

LE BILAN HUMIQUE AMG, POUR UNE DEMARCHE DE CONSEIL FONDEE SUR DES CAS-TYPES REGIONAUX

Annie DUPARQUE^a, Vincent TOMIS^a, Bruno MARY^{b1}, Hubert BOIZARD^{b2}, Nathalie DAMAY^c
en collaboration avec Olivier ANCELIN^d, Christian DERSIGNY^d, Jacques DURANEL^d, Laurent FLEUTRY^d

a : Agro-Transfert Ressources et Territoires, Domaine de Brunehaut 80200 ESTREES-MONS

b1 : INRA AGRO-IMPACT Laon-Mons Pôle du Griffon Pôle du Griffon, 180 rue Pierre-Gilles de Gennes, 02000 BARENTON-BUGNY

b2 : INRA AGRO-IMPACT Laon-Mons, Domaine de Brunehaut, Estrées-Mons BP 139, 80203 PÉRONNE

c : LDAR, Pôle du Griffon Pôle du Griffon, 180 rue Pierre-Gilles de Gennes, 02000 BARENTON-BUGNY

d : Groupe Régional Sols&MO des Chambres d'Agriculture de Picardie

Contexte et objectifs

Les risques de dégradation de la fertilité des sols et en particulier les conséquences d'une baisse des teneurs en matière organique sur le comportement physique, l'équilibre biologique ou la fourniture d'éléments minéraux aux cultures préoccupent les agriculteurs dans de nombreuses régions de grande culture.

Les agriculteurs font difficilement le bilan des intérêts et des limites des pratiques qui affectent l'état organique des sols : recours aux apports organiques en tant qu'amendements ou comme fertilisants ; exportation des pailles selon qu'elle participe à un échange avec le fumier d'un éleveur ou qu'elle répond aux besoins en plein développement du marché des ressources énergétiques ; diminution ou suppression du labour ; implantation plus ou moins régulière de cultures intermédiaires, ... De plus, il est impossible d'apprécier directement les effets de modifications de ces pratiques sur le sol ou les cultures puisqu'ils ne sont visibles qu'à long terme, au-delà de 10 ou 15 ans en général. Un conseil adapté à la diversité des situations agronomiques régionales (types de sols, de climat local, de systèmes de culture et de systèmes de production) doit être développé, et les professionnels agricoles veulent pouvoir disposer d'outils d'aide à la décision pour accompagner les choix des agriculteurs.

Le projet GCEOS (« Gestion et la Conservation de l'état Organique des Sols ») d'Agro-Transfert Ressources et Territoires a été conduit en région en Picardie (2004-2011) pour répondre à ces attentes (Duparque et al, 2007). Il avait pour objectifs principaux :

- (i) de faire évoluer le modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG (*du nom de ses auteurs Andriulo, Mary, Guérif, INRA de Laon*) et de l'intégrer dans un outil d'aide à la décision ;
- (ii) de développer les usages de l'outil, principalement au service du conseil individuel pour la gestion des matières organiques des sols à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, mais également pour la réalisation de diagnostics de l'évolution du statut organique des sols à plus large échelle ;
- (iii) de formaliser de façon concrète et illustrée, pour les besoins du conseil agricole, des éléments de connaissances sur le fonctionnement du sol, les rôles des matières organiques et leur dynamique d'évolution dans le sol et sur les principales bases de leur gestion à l'échelle de la parcelle agricole¹.

Les travaux présentés dans l'exposé qui suit se rapportent aux deux premiers objectifs. Ils concernent le développement d'une démarche de conseil fondée sur la mise en œuvre du bilan humique AMG et sur des cas-types régionaux. Les possibilités d'étendre les principes de cette démarche à d'autres usages sont ensuite examinées.

¹ Les documents correspondant au troisième point sont consultables sur le site <http://www.agro-transfert-rt.org>, rubriques : préservation des ressources naturelles / gestion et conservation de l'état organique des sols

I – Du modèle au conseil

I.1 – AMG : un modèle simple de calcul de bilan humique à long terme

Pour apprécier les effets des pratiques culturales sur l'évolution des teneurs en matières organiques des sols cultivés, un premier modèle simple de calcul de bilan humique a été proposé par S. Hénin et M. Dupuis (Hénin et Dupuis, 1945). Ce modèle décrit l'évolution des matières organiques « fraîches » apportées au sol et qui y subissent des transformations biochimiques appelées « humification ». Elles alimentent un compartiment unique de matières organiques du sol, avec un rendement d'humification appelé « coefficient isohumique » et noté k_1 , qui varie en fonction de l'origine des matières organiques fraîches considérées (espèce cultivée ; résidus aériens ou racinaires ; type d'amendement organique). L'ensemble de ces matières organiques humifiées subit une minéralisation dite « lente », de vitesse annuelle constante, notée k_2 , et variant en fonction du type de sol. Le modèle calcule la teneur en matière organique « d'équilibre » vers laquelle tend un sol de caractéristiques données, lorsqu'il est soumis à des itinéraires techniques et en particulier, à un régime de restitution organique constant sur une très longue durée.

Le modèle Hénin&Dupuis a été largement utilisé en France depuis sa création. Plusieurs séries de travaux ont permis d'en étendre et d'en tester le paramétrage, à partir de compilations de références bibliographiques, de suivis de parcelles agricoles en grand nombre ou de données expérimentales obtenues sur des essais de longue durée (Rémy et Marin-Laflèche, 1976 ; Boiffin et al, 1986 ; Mary et Guérif, 1994). Les travaux de l'INRA de LAON ont cependant montré que le modèle surestime les variations, positives ou négatives de stock d'humus du sol à long terme lorsque les entrées de matières organiques sont soit très élevées, soit très faibles (Mary et Guérif, 1994 ; Wylleman et Mary, 1999). Andriulo et al (1999) ont proposé le modèle AMG, dérivé du modèle Hénin & Dupuis, en scindant le compartiment d'humus du sol en deux parties : l'une formée des composés carbonés stables, dont le temps de résidence (~1000 ans) est très supérieur à la durée maximale des simulations réalisées (100 à 150 ans), l'autre, formant le pool de carbone dit « actif » du sol, qui seul est alimenté par les apports de carbone humifié et diminué par la minéralisation annuelle de cet humus et donc sujet à variations au cours d'une période de simulation.

Le modèle AMG se présente donc comme un modèle analytique simple, à deux compartiments de carbone du sol et à trois coefficients principaux, définis comme suit dans sa version actuelle :

- h : coefficient isohumique, dont la valeur (différente de celle du k_1 de Hénin&Dupuis) varie en fonction de la nature des résidus végétaux ou du type d'amendement organique,
- k : vitesse de minéralisation annuelle du carbone organique actif du sol, fonction du type de sol (teneur en argile vraie et en calcaire), du climat local (température moyenne annuelle, bilan hydrique annuel), de l'irrigation et du travail du sol (fréquence du labour, profondeur de travail),
- la part de carbone organique stable, qui est exprimée en fonction du carbone organique total du sol. Cette fraction représente 40 à 60 % du carbone total du sol d'après les travaux de paramétrage de Saffih et Mary (2008).

Comme le modèle Hénin&Dupuis, AMG fonctionne avec un pas de temps annuel. A cette échelle, les entrées de carbone organique dans le compartiment de carbone actif du sol correspondent à la somme des masses de carbone « frais » apportées par les amendements organiques et par les résidus aériens et racinaires des cultures, multipliées respectivement par les coefficients isohumiques associés :

Entrées annuelles de C organique humifié = $\sum m_i \cdot h_i$

Avec : m_i : masse de carbone frais du résidu de culture i ou de l'amendement i
 h_i : coefficient isohumique de la source de carbone frais i

La totalité du carbone entrant est supposée être soit décomposée, soit humifiée sur le pas de temps de un an.

