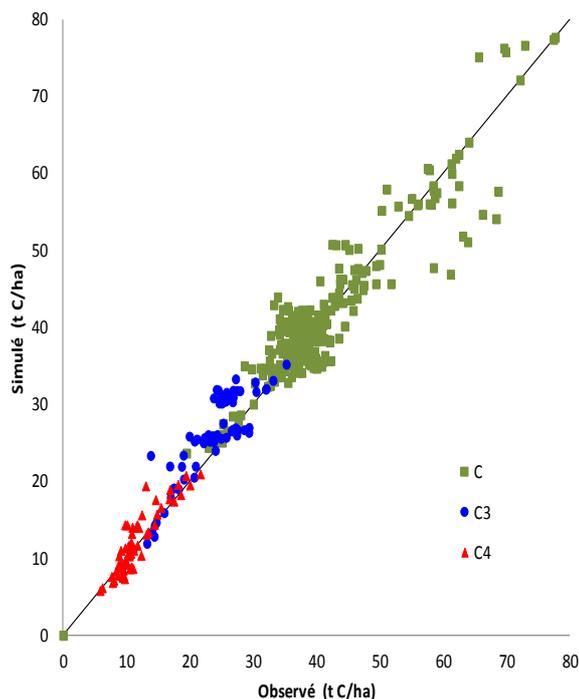


Figure 3 : Stocks de carbone organique (C3, C4 et total) simulés par le modèle AMG et observés issus de la base de données (Duparque et al, 2013)

4. Travaux de paramétrage du modèle

Les travaux de paramétrage du modèle AMG conduits dans le cadre du projet ont privilégié les paramètres relatifs aux entrées de carbone entrant dans le stock de carbone organique actif du sol via les résidus de cultures, et les apports de produits résiduaux organiques.

4.1 Objectifs et méthode

4.1.1 Coefficients isohumiques (K1) des PRO

Ce travail répond au besoin d'élargir et d'actualiser le module de calcul de la contribution des PRO intégré à la version initiale du modèle AMG. Il a pour objectif d'estimer les valeurs du coefficient isohumique pour une gamme représentative des principaux PRO épandus dans les exploitations françaises, comprenant à la fois des effluents d'élevage, urbains et industriels.

Le mémoire de Didier Jousseau sur « l'évolution des stocks de carbone des systèmes de culture incluant le recyclage des produits résiduaux organiques : paramétrage du modèle AMG » a été réalisé en 2011 dans le cadre du projet AMG piloté par l'INRA UMR EGC Grignon (S. Houot) et Agro-Transfert (A. Duparque) en collaboration avec l'INRA Agro-Impact de Laon (B. Mary). Le travail réalisé sur la base de données issues d'une part d'incubations de laboratoire et d'autre part d'essais au champ recensés dans le cadre du programme ou collectés à partir d'essais internationaux (Peltre et al., 2012) s'appuie sur des travaux réalisés préalablement avec STICS par G. Lashermes (2006-2007) puis par A. Duparque, en collaboration avec S. Houot et B. Mary en 2009 et 2010, et avait pour objectif de proposer des estimations du K1 pour une trentaine de types de PRO.

Plusieurs méthodes d'acquisition de données ont été mises en œuvre dans une démarche en plusieurs étapes

- Dans une 1^{ère} étape, le K1 a été calculé à partir de résultats expérimentaux de laboratoire. Grâce aux incubations de longue durée d'un mélange sol/PRO il est possible d'approcher la quantité résiduelle de carbone du PRO correspondant à la fraction de carbone restant dans le sol à long terme et donc

s'incorporant à la matière organique du sol. En s'appuyant sur ces données d'incubation longue (méthode de référence), des estimations de K1 ont été réalisées selon deux méthodes : (i) indicateur ISMO dont le calcul a ensuite été développé et normalisé sur la base de données de fractionnement biochimique des PRO (Lashermes et al., 2009) ; (ii) STICS résidus.

- Dans une 2nde étape, les données expérimentales d'essais au champ de longue durée ont été utilisées pour estimer le K1 des PRO étudiés par optimisation inverse du modèle AMG.

- Dans une 3^{ème} étape, les K1 obtenus selon les différentes méthodes ont été comparés et des valeurs ont été proposées pour chaque type de PRO étudié.

