

## Appel à projets

ITA Pilote : ARVALIS-Institut du Végétal

Recherche finalisée et innovation  
des instituts techniques agricoles

Date de début de projet: octobre 2009

Durée (36 mois maximum) : octobre 2012

2009

Thème de l'appel à projets :

Projet présenté par une UMT OUI  NON

---

**TITRE : 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.

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

---

ITA Pilote : ARVALIS-Institut du Végétal

RESPONSABLE\* :

Nom : MORICE Gérard (Directeur général)

Adresse : 3 rue Joseph et Marie Hackin-75116 PARIS

Téléphone/fax : 01-44-31-10-00/ 01-44-31-10-10

Mail (où sera adressée la liste des lauréats) : a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr

**CHEF DU PROJET :**

*Le CV du chef de projet est à fournir en annexe*

Nom, Prénom : BOUTHIER Alain

Organisme employeur : ARVALIS-Institut du Végétal

Fonction : Ingénieur spécialiste sols et fertilisation

Adresse : Domaine du Magneraud 17700 Saint Pierre d'Amilly

Téléphone/fax : 05-46-07-44-65/ 05-46-07-44-73

Mail : a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr

**PARTENAIRES**, y compris le pilote

AGRO-TRANSFERT RESSOURCES ET TERRITOIRES, 2 Chaussée Brunehaut, 80200 ESTREES-MONS

INRA US1158 AGRO-IMPACT et UMR TCEM Bordeaux

LDAR (laboratoire départemental d'analyses et de Recherche de L'Aisne)

ARVALIS-Institut du Végétal

**EXPERTS CONNUS SUR LE SUJET\*** (hors de l'équipe de recherche impliquée)

S. Fontaine (INRA Clermont-Ferrand), S. Houot (INRA Grignon), J. Balesdent (INRA Aix-en-P), D. Arrouays (INRA INFOSOL Orléans), C. Chenu (Agro-Paris-Tech), T.MORVAN (UMR SAS AGROCAMPUS Rennes)

**Pièces à joindre au dossier :**

- CV du chef de projet (sans photo)

- Lettres d'engagement des partenaires (une lettre de chacun des partenaires précisant notamment la participation financière prévue)

---

\* Nom et prénom de la personne ayant qualité pour engager l'organisme demandeur

\* Ne doivent, en aucun cas faire partie de l'équipe de recherche

## **RESUME (1 page maximum)**

### **1. Situation du sujet**

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 (en fait de carbone organique) du sol dépendent de nombreux facteurs incluant le type de sol, le climat, le système de culture qui conditionne la quantité et la qualité des restitutions organiques (successions culturales, gestion des résidus de cultures, apports de produits résiduels organiques) et le type de travail du sol. 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, d'autant plus que 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. De plus, au plan international, 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 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 (Andriulo et al, 1999) a l'avantage d'être simple d'utilisation et robuste. Le modèle AMG a servi de base au développement d'outils informatisés mobilisables sur PC, d'une part par AGRO-TRANSFERT, l'INRA, le LDAR et d'autres organismes partenaires sur la région Picardie (Projet régional GCEOS, cf § I.1), 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, cf § I.1). 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 l'adapter à une plus large gamme de situations culturales connues en France, en s'appuyant sur des résultats d'essais ou de suivi de parcelles disponibles et mobilisables par les partenaires du projet ; (iii) sur la nécessité d'intégrer l'utilisation de ce modèle dans une démarche de diagnostic et de conseil.

### **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**

- Phase 1 : Constitution d'une base de données à partir de jeux de données : mobilisation de résultats expérimentaux issus d'expérimentations et de suivis de parcelles.
- Phase 2 : Extension et amélioration du paramétrage du modèle puis évaluation sur une gamme de situations pédoclimatiques et culturales variées.
- Phase 3 : Travail sur l'interprétation des résultats des simulations et construction d'outils de diagnostic et de conseils intégrant aussi les aspects méthodologiques de suivi du statut organique des sols cultivés.
- Phase 4 : Communication sur les résultats du projet

### **4. Echancier**

- Phase 1 : octobre 2009 à décembre 2010
- Phase 2 : janvier 2010 à mars 2012
- Phase 3 : octobre 2011 à octobre 2012
- Phase 4 : octobre 2011 à octobre 2012

## 1. Synthèse bibliographique permettant de situer le projet\*\* (une page maximum)

L'évolution des teneurs en matières organiques des sols dans les sols cultivés préoccupent 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 de 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-Hdaddi 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 (Thèse de J. Constantin en cours à l'INRA de Laon ; Constantin et al, 2009), 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 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.