Les flux sortants de carbone s'expriment comme le produit du stock de carbone actif du sol et du taux de minéralisation annuelle du carbone organique actif du sol :

Sorties annuelles de C organique humifié = $C_a \cdot k$

Avec : **C_a** : stock de carbone actif du sol
 k : taux de minéralisation annuelle (an-1)

d'où l'expression du bilan humique annuel (figure 1):

Variation du stock de C_{org} = $\sum m_i \cdot h_i - C_a \cdot k$

Intégrée dans le temps, l'équation permet de calculer le stock de carbone organique du sol au temps t :

Stock de C organique C_t =

$C_s + (C_0 - C_s) \cdot \exp(-k \cdot t) + (\sum m_i \cdot h_i) / k \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)]$

Avec : **C_s** : Stock de C organique stable du sol,
 C_0 : Stock de C organique total du sol
 au temps t_0

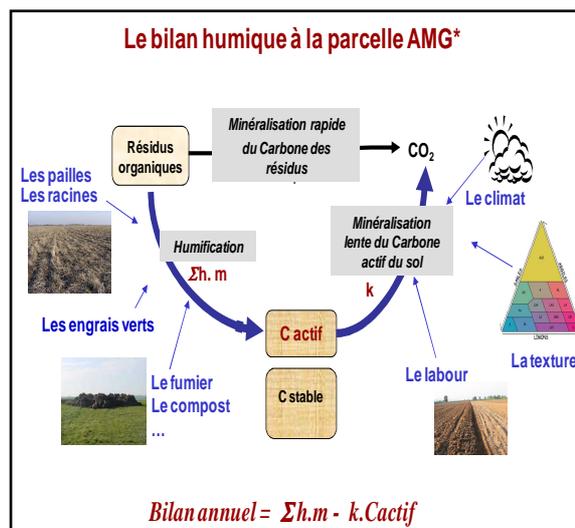


Figure 1 : Schéma fonctionnel du modèle AMG

Le modèle AMG a été testé et amélioré, sur des jeux de données internationaux, au cours de travaux portant directement sur l'estimation de ces paramètres (Andriulo et al, 1999 ; Mary et Wylleman, 2001 ; Saffih et Mary, 2008) ou, au cours du projet GCEOS, sur le calcul des biomasses de résidus sources de carbone entrant (harmonisation avec le calcul pratiqué dans AZOFERT ; Machet et al, 2007) et sur le mode de prise en compte du travail du sol (Tomis, 2007).

1.2 SIMEOS-AMG : outil de simulation informatisé intégrant AMG

L'outil SIMEOS-AMG, mis au point au cours du projet GCEOS permet la SIMulation de l'Evolution de l'état Organique du Sol à l'échelle d'une parcelle agricole. Chaque simulation correspond à un scénario décrit par le type de sol, le climat local et le système de culture.

Ainsi, sont demandés en entrée (figure 2) :

- les teneurs du sol en carbone organique, en argile vraie, en calcaire ; la densité de cailloux et la densité apparente,
- la profondeur de prélèvement de l'analyse de terre
- le type de travail du sol (labour, non labour) et la profondeur de travail connue ou estimée pour chaque année de la rotation
- la température et le bilan hydrique simplifié moyens annuels (P-ETP),
- le cumul des doses d'irrigation apportées par culture,
- les cultures de la rotation,
- les rendements bruts de ces cultures et le mode de gestion de leurs résidus (restitution ou exportation), ces informations permettant de calculer les entrées de carbone organique apportées par les résidus de cultures,
- la nature, la biomasse et la fréquence des cultures intermédiaires pratiquées,
- la nature, la fréquence et le rendement des cultures dérobées pratiquées,
- la nature, la dose et la fréquence des amendements organiques apportés,

Le système de cultures est supposé se reproduire à l'identique sur toute la durée choisie de la simulation.

Les données d'entrée, dans leur ensemble et les paramètres nécessaires au calcul sont soit facilement disponibles sur l'exploitation et saisies par l'utilisateur, soit retrouvées dans différents

catalogues de données (sols, climats régionaux, cultures et produits organiques) intégrés à l'outil et mobilisables au travers de menus déroulants ou par la consultation de tables de références.

Cultures:

	Culture	Rendement aux normes	Fréquence de restitution des résidus	Type travail du sol	Prof Travail du sol (cm)	Irrig. moy. (mm/ha/an)
1	Betterave sucrière (t)	85	Toujours restitués	Labour	25	0
2	Blé hiver (q/ha)	80	Toujours exportés	Non Labour	12	0
3	Féverole (q/ha)	45	Toujours restitués	Labour	25	0
4	Blé hiver (q/ha)	80	Toujours restitués	Non Labour	12	0
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Saisie des fréquences de cultures (optionnel)

Cultures intermédiaires:

	espèce	Biomasse	Fréquence
1	Moutarde	Moy + (2 à 4)	1 an sur 4
2			
3			
4			

Cultures dérobées:

	Espèce	Rendement	Fréquence
1			
2			
3			
4			

Produits organiques:

	Type	Dose	Fréquence
1	Vinasse (t/ha)	3	1 an sur 4
2			
3			
4			

Données sol:

Données sol	
Argile (g/kg):	165
CaCO3 (g/kg):	5
Cailloux (%):	0
Densité apparente:	1.4
C organique (g/kg):	10
Teneur MO (%):	2

Profondeur de prélèvement pour l'analyse de terre (cm): 30

Climat:

Données climat	
ETP Annuelle (mm):	645
Pluie Annuelle (mm):	700
Température moyenne annuelle (°C):	11

Figure 2 : Ecran de saisie des données d'entrée. Outil SIMEOS-AMG (Agro-Transfert-RT et INRA).

En sortie du calcul, l'outil produit :

- les valeurs de stocks en carbone organique sur la « profondeur de la couche arable » définie comme étant la plus élevée des deux valeurs : profondeur du prélèvement pour l'analyse de terre ou profondeur de travail du sol la plus importante au cours de la rotation ;
- les valeurs de teneur en carbone organique du sol, sur la couche travaillée la plus profonde au cours de la rotation (le travail du sol homogénéise en effet la concentration en matières organiques jusqu'à cette profondeur).

Ces valeurs permettent de retracer l'évolution de l'état organique du sol sur des périodes allant de 2 ans à 100 ans. Ces évolutions sont représentées graphiquement pour des périodes de durée modulable entre 20 et 100 ans (figure 3).

- le stock de carbone organique obtenu à l'équilibre du système
- la répartition des teneurs dans le profil de la couche arable à l'échéance choisie

Les scénarios simulés peuvent être ensuite sélectionnés et comparés graphiquement.

Dans sa première version opérationnelle actuellement, l'outil est disponible sur PC. La nouvelle version sera disponible via Internet dès 2012.