4.1.2 Coefficient d'humification racinaire du maïs

Dans la version actuelle du modèle AMG, le coefficient d'humification est le même pour les parties aériennes et racinaires. L'objectif de cette étude, était d'examiner dans quelle mesure la différence de « coefficient isohumique K1 » (ou rendement en humus) entre les racines et les parties aériennes des plantes pouvait être prise en considération pour aménager le paramétrage du modèle AMG, en distinguant donc un K1 aérien et un K1 racinaire des résidus de cultures. En effet, des références scientifiques récentes montrent qu'à biomasse égale enfouie dans le sol, les racines des cultures génèrent plus de carbone humifié que les résidus aériens. L'étude s'est appuyée sur une revue bibliographique de la littérature internationale et sur un traitement des données spécifiques ainsi dégagées, notamment en utilisant l'outil AMG-Recherche pour optimiser les paramètres travaillés. Cinq essais avec du maïs ont été retenus car cette culture a la particularité d'avoir un cycle photosynthétique en C4, alors que le carbone dans le sol provenant des cultures précédentes est généralement en C3. La différence de rapport isotopique des plantes à cycle en C3 et en C4 permet un marquage naturel du carbone organique du sol. Pour estimer le coefficient d'humification racinaire, trois méthodes d'optimisation ont été retenues, se distinguant par le choix des paramètres optimisés et par la procédure d'optimisation (optimisation sur chaque essai ou optimisation globale sur l'ensemble des essais). Par ailleurs, les masses racinaires ont été estimées selon différentes méthodes et les mesures de ΔC^{13} ont été prises en compte.

4.2 Résultats obtenus

4.2.1 Coefficients isohumiques (K1) des PRO

Le coefficient isohumique K1 a été estimé avec l'indicateur ISMO et STICS résidus sur 83 PRO qui avaient fait l'objet d'incubations de longue durée. Les résultats des sept essais au champ utilisés dans l'étude ont permis de produire une estimation de K1 pour 37 PRO à partir de simulations AMG et pour la plupart, également avec l'indicateur ISMO mesuré directement sur les PRO épandus.

Ce dernier, commun aux deux approches (incubation longue et essais au champ) a pu ainsi être utilisé comme base de comparaison entre celles-ci.

Les deux approches qui n'ont pas pu être mises en œuvre sur les mêmes PRO ont néanmoins permis de comparer les différentes méthodes d'estimation sur neuf types de PRO analogues : boues urbaines, composts de biodéchets, composts de déchets verts, fumiers de bovins, composts de fumiers de bovins, fumiers de porcs, fumiers de volailles, lisiers de porcs, tourbes. Il s'avère (Tableau 1) que pour 8 des 9 types de PRO, les différentes estimations de K1 donnent des valeurs proches (écarts inférieurs à 0.2).

Les estimations de K1 issues de l'indicateur ISMO quand il a pu être mesuré sur les PRO épandus dans les essais au champ sont bien ajustées avec celles estimées directement à partir des résultats d'évolutions des stocks de matière organique mesurées au champ.

Tableau 1 : Mise en relation des valeurs d'ISMO, de STICS-résidus, et de K1 au champ sur différents types de PRO

PRO	ISMO			K1 STICS			K1 au champ		
	Valeur	Effectif	E.T.	Valeur	Effectif	E.T.	Valeur	Effectif	E.T.
Algoforestier							0,87	1	
Amendement organique	0,70	6	0,10						
Boue urbaine	0,57	13	0,23	0,43	5	0,20	0,54	2	0,25
Boue agro-indus.	0,50	8	0,16						
Boue chaulée	0,52	8	0,20	0,39	3	0,05			
Boue séchée	0,44	15	0,15						
Boue traitement de lisier	0,62	3	0,14						
Boue papeterie	0,61	2	0,09						
Compost de bio-déchets	0,77	39	0,10	0,88	1		0,83	2	0,09
Compost de boue	0,79	56	0,12						
Compost de déchets verts	0,79	24	0,08	0,91	6	0,08	0,76	3	0,25
Compost d'ordures mén.	0,55	76	0,14	0,35	1		0,42	1	
Compost de fiente	0,56	6	0,17						
Compost de fumier	0,69	31	0,12	0,80	8	0,09	0,61	4	0,35
Compost de lisier	0,58	18	0,26						
Digestats	0,91	6	0,05						
Ecorces	0,64	8	0,09	0,95	1				
Engrais organiques	0,34	5	0,10	0,49	4	0,12			
Engrais organo-minéral	0,14	2	0,03	0,30	3	0,07			
Fiente	0,31	6	0,19	0,40	4	0,05			
Fumier de bovin	0,60	27	0,12	0,78	3	0,07	0,52	9	0,15
Fumier de cheval	0,52	5	0,12						
Fumier d'ovin	0,57	2	0,02	0,53	1				
Fumier de porc	0,46	5	0,19	0,59	1		0,53	1	
Fumier de volaille	0,48	10	0,15	0,51	3	0,08	0,40	2	0,21
Lisier de porc	0,51	6	0,13	0,53	1		0,00	2	0,00
Ordures mén. chaulées	0,39	2	0,05						
Refus de lisier	0,53	4	0,37						
Sciure							0,45	2	0,12
Tourbe				0,97	2	0,01	0,93	2	0,10
Végethumus							0,56	1	