---

\* Les références répertoriées dans le texte feront l'objet d'une liste en annexe

## **2. Motivation des demandeurs**

### **AGRO-TRANSFERT Ressources et Territoires :**

Agro-Transfert a acquis dans le cadre du projet GCEOS des compétences sur la modélisation de l'évolution de du statut organique des sols (en particulier, une bonne maîtrise du modèle AMG qui présente des atouts majeurs en regard des objectifs du présent projet) et sur l'aide à la décision et le conseil dans ce domaine. Ces acquis sont directement valorisables dans le cadre du présent projet pour élargir et enrichir le champ d'application d'outils développés et jusqu'à présent adaptés au contexte Picard et ainsi, pour les rendre effectifs dans d'autres régions et au service d'autres problématiques. De plus, la mise à profit de cette expérience, conjuguée à celles des autres partenaires du projet, permettra de susciter le développement d'outils et d'applications supplémentaires facilitant le conseil dans ce domaine, non seulement à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation, mais également à l'échelle de territoires plus larges, ce qui correspond à une orientation en développement au sein de la structure. Les sorties du projet seront valorisées dans le cadre des projets de transfert et des études d'Agro-Transfert intégrant une préoccupation de préservation de la qualité des sols cultivés.

### **ARVALIS-Institut du Végétal :**

ARVALIS Institut du Végétal intègre la préoccupation relative à la gestion du statut organique des sols, dans le champ de ses activités de recherche appliquée et de transfert depuis de nombreuses années.

Actuellement, l'institut est de plus en plus sollicité :

- pour évaluer les gisements de biomasse (pailles des céréales, cannes de maïs...), compatibles avec le maintien d'un statut organique correct, dans le cadre d'études pour la mise en place de filières de valorisation de la biomasse,
- pour intégrer la prise en compte du statut organique des sols dans les outils de gestion de la fertilisation face aux questionnements de plus en plus fréquents des producteurs de grandes cultures sur le statut organique de leurs sols et sur l'efficacité de différentes pratiques culturales (gestion des résidus, apports de composts, mise en place d'engrais verts...) en terme de maintien ou d'amélioration de ce statut organique.
- pour intégrer la dynamique de stockage du carbone dans les sols aux évaluations des performances des systèmes de cultures vis-à-vis de l'effet de serre

ARVALIS a développé de son côté sur tableur Excel®, un outil de calcul de bilan humique à long terme fondé sur les principes du modèle AMG tels que publiés par Andriulo et al (1999) puis Wylleman et al, 2001. Cette feuille de calcul a constitué une première approche pour répondre aux premières sollicitations, mais pour l'avenir ARVALIS souhaite disposer et contribuer à l'amélioration d'un outil actualisé des connaissances les plus récentes, consensuel, et applicable à l'échelle de la France dans une large gamme de systèmes de cultures. Ceci motive une volonté de rapprochement avec l'INRA, AGRO-TRANSFERT RESSOURCES et TERRITOIRES et LDAR qui ont réalisé une version récente d'un outil basé sur le modèle AMG à l'échelle de la région Picardie.

### **INRA :**

L'Unité INRA Agro-Impact (Laon-Mons) a pour mission d'étudier les impacts environnementaux des systèmes de culture relatifs aux cycles du carbone et de l'azote. Cette mission inclut notamment l'évaluation et la mise en œuvre de modèles de simulation de ces impacts, tels que ceux concernant les stocks de carbone organique des sols. Elle contribue au développement d'outils d'aide à la décision pour gérer le stock de carbone organique des sols agricoles. L'Unité a engagé des partenariats avec les 3 autres partenaires de ce projet depuis plusieurs années et souhaite poursuivre ces activités en particulier dans le cadre de ce projet

### **LDAR :**

Le LDAR, qui a intégré en 2001 la Station Agronomique de l'Aisne entretient de longue date une collaboration fructueuse avec l'INRA de Laon, dans le cadre d'expérimentations et d'études visant à mieux connaître les fondements agronomiques de la fertilité des sols cultivés, à mettre au point et à mettre en œuvre des outils d'aide à la décision pour en permettre une meilleure maîtrise.

Ainsi, le LDAR a participé à l'étude sur l'évolution du taux de matière organique des exploitations de Picardie (Wylleman, 1999) et s'est déjà fortement impliqué dans le programme « Gestion des matières

organiques » conduit par Agro-Transfert (GCEOS). Il est également intervenu de façon importante, par la fourniture de données d'analyses de terre structurées et documentées au service du projet CARTOPAILLES. Le LDAR a lui-même participé à la mise au point du « module matière organique » de l'outil RégiFert®, fondé également sur le modèle AMG.