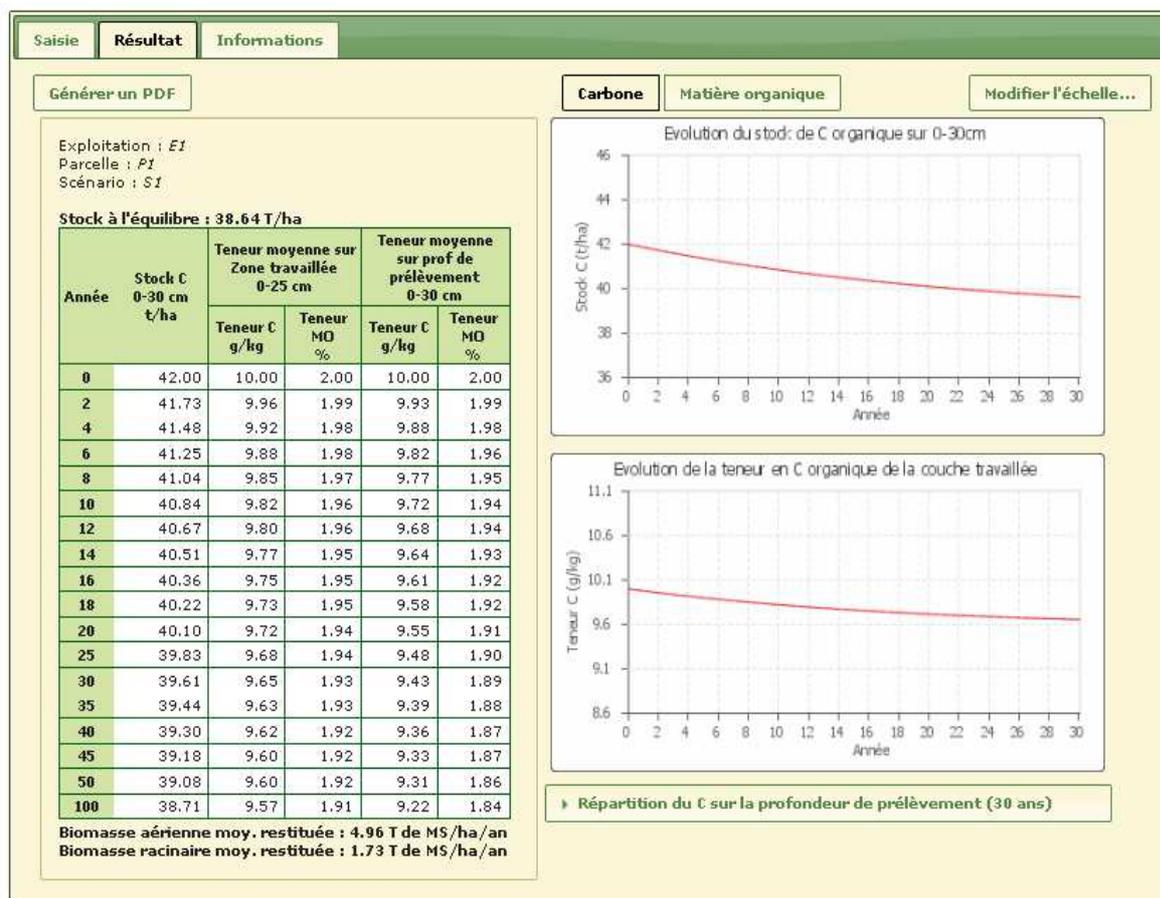


Figure 3 : Etats de sorties à l'écran - Outil SIMEOS-AMG (Agro-Transfert-RT et INRA)

I.3 : Un outil d'aide à la décision, instrument du conseil

L'outil de simulation SIMEOS-AMG est conçu pour être mis en œuvre par les conseillers agricoles directement avec les agriculteurs.

La réalisation des saisies et des simulations étant rapide, l'outil peut être utilisé de façon très didactique :

Dans un premier temps, en partant de cas réels connus sur l'exploitation et en les déclinant en plusieurs variantes théoriques, les simulations permettent d'appréhender comment varie l'état organique du sol en fonction des différents facteurs, naturels et en fonction des leviers agronomiques maîtrisables sur l'exploitation.

Elles permettent ensuite d'évaluer l'effet des pratiques actuelles dans les différents types de parcelles de l'exploitation. Le diagnostic s'appuie alors principalement sur la dynamique révélée par les courbes d'évolution (hausse, stagnation ou baisse) et sur ce que l'agriculteur connaît du comportement du sol des parcelles examinées (battance fréquente ou non en sols légers ; difficulté de travail du sol en sols argileux ; problème d'infiltration de l'eau ; ..).

Enfin, l'agriculteur peut visualiser l'effet à long terme de pratiques alternatives comparées à celles qu'il applique. L'examen des coûts, des contraintes matérielles ou d'organisation du travail rattachés aux différents choix techniques envisagés peut alors accompagner ces comparaisons et permettre d'établir le conseil attendu, en l'adaptant au contexte de l'exploitation, aux moyens et aux objectifs de l'agriculteur.

Pour compléter et élargir la portée du conseil individuel permis par l'outil de simulation, une démarche de conseil a été formalisée. Elle est fondée sur la définition de cas-types, adaptés aux problématiques de gestion de l'état organique du sol en région Picardie et mobilise l'outil de simulation.

II – Des cas-types régionaux pour une démarche de conseil sur la gestion de l'état organique des sols en Picardie

La démarche de conseil construite en Picardie a été établie avec l'objectif d'offrir aux professionnels agricoles une gamme de situations de référence couvrant les principales problématiques de gestion des matières organiques dans les exploitations de la région, analysées via AMG, diagnostiquées et assorties de préconisations d'adaptation des pratiques culturales courantes pour optimiser la gestion de l'état organique des sols.

II . 1 Principes et étapes de construction de la démarche de conseil

La première phase du travail a été réalisée en collaboration avec les conseillers agricoles spécialisés des chambres d'agriculture de Picardie et d'après les informations recueillies sur des cas concrets d'exploitations en région par une enquête et par la base de données d'analyses de terre du Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche de l'Aisne (LDAR) renseignant le type de sol, l'assolement et les apports organiques sur plus de 3500 parcelles analysées entre 1997 et 2005.

Elle a consisté à établir une typologie croisée des systèmes de culture et des sols régionaux.

En termes de restitution de résidus de cultures, les systèmes de culture se classent des plus pauvres, (rotations riches en légumes et pommes de terre, pauvres en céréales à pailles, maïs grain ou colza), aux plus riches en cultures annuelles productrices de résidus ligno-cellulosiques (rotations céréalières avec Colza). S'ajoutent à cette gamme, les systèmes fréquents en exploitations de polyculture-élevage (comportant notamment du maïs ensilage) et les systèmes rencontrés en agriculture biologique.

Les grands types de sols retenus sont distingués selon leur teneur en argile vraie et en calcaire. Les plus pauvres en ces deux éléments connaissent les taux de minéralisation de l'humus les plus forts. Dans les sols les plus riches en ces éléments (ex. sols argilo-calcaires), la minéralisation de l'humus est très ralentie.

Croisant les facteurs principaux de variation des entrées et des sorties du bilan humique, la typologie ainsi construite fournit une large gamme de situations agronomiques représentant les grandes tendances de variations des états et des dynamiques d'évolution des stocks de carbone organique des sols observables en région Picardie. Elle renvoie aussi aux principales problématiques de gestion des matières organiques en région, allant de systèmes très intensifs sur des sols sensibles à la battance (rencontrés dans le Ponthieu, le Laonnois ou le Santerre) où l'on recherche des sources d'amendements organiques à apporter, à des systèmes à forte dominante céréalières, sur des sols superficiels sur craie ou argilo-calcaires (bordures de plateaux ou Tardenois) dans lesquels se pose la question d'une exportation raisonnée des pailles.