Les résultats de l'optimisation de STICS-résidus sont celles qui s'ajustent le mieux avec les résultats des incubations longues ; toutefois l'indicateur ISMO calculé à partir d'analyses de laboratoires plus

faciles à obtenir car moins coûteuses que des incubations longues, s'ajuste de manière satisfaisante à la fois au K1 issu des incubations longues et celui issu des essais au champ. Une liste de K1 est proposée pour une trentaine de types de PRO. Ces K1 sont issus de l'estimation de STICS- résidus (méthode la plus précise qui a été retenue en priorité), pour 16 d'entre eux et par l'ISMO pour les autres types de PRO ne disposant pas d'estimation de K1 par STICS-résidus. Des travaux seront conduits ultérieurement pour compléter ce jeu de K1, à partir d'une part d'essais au champ dont les données n'étaient pas disponibles en 2011 et d'autre part de données ISMO sur de nouveaux types de PRO.

4.2.2 Coefficient racinaire du maïs

Les références bibliographiques montrent que le coefficient d'humification racinaire serait plus important que celui des parties aériennes. Certains auteurs évoquent une protection physique résultant d'un contact plus direct avec la matrice argileuse du sol et un plus fort ratio lignine/azote (Oades, 1995 : cité par Bolinder et al, 1999), d'autres mettent en avant la composition biochimique des racines plus riches en composés phénoliques et ligneux (Bottner, 1982 : cité par Bolinder et al, 1999), tandis que le carbone des parties aériennes se trouve en plus grande proportion sous forme soluble. Certains auteurs proposent des valeurs de coefficient isohumique des racines proches de 0.4 alors que celui-ci est proche de 0.2 pour les parties aériennes. Les simulations réalisées sur les cinq essais conduisent à des coefficients isohumiques racinaires du maïs compris entre 0.26 et 0.49, mais les méthodes de simulations les plus précises prenant en compte les données de ΔC^{13} , et basées sur des masses aériennes et racinaires calculées par le modèle AMG aboutissent à des coefficients légèrement inférieurs à 0.4, proches des valeurs proposées par la bibliographie.

5. Élaboration d'un document de synthèse méthodologique pour la mise en œuvre d'AMG pour différents types d'utilisation et sur l'interprétation des résultats des simulations.

Le modèle AMG peut être mobilisé pour la réalisation de diagnostics d'état organique des sols à l'échelle de territoires en vue d'applications variées, telles que des études de gisements de biomasses (la mobilisation de ces biomasses, pour être durable, doit en effet préserver la qualité des sols) ou la définition de priorités pour les épandages d'amendements organiques.

Ce volet 5 du projet avait pour objectif de préciser les méthodologies pour mobiliser des informations fiables décrivant les contextes agropédoclimatiques qui seront simulés, pour interpréter les résultats des simulations et valoriser les sorties des simulations dans des outils d'aide à la décision. La mise en œuvre de cette phase devait s'appuyer sur des cas concrets.

5.1 Objectifs et méthode

Trois études mobilisant le modèle AMG en vue de réaliser un diagnostic de l'état organique des sols à l'échelle de territoires ont été valorisées dans le cadre de ce volet pour enrichir la réflexion sur la méthodologie à mettre en œuvre pour, d'une part, constituer des cas types sol-système de culture associés à un état organique initial à partir de différentes sources d'informations (données d'enquêtes parcellaires, fiches de renseignements de bulletins d'analyses de terre) et d'autre part, caler des règles d'interprétation des sorties du modèle tenant compte à la fois d'objectifs agronomiques et environnementaux.