Le LDAR, régulièrement sollicité par ses clients et partenaires (coopératives...) pour formuler des conseils sur l'évolution probable du taux de matière organique en fonction des pratiques culturales a donc développé une compétence certaine dans ce domaine et souhaite continuer à la faire progresser au service de ses activités de conseil agronomique.

### **3. Rappel des financements spécifiques déjà obtenus sur le sujet (montant, origine, date et, s'il y a lieu, références des comptes rendus réalisés)**

Les GCEOS et CARTOPAILLES ont été conduits en Picardie sur plusieurs aspects du sujet mobilisé dans le cadre du présent projet :

GCEOS, « Gestion de l'Etat Organique des Sols dans les exploitations agricoles de Picardie » est un projet régional (2004-2009), conduit par Agro-Transfert Ressources et Territoires, en partenariat avec l'INRA de Laon-Mons, Les Chambres d'Agriculture de Picardie, le LDAR, l'Institut Lasalle-Beauvais, la fédération régionale des experts fonciers et agricoles, la Fédération Régionale des Coopératives Agricoles de Picardie.

Le projet GCEOS a été financé de 2004 à 2007 par le Conseil Régional de Picardie et pour 2008 et 2009, par le Conseil régional de Picardie et le FEDER, pour un montant total de 379 790 euros.

CARTOPAILLES, « Caractérisation, mobilisation et cartographie des ressources en pailles de céréales et de lin oléagineux en Picardie » est un projet régional (2004 à 2007), porté par la Fédération Régionale des Coopératives Agricoles de Picardie, en partenariat avec l'INRA de Laon, ARVALIS Institut du Végétal, l'Institut Lasalle-Beauvais, la Chambre d'Agriculture de l'Aisne, Alternatech.

Le projet CARTOPAILLES a été financé de 2004 à 2007 par le conseil régional de Picardie et la Direction Régionale de Recherche et de la Technologie pour un montant total de 170 900 euros.

## **II - GAINS OU AVANTAGES ATTENDUS**

### **1. Intérêt scientifique**

- Amélioration de la précision et de la robustesse, et extension du domaine de validité du modèle AMG.
- Projet qui fédère les organismes et les équipes les plus dynamiques sur cette thématique.
- Développement d'outils d'aide à la décision à partir du modèle, de manière concertée par les partenaires du projet (continuité recherche –transfert, assurée).
- Constitution d'une base de données rassemblant l'ensemble des résultats d'expérimentations et de suivis de parcelles permettant d'évaluer l'impact de différentes techniques culturales et modes d'occupation du sol sur l'évolution des MOS.
- Validation d'une méthodologie de suivi du stock de carbone organique des sols qui sera proposée comme méthode de référence pour les futures études et qui permettra d'en fiabiliser les résultats.
- **Opportunité d'engager une thèse pouvant bénéficier d'une bourse CIFRE (Non)**
- **Opportunité d'engager une mobilité d'ingénieur dans le cadre de ce projet (Non).**

## 2. Intérêt socio-économique

- **Estimation de l'impact socio-économique de la mise en œuvre des résultats par la profession (exploitations agricoles et entreprises amont / aval) ; nature du gain**

L'impact socio économique peut être apprécié à 3 niveaux :

- **intérêt économique et environnemental au niveau des exploitations agricoles** : gestion plus précise du statut organique des sols dans un souci de préservation de « l'outil de production sol » à moyen et long terme. Meilleure appréciation des possibilités d'exportations de biomasse sans prise de risque à long terme sur la fertilité de ses sols et des stratégies pour entretenir ou améliorer leur statut organique.
- **intérêt économique au niveau des entreprises d'amont et d'aval. En aval**, pour les entreprises de **valorisation de biomasse** agricole par une meilleure quantification des bassins d'approvisionnement **En amont** pour les entreprises mettant sur le **marché des produits organiques normalisés** (compost...) par une meilleure connaissance des besoins (situations culturales valorisant les apports de produits organiques pour l'entretien organique des sols).
- **intérêt à la fois environnemental , économique et sociétal au niveau national : intérêt environnemental** par une quantification plus précise des potentiels de stockage de C dans les sols à l'échelle nationale, une prédiction plus fiable de l'évolution du statut organique des sols (couplage avec bases de données sols, RMQS, BDAT, IGCS) ; **intérêt économique** par l'apport d'éléments techniques pour raisonner le choix d'implantation d'unités de valorisation de biomasse ; **intérêt sociétal** par la mise à disposition d'éléments permettant de développer des argumentaires sur la durabilité de l'utilisation de biomasse agricole face aux préoccupations de la société.