Dans une deuxième phase, une gamme différenciée de préconisations visant une gestion adaptée des matières organiques, a été établie pour chaque cas-type, en plusieurs étapes :

- (i) Les conséquences des pratiques culturales associées à chacun des cas-types, sur l'évolution à long terme de l'état organique du sol, ont été évaluées via l'outil SIMEOS-AMG. La teneur en carbone organique initiale du sol retenue dans chaque cas pour réaliser ces simulations a été déterminée en réalisant une partition des analyses de terre de la base de données du LDAR suivant les critères mêmes et les seuils de définition des cas-types. C'est la valeur médiane de la distribution des teneurs en carbone organique du sol correspondant à chaque cas-type qui a permis de calculer le stock initial nécessaire pour réaliser la simulation.

L'interprétation des courbes obtenues repose sur une double règle de décision :

- Le maintien au minimum de l'équilibre du bilan humique pour éviter le déstockage du carbone organique présent dans le sol ;
- La recherche d'une teneur en carbone organique au moins égale à la teneur initiale, c'est à dire la médiane de chaque classe de cas-type.

- (ii) Les résultats de ces simulations ont permis d'orienter le choix et l'analyse des scénarios de correction ou d'évolution des pratiques à proposer. Les scénarios mobilisent les différents leviers de gestion des matières organiques du sol connus – apports de produits organiques, implantation de cultures intermédiaires, modification de la succession culturale, réduction du travail du sol, gestion des résidus de culture – pour tester les effets de modifications des pratiques culturales. Ces modifications sont proposées soit comme des solutions pour corriger une évolution défavorable de l'état organique du sol induite par le système de départ, soit dans le but d'évaluer l'impact d'une nouvelle pratique.
- (iii) Une enquête a été réalisée auprès d'agriculteurs concernés par les différents cas-types étudiés afin d'évaluer la recevabilité des changements de pratiques préconisés.
- (iv) Une estimation économique des différentes stratégies de gestion des MO recommandées à l'aide de SIMEOS-AMG a été faite avec l'outil économique développé par le groupe "Sols&MO" des Chambres d'Agriculture de Picardie, afin d'évaluer l'acceptabilité des coûts directs des changements proposés (avance en trésorerie nécessaire) et d'estimer les bénéfices économiques directs sur l'année à parc matériel équivalent.
- (v) Un répertoire de préconisations de gestion des matières organiques, adapté à chaque cas-type a été établi, en tenant compte des contraintes liées au système de culture (contraintes agronomiques, organisationnelles et économiques), des atouts et limites des leviers d'actions disponibles, et des règles de décision fixées pour l'interprétation des résultats de SIMEOS-AMG.

Les préconisations ainsi produites ont finalement été examinées et validées par les conseillers agricoles.

II. 2 Résultats

La construction de la démarche de conseil a permis de distinguer cinq groupes de systèmes correspondants à différentes problématiques de gestion des matières organiques à traiter (tableau 1) :

Tableau 1 : Systèmes de culture identifiés et problématiques de gestion des matières organiques associées

Systèmes de culture	Diagnostic de l'état organique du sol par SIMEOS-AMG	Principales problématiques identifiées
Systèmes légumiers intensifs	Détérioration de l'état organique du sol + problèmes de battance, d'érosion...	Comment redresser le statut organique du sol ?
Systèmes équilibrés « plantes sarclées – céréales »	Bilan humique souvent équilibré mais... /!\ problèmes de comportement du sol	Comment viser une augmentation des teneurs en MO ?
Systèmes céréaliers	Bilan humique positif	Quelles possibilités d'exportation des pailles ?
Systèmes polyculture – élevage	Bilan humique positif	Quelle répartition des épandages d'effluents d'élevage ?
Systèmes en agriculture biologique	Bilan humique équilibré	Comment augmenter le pool d'azote organique du sol ?

La principale problématique dans le cas des **systèmes équilibrés "plantes sarclées – céréales"**, concerne le choix de pratiques culturales qui permettent d'augmenter les stocks et les teneurs en matières organiques dans les situations fragiles, où ils sont faibles actuellement et où des accidents de structure sont observés.

En **systèmes céréaliers**, les entrées de carbone du sol par les résidus de culture conduisent en tendance majeure à une évolution croissante du stock de carbone organique du sol. Les modifications des pratiques envisageables visent principalement :

- à optimiser le niveau d'exportation des pailles : si l'agriculteur souhaite bénéficier du retour financier correspondant, des possibilités intéressantes d'exportation existent en effet généralement dans ces systèmes en Picardie, sans risque pour l'état organique du sol. Les adaptations nécessaires et envisageables des pratiques culturales sont explorées.
- à étudier la conséquence du travail du sol réduit sur l'évolution du stock de C et de la teneur en surface.

L'enjeu central d'une bonne gestion des matières organiques en **systèmes d'agriculture biologique** est le maintien de la fertilité des sols, et en particulier de leur capacité à fournir, en priorité de l'azote, mais également les autres minéraux indispensables (dont phosphore, potassium, oligoéléments,...) de façon régulière et durable aux cultures. Les suggestions de pratiques proposées visent principalement à augmenter le pool de matière organique du sol, en cherchant à entretenir et à renforcer la fourniture d'azote. Les leviers mobilisables sont l'apport de produits organiques, les échanges pailles-fumier, l'implantation d'engrais verts comportant des légumineuses, la recherche de l'équilibre optimal entre espèces consommatrices et espèces pourvoyeuses d'azote dans la rotation culturale, pour assurer une meilleure régularité des rendements et ainsi celle des masses de résidus de récolte revenant au sol. L'impact sur l'état organique du sol de pratiques de travail du sol pour préserver l'activité biologique est également illustré.

Le traitement des questions identifiées pour chaque grand type de système est illustré de façon détaillée pour les **systèmes Légumiers intensifs et Polyculture-Elevage** dans ce qui suit.

Cas des systèmes légumiers

Ces systèmes intensifs, comportent de nombreuses cultures industrielles, notamment légumières, implantées dans des sols à texture sableuse à sablo-limoneuse préférée par les industriels pour y réaliser des récoltes précoces. Les restitutions humiques par les résidus de culture y sont faibles. Ces sols légers, travaillés en général profondément pour corriger les tassements subis lors des chantiers de récolte réalisés en conditions humides, sont propices à une minéralisation rapide du stock de carbone organique humifié. La faible restitution humique et la forte minéralisation engendrent une détérioration de l'état organique du sol alors même que les teneurs et stocks en matières organiques du sol sont faibles.

Les suggestions de modification des pratiques proposées tiennent compte des contraintes liées au système de culture et au type de sol :

- faible restructuration naturelle en sols pauvres en argile, donc réduction du travail du sol délicate,
- Interdiction des épandages de boues et composts de déchets industriels ou urbains par les contrats légumiers des industriels,
- choix restreint des espèces d'engrais verts, pour éviter le développement des maladies des légumes qui peuvent être favorisées lors de la décomposition des résidus dans le sol.

Plusieurs stratégies d'adaptation des pratiques peuvent être employées, adaptées aux contraintes du système et aux objectifs de l'agriculteur (figure 4) :

- Volonté d'investir économiquement pour enrayer la baisse des teneurs et stocks en C organique des sols (préconisation A) par des apports de produits organiques massifs ;
- Volonté d'investir peu, en modifiant en priorité les pratiques culturales avec les moyens présents sur l'exploitation (préconisation B) : réduction progressive du travail du sol, implantation d'un engrais vert supplémentaire et apport de compost à dose raisonnable ;
- Volonté de reconquête de la fertilité des sols vers des teneurs en C organique plus acceptables (préconisation C) : viser une nette amélioration de l'état organique du sol en mettant en œuvre les bases de l'agriculture de conservation des sols, avec le recours au non labour, aux engrais organo-minéraux, à l'implantation systématique de cultures intermédiaires et à l'allongement de la rotation culturale avec l'ajout d'un blé pour augmenter les restitutions humiques. Cette stratégie nécessite cependant une technicité accrue pour la maîtrise des tassements et la gestion du désherbage et des ravageurs.