Ces études sont :

(1) Un guide d'exportation des pailles réalisé par ARVALIS, Agro-Transfert-RT et le LDAR sur la région Champagne-Ardenne entre décembre 2010 et septembre 2011, à la demande de la fédération des coopératives agricoles (FRCA) de Champagne-Ardenne.

(2) Une étude de gisement de pailles (projet CARTOFA GIE ARVALIS-ONIDOL et FCBA) conduite par ARVALIS sur la région Centre entre mars et septembre 2011.

(3) Un diagnostic des stocks de carbone organique à l'échelle de quatre petites régions agricoles du Loiret réalisé dans le cadre d'un stage de fin d'études de Marion Vigot encadré par O. Scheurer (Institut Lasalle Beauvais) entre mars et septembre 2011. Cette étude constituait une première étape de mise au point méthodologique dans le cadre du RMT « Sols et Territoires ». Une 2^{ème} étude selon la même méthodologie a été réalisée sur la région Poitou-Charentes en 2012.

Une réunion avec l'ensemble des partenaires du projet impliqués dans ces études a été organisée, en vue de partager les retours d'expériences et de dégager les points forts et les limites de chaque approche.

5.2 Résultats obtenus

Dans le cadre de travaux conduits en 2008, en lien direct avec le projet régional CARTOPAILLES (2004-2007), donc antérieurs au projet « AMG », la démarche mise en œuvre en Picardie¹ avec construction de cas-types (sol – système de culture) et de jeux de données d'entrée pour le modèle AMG a bénéficié d'une base de données d'analyses de terre bien documentées sur plus de 3000 parcelles qui a permis de disposer de distributions de teneur en carbone associées aux différents cas-types, qui s'ordonnent de façon logique par rapport à l'effet attendu des sols et des systèmes de culture (effet du type de sol via sa teneur en argile et en calcaire et du niveau d'apport de carbone organique par les restitutions). Ce résultat tient vraisemblablement au fait que dans une majorité de situations dans cette région de grandes cultures céréalières et industrielles, les types de systèmes de culture pour un sol donné sont stables depuis une période suffisamment longue pour avoir marqué leur effet de manière significative sur l'état organique des sols.

Ce constat a permis de justifier l'utilisation des deux critères de constitution des cas-types (sol et système de culture) pour fixer les valeurs de teneurs en carbone organique « repères » qui sont prises en compte pour la règle d'exportation des pailles. Ces teneurs « repères » dont on suppose qu'en deçà, les risques de dégradation des propriétés physiques des sols sont considérés comme importants, ont été arbitrairement calées sur la médiane de la distribution des teneurs en carbone organique pour chaque cas-type.

Les travaux conduits sur la région Champagne-Ardenne (FRCA)² ainsi qu'en région Centre (CARTOFA) en vue de déterminer les possibilités d'exportation de pailles sans risque pour l'état organique des sols ont rencontré des difficultés pour disposer de jeux de données permettant de construire des cas-types (sol-système de culture) en raison d'effectifs limités d'analyses de terre disposant de tous les paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle et bien documentées en matière de rotation et pratiques culturales (apports de PRO, gestion des pailles). Par ailleurs, dans l'étude Champagne-Ardenne, les différences de distribution des valeurs de teneurs en carbone organique, et donc de teneurs médianes, n'étaient sensibles qu'entre types de sols et non entre systèmes de culture au sein d'un type de sol (sauf dans le cas de sols limoneux). Ce constat a été attribué à (i) une plus faible gamme de variation des restitutions de carbone par les systèmes de cultures, (ii) au statut organique des sols qui n'aurait pas encore atteint un état d'équilibre (cas du Barrois avec retournement de prairie

¹ Exporter des pailles sans risque pour l'état organique des sols – Guide de décision à la parcelle – Région Picardie- Mai 2008. Produit par la FRCA Picardie - Guide réalisé par Agro-Transfert-RT, Arvalis Institut du végétal, avec la participation de l'INRA de Laon et du LDAR, et en collaboration avec le groupe « Sols et Matières Organiques » des chambres d'agriculture de Picardie. Téléchargeable sur www.agro-transfert-rt.org

² Guide d'exportation des pailles, Décembre 2011. Conçu par Agro-transfert-RT, Arvalis Institut du végétal, le LDAR, avec la participation de l'INRA de Laon et en collaboration avec les coopératives Champagne Céréales, Cohesis, EMC2, Nouricia .