## III - PLAN DE RECHERCHE

**1. Programme DETAILLE des travaux (méthodes, protocoles opératoires, justification de la voie de travail choisie, description des différentes phases du projet, répartition des tâches entre les partenaires sur chaque phase...)**

**- 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 1 : Partenaires impliqués :** ARVALIS, LDAR, Agro-Transfert, INRA (US1158 AGRO-IMPACT, UER TCEM Bordeaux)

**- 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.
  - *estimation des biomasses aériennes et racinaires (incluant les rhizodépôts) et des valeurs de  $k_1$  associées à ces couverts ;*  
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 Jaillière et de Jeu les Bois).
- 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, ..).
  - *estimation des biomasses aériennes et racinaires ; une attention particulière sera portée aux cultures pluriannuelles (ex : Switchgrass) et dans la mesure des références disponibles aux cultures pérennes (Miscanthus)*
  - *ajustement des  $k_1$  par rapprochement avec des cultures ligno-cellulosiques connues (ex. Maïs, Céréales à pailles).*
- 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.

**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  $k_1$  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 le N. Damay (LDAR) porte actuellement sur la possibilité d'estimer, via l'ISMO, le  $k_1$  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 compost de La Jaillière (ARVALIS) et de Jeu les Bois (ARVALIS & OIER) ; plusieurs essais avec apports répétés de PRO 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  $k_1$  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,...), qui concernent des zones de production agricoles importantes au plan économique où le développement de nouvelles filières appelle un conseil adapté pour des pratiques respectueuses de la qualité du sol à long terme (ex. exportation des pailles en Champagne pour leur valorisation énergétique)
- 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. Ce travail serait à réaliser en confrontant des simulations de jours normalisés avec STICS sur différents lieux, avec des indicateurs climatiques. L'amélioration de ce facteur permettra de mieux prendre en compte les situations irriguées.
- 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 particulaire, ...) 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.

**Partenaires impliqués** : AGRO-TRANSFERT, ARVALIS-Institut du Végétal et INRA.

## **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 ( $k_1$ ,  $k$ , ...). et d'autre 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.

**Partenaires impliqués** : AGRO-TRANSFERT, ARVALIS-Institut du Végétal et INRA.

## **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 pédo-climatiques 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.

**Partenaires impliqués** : AGRO-TRANSFERT, ARVALIS-Institut du Végétal et INRA

## **- 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 des agriculteurs particulièrement. 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 en 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 » à 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 requière 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 attentes de solutions concrètes concernant la gestion de l'état organique des sols de leurs exploitations, de leur secteur, de leur région...

A noter, en ce sens que ce projet permettra notamment d'apporter des compléments au projet CASDAR « Gaz à effet de serre et stockage de carbone en exploitations agricoles » piloté par l'Institut de l'Elevage (2007-2009) par le traitement de questions restées en suspens actuellement.

**Partenaires impliqués :** AGROTRANSFERT, LDAR et ARVALIS-Institut du Végétal

**- 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 AGROTRANSFERT et l'INRA et d'autre part par ARVALIS.

**Partenaires impliqués :** ARVALIS-Institut du Végétal, AGROTRANSFERT, LDAR et INRA

## **IV – RESULTATS ATTENDUS ET SUITES DU PROJET**

### **1 Résultats attendus :**

- modèle conceptuel AMG (formalismes et paramètres) partagé
- outils informatisés construits 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.

### **2 Valorisation et communication prévues (sur le projet, sur les résultats) :**

**Renseigner clairement les publications, séminaires, formations, autres modes de valorisation qui seront mis en œuvre, en précisant le public cible, les échéances.**

- 4 pages à destination des agriculteurs pour expliquer le bilan humique, et les conséquences à long termes de différentes pratiques culturales et systèmes de culture à prévoir en phase 4.
- 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 à prévoir à l'issue de la phase 3.
- Fiche technique sur le bilan humique AMG à destination des techniciens, à prévoir en phase 4.
- Dossier dans la revue perspectives agricoles sur la gestion de la MOS et le bilan humique, à prévoir en phase 4.
- Communication au colloque COMIFER-GEMAS de Blois en 2011 et 2013.
- Organisation d'un colloque COMIFER(-ACADEMIE d'AGRICULTURE) sur la gestion de la MOS en début 2013.
- Intégration des résultats du projet dans le document des bonnes pratiques de gestion de la MO des sols du CORPEN à prévoir en phase 4.

# Annexe :

## Liste bibliographique :

- 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*
- 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. Poster
- 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
- Hénin 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°4.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*, Quatrième 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](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.