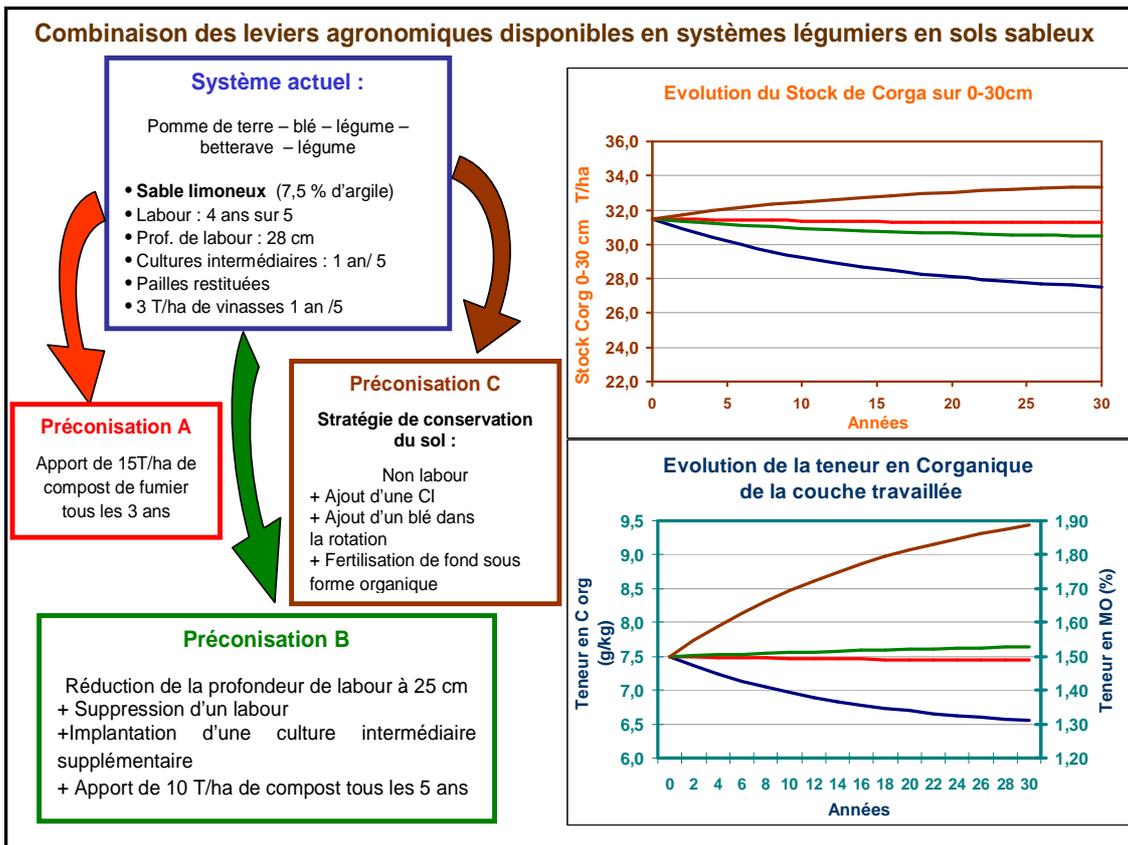


Figure 4 : Synthèse des préconisations de gestion des matières organiques pour les systèmes légumiers intensifs en sols sableux

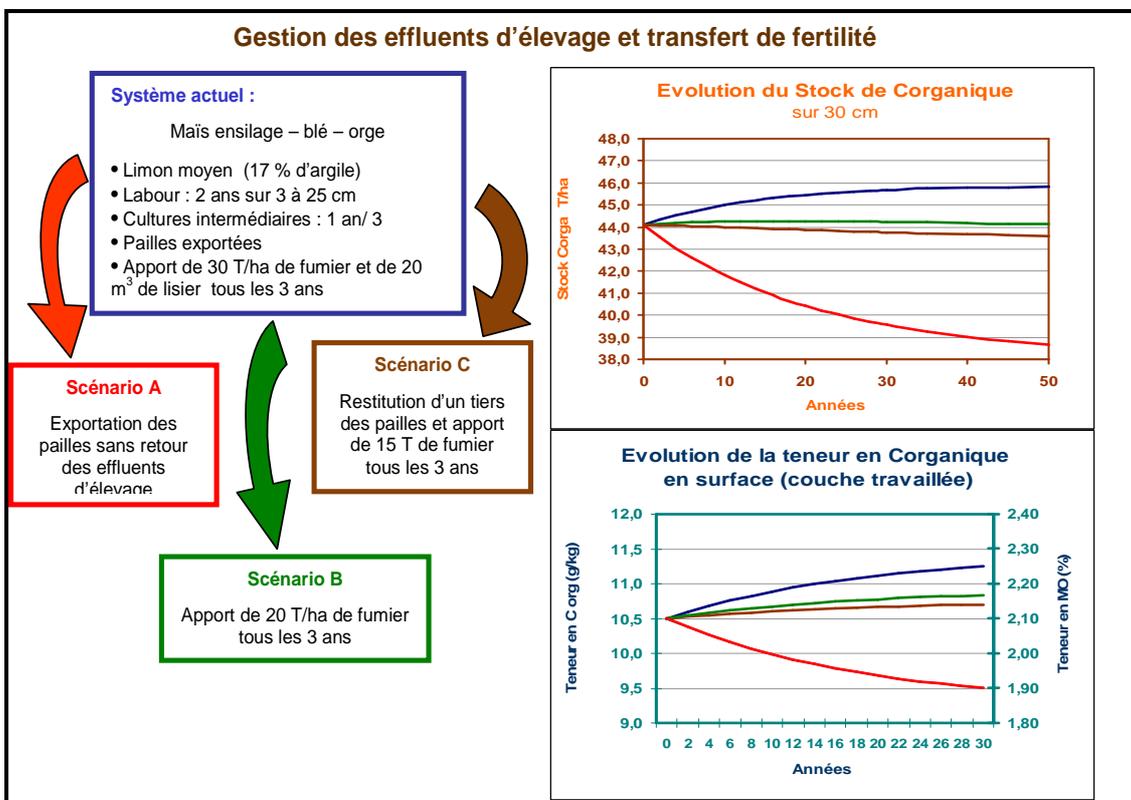


Figure 5 : Gestion des effluents d'élevage et transfert de fertilité en systèmes de polyculture élevage

Cas des transferts de fertilité en systèmes de polyculture élevage

En systèmes de polyculture-élevage, les quantités d'effluents d'élevage produites sur l'exploitation permettent généralement des retours organiques au sol suffisants pour garantir un bilan humique positif. Cependant, certaines pratiques induisent des transferts de fertilité, lorsque la répartition des épandages d'effluents d'élevage interne à l'exploitation n'est pas raisonnée pour préserver la fertilité des sols. Une dégradation progressive du statut organique du sol peut alors être observée dans certaines des parcelles de l'exploitation, souvent éloignées du corps de ferme : les pailles sont en effet le plus souvent prélevées sans que cette exportation de matière organique ne soit compensée par un apport d'effluents d'élevage.