plus ou moins récents), et (iii) des dynamiques d'évolution lente dans certains sols comme les sols de craie. De ce fait, la règle de décision agronomique qui s'appuie sur les teneurs en carbone organique médianes par type de sol et non pas par cas-type (sol-système de culture), risque d'avoir un impact sur les possibilités d'exportation des pailles et amène à s'interroger sur le mode de calage de la teneur « repère ». Celui-ci pourrait alors s'adapter au type de sol en tenant compte des enjeux liés au risque de dégradation des propriétés physiques variables selon le type de sol (par exemple plus élevés en sols limoneux qu'en sols calcaires). En dehors des sols limoneux où la relation entre la teneur en carbone organique et la stabilité structurale a été établie (Chenu et al, 2011), la définition de seuil est délicate et devrait être basée sur des enquêtes de terrain et expertises locales.

Les difficultés rencontrées pour construire des cas-types dans les régions qui ne disposent pas comme en Picardie, de bases de données directement adaptées à cette fin, et de plus, l'intérêt de pouvoir passer de l'échelle de la parcelle non localisée à une spatialisation des résultats à l'échelle de territoires étendus, ont suscité un nouveau type d'approche développée en lien avec le RMT Sols et Territoires. Cette approche innovante mise en œuvre sur deux régions (territoires agricoles du Loiret en 2011 et de Poitou-Charentes en 2012) s'appuie sur la mise en relation de bases de données existantes (base de données des analyses de terre (BDAT), carte régionale des sols au 1/250 000^{ème}, registres parcellaires graphiques, données sur pratiques culturales) et permet d'identifier les systèmes de culture sur un territoire et de les associer à des types de sols et des teneurs en carbone organique. Les deux études réalisées ont montré l'intérêt ainsi que les principales difficultés d'une telle approche. L'intérêt réside dans le caractère transposable de la démarche dans la mesure où les bases de données utilisées sont disponibles (ou le seront dans un proche avenir) dans toutes les régions et où des outils informatiques permettent d'automatiser les relations entre bases de données. Les difficultés sont liées à l'identification des pratiques culturales et à la quantification des surfaces à attribuer aux rotations et aux scénarios simulés. Des travaux méthodologiques pour lever ces difficultés sont actuellement conduits dans une des tâches du projet ABC'Terre (APR Ademe-REACTIF 2012) piloté par Agro-Transfert-RT et dans une des actions (Action 3.5) du RMT Sols et Territoire pilotée par Lasalle Beauvais et l'UMR SADAPT.

Conclusion et perspectives : apports du projet

Les travaux conduits dans le cadre du projet ont permis de :

- **constituer une base de données sur des situations expérimentales issues d'essais de longue durée** et relatifs à des thématiques et dans des contextes pédoclimatiques très variés, disposant d'un suivi de la teneur en matière organique de la couche arable. La base de données a été structurée et alimentée par la saisie des données constituée sous tableur puis transférée sous base de données relationnelle (format PostgreSQL) en vue d'être interfacée au moteur de calcul de l'outil « AMG-Recherche ».
- **réaliser un moteur de calcul « AMG-Recherche »**, qui intègre une version adaptée du modèle AMG, et qui, interfacé avec la base de données relationnelle, a servi dans le cadre du projet de support pour les travaux de paramétrage et dévaluation du modèle. AMG-Recherche sera utilisé par les partenaires du projet qui vont poursuivre les travaux portant sur le paramétrage du modèle.
- **réaliser une évaluation de la valeur prédictive du modèle AMG** à partir du jeu de données constitué par les essais regroupés dans la base de données créée au cours du projet, par modélisation statistique de l'erreur.
- **proposer une actualisation des coefficients isohumiques (K1) des PRO et des racines.**
- **formuler des recommandations méthodologiques** basées sur les retours d'expériences d'études mobilisant le modèle AMG **pour un diagnostic de systèmes de gestion de l'état organique des sols à l'échelle de territoires** pour différentes applications.