- Le scénario A (figure 5) illustre le cas où les pailles seraient exportées sans aucun retour d'effluents d'élevage. Cette situation conduit à une détérioration importante de l'état organique du sol.
- Sur les autres parcelles de l'exploitation où se font régulièrement les épandages d'effluents d'élevage, le stock de carbone organique du sol augmente avec le retour du fumier (système actuel de la figure 5) : il est possible, sans risques pour l'état organique de celles-ci, de rediriger une partie des effluents apportés à ces parcelles vers les autres parcelles qui ne reçoivent rien : un apport de 20 T/ha de fumier tous les 3 ans (scénario B) permet d'équilibrer le bilan humique.
- Si les apports d'effluents sont difficiles à réaliser car les parcelles ne sont pas facilement accessibles, une restitution d'une partie des pailles est nécessaire pour effectuer un retour du fumier en plus faible quantité (scénario C). Si pour des raisons de logistique, aucun apport d'effluent ne peut être réalisé, alors il est préférable de ne pas exporter les pailles.

Sont aussi traités, dans le cadre de ce système, les échanges de fumier contre de la paille avec un autre exploitant, équitable au plan agronomique.

L'ensemble de la démarche de conseil est présentée dans le classeur restituant les sorties du projet GCEOS, sous la forme de cinq dossiers, associés respectivement aux cinq grands systèmes identifiés.

Chaque dossier est composé :

- d'un triptyque, illustrant le diagnostic d'une ou de deux variantes du système générique, listant et commentant les problématiques associées et montrant au travers de témoignages les points de vue d'agriculteurs enquêtés,
- d'une série de fiches synthétiques illustrant les leviers d'action mobilisables pour faire évoluer les pratiques, les conséquences de ces changements sur l'état organique du sol, leurs intérêts et limites plus généraux et fournissant une évaluation économique comparée des scénarios de changement envisagés.

La démarche permet d'accompagner les actions de sensibilisation et de formation des conseillers agricoles auprès de groupes d'agriculteurs et peut aussi être utilisée pour introduire un conseil personnalisé tel que décrit plus haut.

Elle offre également aux responsables professionnels agricoles la possibilité d'apprécier les variations des tendances d'évolution de l'état organique des sols selon les systèmes de culture et les types de sols principaux représentés en région, en vue potentiellement d'orienter des politiques de gestion de cette ressource, notamment dans le cadre de programmes de mobilisation de biomasses végétales pour des usages industriels – dès lors qu'une partie importante des résidus ne retourne pas au sol – ou d'épandages raisonnés de produits organiques résiduels, à l'échelle de territoires.

III – Transposition de la démarche dans d'autres régions, à d'autres échelles ou pour d'autres usages : exemples et discussion sur la méthode

Le principe du couplage d'une typologie régionale, croisant systèmes de culture et types de sols avec la mise en œuvre du modèle AMG a été repris et adapté dans le cadre de plusieurs études, au service d'applications proches de la démarche de conseil présentée ou plutôt tournées vers le diagnostic des états organiques ou des flux de carbone organique à l'échelle de territoires ou de filières agricoles.

L'application de la méthode en Picardie et surtout, sa transposition à d'autres régions, à des échelles supérieures à celle de la parcelle et/ou à d'autres usages, ont mis en évidence l'intérêt de la démarche mais aussi ses limites dans ces différents contextes. Des adaptations ont été nécessaires ou restent à étudier. Elles portent sur trois aspects : (i) l'adaptation du mode d'établissement de la typologie, en fonction des données (sol et systèmes de culture) disponibles pour la région et l'échelle d'application choisies ; (ii) une meilleure connaissance des incertitudes sur les résultats des simulations réalisées avec AMG en fonction de la qualité des données d'entrée accessibles (données sol sur argile et carbone organique en particulier) ; (iii) les règles d'interprétation des sorties du modèle pour établir un diagnostic puis un conseil.

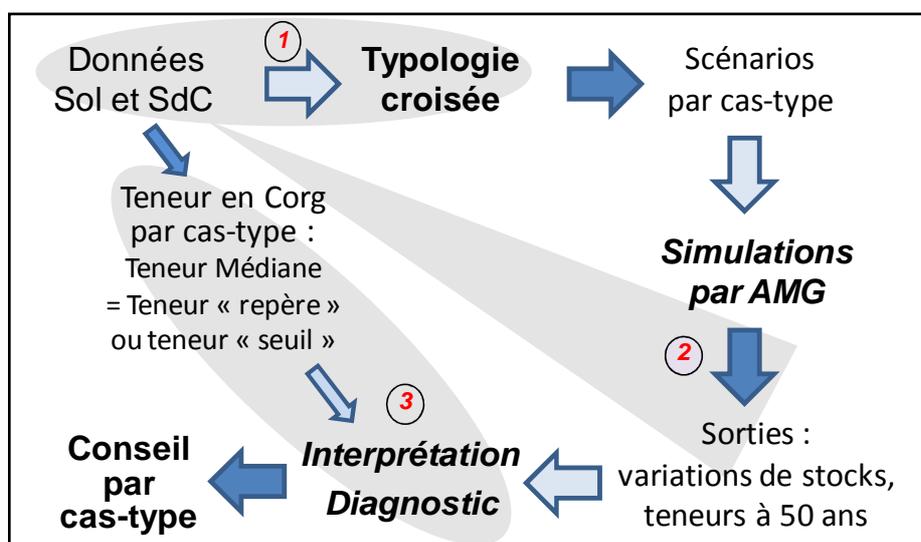


Figure 6 : Démarche de conseil fondée sur la mise en œuvre couplée d'une typologie régionale sol x Système de culture et d'AMG : chaîne de traitement de l'information et points d'adaptation nécessaires n°1 pour transposer la méthode

Les différents cas actuels d'application de la méthode permettent d'illustrer et de discuter ces trois points.

Applications à la construction de guides d'exportation raisonnée des pailles de céréales

La typologie Picarde couplée à la mise en œuvre du modèle AMG a été utilisée dans le cadre même du projet GCEOS et en lien avec un autre projet régional, CARTOPAILLES, porté par la Fédération Régionale des Coopératives Agricoles de Picardie, pour établir un guide de conseil sur les possibilités d'exportation des pailles à la parcelle, sans risques pour la fertilité des sols à long terme². Dans ce cas, la construction des cas-types 1 et des jeux de données d'entrée pour AMG 2 ont bénéficié de la base de données d'analyses de terre du LDAR, qui a fourni sur plus de 3000 parcelles, toutes les données utiles sur les sols (notamment les teneurs en argile vraie, obtenues après décarbonatation lorsque le sol est calcaire) et, parcelle par parcelle, l'information sur les espèces cultivées pendant 5 années successives qui a permis de reconstituer les rotations culturales correspondantes.

² 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 le site www.agro-transfert-rt.org

10^{èmes} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS - REIMS - 23-24 novembre 2011

Pour chaque cas-type, les taux d'exportation de pailles permis sans risque pour l'état organique des sols ont été déterminés en simulant l'évolution des stocks et des teneurs en carbone organique du sol sur une période de 50 ans, pour plusieurs hypothèses de teneurs initiales en carbone du sol réparties autour de la teneur médiane, et en appliquant à l'interprétation des courbes la double règle de décision présentée précédemment : (i) non déstockage du carbone organique du sol présent dans le sol (critère environnemental) ; (ii) teneur en carbone organique au moins égale à la teneur médiane, choisie comme « repère » et utilisée comme une « teneur seuil minimum », en deçà de laquelle les risques de dégradation des propriétés physiques du sol sont considérés comme importants (critère agronomique) ³ (figure 7).

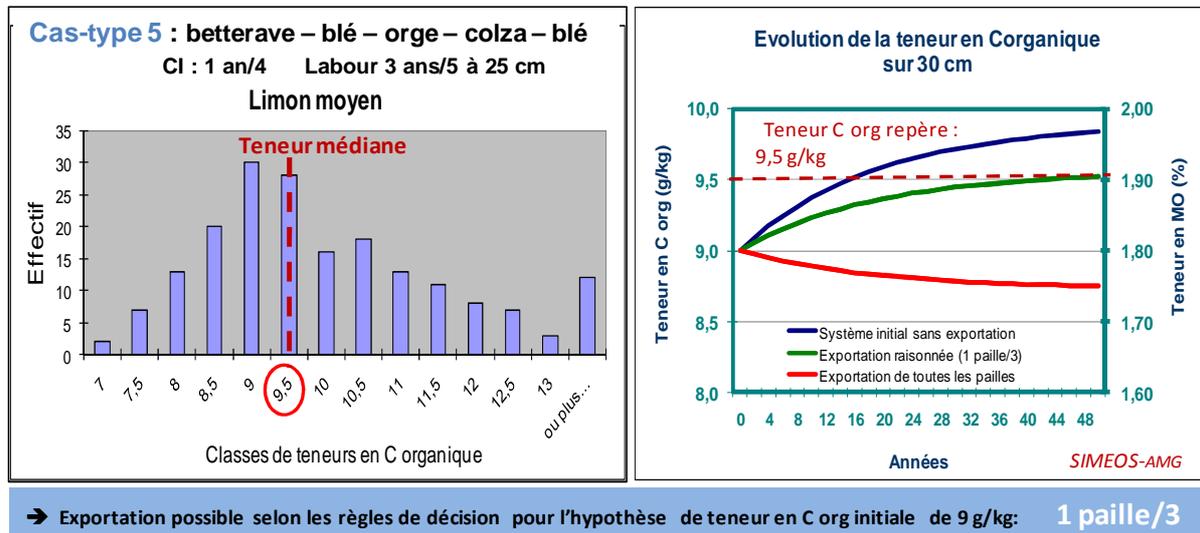


Figure 7 : Raisonnement du taux d'exportation de pailles permis pour un cas-type et une hypothèse donnée de teneur initiale en carbone organique du sol
Exemple tiré du Guide d'exportation des pailles Picardie, 2008 (FRCA Picardie et al, 2008)

Dans ce cas du travail réalisé en Picardie, les distributions de valeurs de teneurs en Carbone organique associées aux différents cas-types, et donc les teneurs médianes de ces distributions, se distinguent bien et s'ordonnent de façon logique suivant l'effet attendu des types de sols et des systèmes de culture (effets des teneurs en argile et en calcaire et du niveau d'entrée de carbone organique par les restitutions). Ce résultat tient vraisemblablement au fait que, dans une majorité de situations dans cette région de grandes cultures industrielles et céréalières, les types de systèmes de culture pour un type de sol donné sont stables depuis une période suffisamment longue pour avoir marqué leur effet de façon 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) pour fixer les valeurs des teneurs en carbone organique « repères » qui interviennent dans la détermination du taux d'exportation possible des pailles.

En 2010-2011, une seconde étude a été conduite pour créer le même type de guide en région Champagne-Ardenne (Edition par la FRCA Champagne-Ardenne pour décembre 2011) ³. Trois grands types de zones d'étude ont été traités : la zone des sols de craies de Champagne ; la zone du Barrois, avec une majorité de sols argilo-calcaires et une zone plus dispersée, comportant une plus grande variété de sols, comparable à celle rencontrée en Picardie.

Les bases de données nécessaires à la construction des typologies pour ces trois zones et aux simulations par AMG ont été construites à partir d'extraits de bases d'analyses de terre fournis par les coopératives partenaires et par le LDAR. Plusieurs difficultés ont été rencontrées dans cette phase du travail, pour rassembler les jeux de données adéquats ^{1 2}. Un grand nombre des analyses disponibles ont dû être écartées de l'étude pour trois raisons principales :

- l'absence de mesures de la granulométrie, donc en particulier du taux d'argile ;

³ 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 .

- le nombre fréquent de cas où le taux d'argile vraie n'est pas connu en sols calcaires, car les analyses granulométriques ont été faites sans décarbonatation préalable : le taux d'argile déterminé est alors surestimé du fait qu'une partie du calcaire (particules très fines) est comptabilisée artificiellement dans la fraction d'argile granulométrique. Cette pratique est notamment largement répandue en sols de craie.
- les informations sur les systèmes de culture, directement associées aux analyses de terre données sont manquantes ou insuffisantes (nombre d'années renseignées trop faible) pour reconstituer des rotations types sans risque trop important d'erreur ; et dans les zones à forte concentration de systèmes de polyculture-élevage, les informations sur les apports d'effluents organiques peuvent être incomplètes ou peu sûres.

Concernant la détermination de la teneur en carbone organique repère par cas-type³ (règle d'interprétation « agronomique ») les différences de distributions des valeurs de teneur en carbone organique, et donc de teneurs médianes, ne sont sensibles qu'entre types de sol et non, entre systèmes de culture au sein d'un type de sol (sauf dans le cas des sols limoneux). Contrairement à ce qui semble caractériser la Picardie, dans cette région d'étude, les systèmes de culture relevés actuellement ne reflètent pas un passé culturel très ancien des parcelles. Les cas de retournement de prairie réalisés dans les années 90 sont fréquents, dans le Barrois par exemple et dans de nombreuses zones de sols argileux. La dynamique d'évolution particulière (notamment très lente) dans les craies de Champagne fait probablement que l'effet des systèmes de culture qui y sont rencontrés n'est pas encore très marqué, même s'ils sont en place depuis plusieurs décennies. Dans de nombreux cas, l'état organique des sols de ces zones serait donc plus loin de l'état d'équilibre que dans une région comme la Picardie. Il est à noter aussi que la gamme de variation des quantités de carbone restituées par les différents systèmes de culture considérés est plus restreinte qu'en Picardie.

D'après ces constats, la règle de décision agronomique s'appuie ici sur les teneurs en carbone organique médianes par type de sol et non par cas-type [système de culture x sol]. Appliqué dans le cas de l'étude Picarde, ce choix aurait modifié les décisions d'exportation possible de pailles à la parcelle.

Au-delà de ces constats, c'est la définition même de ce « repère » qui peut être mis en question. Prise actuellement comme égale à la médiane de chacun des cas-types, cette teneur « repère » est utilisée comme un « seuil », séparant les situations à risques reconnus de perte de fertilité des sols (cas où la teneur est inférieure à la médiane du cas-type) des situations considérées comme non risquées. De fait, cette hypothèse n'a pas les mêmes chances d'être vérifiée quel que soit le cas-type considéré. Par exemple, il pourrait être judicieux de fixer cette teneur à une valeur supérieure à la médiane en sols sablo-limoneux, et à une valeur inférieure à la médiane du cas-type en sols argilo-calcaires. L'influence d'un tel ajustement de la teneur repère sur les résultats du diagnostic sont à examiner, même si la pertinence de ce choix reste difficile à tester.

En effet, idéalement, il devrait s'appuyer sur les relations connues entre les teneurs en matières organiques des sols et leurs propriétés physiques. Or, il n'existe pas de seuils universels de teneur qui puissent rendre compte et quantifier l'influence des matières organiques sur l'ensemble des propriétés physiques déterminant la qualité agronomique des sols (Loveland et Webb, 2003). Des travaux récents sur les relations entre paramètres analytiques des sols (dont la teneur en carbone organique) et la stabilité structurale (Chenu et al, 2011) fournissent des pistes de progrès sur ce point.

Cette réflexion doit être poursuivie, notamment dans le cadre du projet national en cours sur AMG (cf poster présenté au cours de ces journées COMIFER-GEMAS : Bouthier et al, 2011), dont un des axes prévoit d'approfondir cette question pour affiner les règles d'interprétation des sorties du modèle.