Les résultats acquis dans le cadre du projet vont d'abord permettre aux partenaires du projet d'actualiser (Simeos-AMG, pour Agro-Transfert-RT et l'INRA) ou de réaliser (Arvalis) leur propre outil de simulation de l'évolution du stock de carbone organique des sols basés sur la version du modèle AMG résultant des travaux conduits dans le cadre du projet (AMG partagé v1). Le modèle pourra être mobilisé, au travers des outils existants, dans les travaux de l'axe 3 (développement et amélioration des outils d'aide à la décision des acteurs) du programme 2014-2019 du RMT Fertilisation et Environnement.

Par ailleurs, l'outil AMG-Recherche mis au point dans le cadre du projet sera utilisé par les partenaires du projet qui vont poursuivre les travaux portant sur le paramétrage du modèle, dans le cadre d'un groupe de travail spécifique « consortium AMG ». Lorsque ce groupe de travail sera formalisé, la mise à disposition du modèle à d'autres partenaires scientifiques pourra être envisagée. Les conditions de cette mise à disposition seront gérées par le comité de pilotage du « consortium AMG ».

A court terme, le modèle AMG va être mobilisé dans plusieurs projets de recherche auxquels participent les partenaires du projet :

- le projet ABC'Terre dans le cadre de l'appel à projet Ademe REACTIF 2012 (via l'outil SIMEOS-AMG),
- le projet CSopra dans le cadre de l'appel à projet Ademe REACTIF2 (via AMG-Recherche).

Références bibliographiques :

- Andrén O., Kätterer T., 1997. ICBM: The introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances. *Ecological Applications* 7, 1226-1236
- Andriulo A., Mary B., Guérif J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* 19, 365-377.
- Bolinder M.A., Angers D.A., Giroux M., Laverdière M.R., 1999. *Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (Zea Mays L.)*. *Plant and Soil* 215, 85-91.
- Brisson, N., Launay M., Mary B., Beaudouin. N., 2008. Conceptual basis formalisations and parameterization of the STICS crop model. Ed QUAE. Versailles. 300p.
- Chambre d'Agriculture de Poitou-Charentes, 2012. Le carbone organique des sols cultivés de Poitou-Charentes : quantification et évolution des stocks.
- Chenu C., Cosentino D., Balabane M., Darboux F., Duval O., Houot S., Le Bissonnais Y., Leblond N., Menasseri S., Pétraud J.P., Saulas P., 2011. Risque de dégradation de la qualité des sols agricoles. Cas de la stabilité de la structure. *Colloque de fin de projet GCEOS*. Amiens, 27 janvier 2011. *Présentation orale* - www.agro-transfert-rt.org
- Dinh, J.L., 2012. Modélisation et correction des erreurs de prédiction du modèle AMG par des modèles linéaires à effets mixtes. Mémoire de Master Recherche AgroParisTech Université PARIS SUD.
- Duparque, A. Tomis V., Mary B., Boizard H., Damay. N., 2011. « Le bilan Humique AMG, pour une démarche de conseil fondée sur des cas-types régionaux ». In : 10e rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. GEMAS-COMIFER. Reims : 16p en ligne sur : <http://www.comifer.asso.fr/>
- Duparque A., Dinh J.L., Mary B., 2013. AMG : a simple SOC balance model used in France for decision support. SOMpatic Rauschholtzhausern (Germany), November 20-22, 2013 *on line at* : <http://www.uni-giessen.de/cms/sompatic>
- Hénin S., Dupuis M., 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales Agronomiques* 11, 17-29
- Jousseume D., 2011. Evolution des stocks de carbone dans les systèmes de culture incluant le recyclage de produits résiduels organiques: paramétrage du modèle AMG. Mémoire de fin d'études d'ingénieur ESA d'Angers.

Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuriès L., Chaussod R., Guillotin M.L., Linères M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Vilette C., Houot S., 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science* 60, 297-310.

Mary B., Guéris J., 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agricultures* 3. 247-257

Peltre C., Christensen B.T., Dragon S., Icard C., Kätterer T., Houot S., 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry* 52, 49-60.

Saffih-Hdadi K., Mary B., 2008. Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. En ligne sur site *Soil Biology and Biochemistry*

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

Vigot M. 2011. Spatialisation du diagnostic de l'état organique des sols cultivés à l'échelle d'un territoire : exploration d'une méthode basée sur le bilan humique AMG, appliquée dans le département du Loiret. Mémoire de fin d'études d'ingénieur de l'ENITA de Bordeaux.

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., Guéris J., Degrendel M., 2001. Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture : analyse et modélisation. *Perspectives agricoles* 270, 8-14