Application au développement de méthodes d'Analyses de Cycles de Vie

Les cas-types de la typologie Picarde et AMG sont aussi mobilisés pour le développement de méthodes d'ACV sur les productions agricoles dans la région. Les variations de stock de carbone du sol évaluées par le modèle et converties en équivalent CO₂ sont intégrées à l'impact « changement climatique ». Ainsi la méthode ACV développée prend en compte le stockage ou déstockage de carbone des sols agricoles dans l'évaluation des impacts des produits d'origine agricole (Travaux de l'équipe de C. Godard, Agro-Transfert Ressources et Territoires ; publication en cours). Elle est en particulier testée actuellement dans le cadre du développement de nouvelles filières de production de biomasses à vocation non alimentaires.

Dans le cas de cette application, les cas-types sont repris et utilisés tels qu'ils ont été construits pour les besoins de la démarche de conseil par cas-type, c'est-à-dire, comme des références régionales synthétiques établies en cohérence avec les principes du bilan humique AMG. Les teneurs en carbone organique médianes par cas-type servent de teneurs initiales pour les simulations réalisées avec AMG. Les résultats des simulations permettent de calculer un indicateur estimant la contribution d'une culture donnée, insérée dans une rotation et sur un type de sol déterminés, au stockage ou déstockage de carbone du sol.

L'évaluation de la sensibilité de l'indicateur calculé aux variations de la teneur en carbone organique initiale retenue pour les simulations est une piste d'amélioration de la méthode à explorer.

Application au diagnostic de l'évolution de l'état organique à long terme, spatialisé à l'échelle de territoires agricoles larges

Les difficultés rencontrées pour transposer l'expérience menée en Picardie à d'autres régions qui ne disposent pas 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 (petite région agricole, département) a suscité une étude qui a été conduite en région Centre (cf poster présenté au cours de ces journées COMIFER-GEMAS : Vigot et Scheurer, 2011), et qui est poursuivie actuellement en région Poitou-Charentes. Elle s'inscrit parmi les projets de l'axe 3 (« Applications thématiques ») du RMT « Sols et Territoires ».

Le diagnostic spatialisé d'état et de dynamique d'évolution des stocks de carbone organique permis par cette approche pourrait notamment fournir les indications nécessaires pour mieux évaluer les territoires, en détectant les zones les plus propices à un prélèvement régulier de la majeure partie de la biomasse aérienne produite par certaines cultures pour alimenter des filières énergétiques nouvelles ou au contraire, les zones où une reconstitution des stocks de carbone des sols pourraient bénéficier prioritairement d'apports organiques et valoriser certaines sources de produits ou d'effluents disponibles.

Pour assurer les deux objectifs poursuivis de transposabilité de la méthode entre régions françaises et de spatialisation des résultats, l'étude s'appuie sur des sources de données gérées à l'échelle nationale et donc harmonisées (ou en voie de l'être) d'une zone du territoire français à une autre : le Référentiel Régional Pédologique (RRP) et la Base de Données d'Analyses de Terre (BDAT) pour les données sur les sols ; le Registre Parcellaire Graphique (RPG) et la base de données de l'outil AZOFERT pour les données sur les systèmes de culture.

Les principaux points de discussion sur la méthode proposée portent à l'heure actuelle sur la validation des choix faits aux différentes étapes du travail pour traiter les données de chaque source utilisée et pour croiser les données issues de ces sources différentes.

D'un point de vue plus général, la confrontation de cette dernière approche aux démarches présentées plus haut - qui utilisent des données sol et système de culture, directement couplées à l'échelle de la parcelle, puis généralisées par la construction d'une typologie - amène à s'interroger sur les distorsions possibles entre les diagnostics de variations potentielles de l'état organique des sols qu'elles permettent de produire respectivement, sur une même zone géographique .

Des travaux réalisés par ailleurs pour diagnostiquer l'évolution de l'état organique des sols, sur la base de teneurs observées de carbone organique dans les sols, en donnent l'exemple. Le premier diagnostic réalisé par le GIS Sol (2007) à l'échelle de l'ensemble du territoire français, en comparant les teneurs en carbone organique relevées dans la BDAT entre deux périodes (1990-1995 et 1999-2004) révèle une tendance marquée à la baisse de stocks de carbone des sols du département de l'Aisne. Les deux échantillons d'analyses de la BDAT comparés dans ce cas sont disjoints et d'effectifs différents. Le second diagnostic, qui s'appuie sur des cinétiques observées à la parcelle d'après les données de la base d'analyse de terre du LDAR (Wylleman et Mary, 1999) propose une vision plus nuancée de la situation, tout en pointant l'existence non négligeable de situations de déstockage (23% de baisses, 27 % de hausses, 50% situations stables). Dans ce second cas, l'analyse des variations se fait sur une base statistique beaucoup plus restreinte que la première, mais elle est aussi beaucoup plus précise, car elle s'appuie sur des cinétiques réelles au sein de parcelles identifiées.

Conclusions

Le couplage d'une typologie croisée de systèmes de culture et de types de sols (ou de systèmes de culture et de pédoclimats) avec la mise en œuvre du modèle AMG a montré ici ses atouts pour plusieurs usages :

- pour structurer une démarche de conseil sur la gestion des matières organiques dans les exploitations agricoles, et accompagner le conseil individualisé ou les actions collectives de sensibilisation et de formation sur le sujet auprès des agriculteurs, afin de les aider à raisonner et à orienter leurs pratiques ;
- pour réaliser des diagnostics, spatialisés ou non, à différentes échelles (de la parcelle à des territoires potentiellement larges), proposer des évaluations quantifiées des risques de détérioration de l'état organique des sols ou des flux nets de carbone entrant ou sortant (stockage ou déstockage), et générer des préconisations elles-mêmes quantitatives (possibilités d'exportation des pailles).

Les limites de la démarche révélées au travers des différentes applications exposées sont principalement de deux ordres :

- les données nécessaires pour construire la typologie et pour alimenter le modèle de simulation ne sont pas forcément disponibles et/ou de la qualité voulue, à l'échelle de travail choisie.
- la sensibilité des résultats obtenus aux choix méthodologiques faits pour sélectionner et pour combiner les données de base utilisées reste difficile à évaluer et à maîtriser. Cette question est apparue particulièrement sensible dans le cas de l'application territorialisée réalisée par le projet du RMT « Sols et Territoires ». Elle intervient aussi concernant la fixation des règles d'interprétation des simulations d'AMG et mérite dans ce cas d'autant plus d'attention que les conclusions de ces interprétations donnent lieu à des préconisations quantitatives.

En termes de perspectives :

- Les limites méthodologiques soulignées concernant l'approche territoriale feront l'objet de travaux spécifiques au sein du RMT « Sols et Territoires », l'étude évoquée s'y poursuivant.
- Le mode d'interprétation des sorties du modèle AMG, selon l'usage qui en est recherché, sera traité dans le cadre du projet national en cours dédié à l'extension du paramétrage du modèle (Bouthier et al, 2011).
- De plus, une réflexion sur la construction des bases de données d'analyses de terre régionales ou locales, à leur source, pourrait éventuellement conduire à de plus larges possibilités de valorisation des données ainsi collectées à des fins d'études pour des sorties spatialisées ou non et pour l'établissement de conseil avec des outils d'aide à la décision. En ce sens, il apparaît important de s'intéresser aux moyens à mettre en œuvre pour sensibiliser les organismes commanditaires des analyses à l'intérêt :
 - de réaliser de façon régulière la mesure de certains paramètres analytiques, avec des méthodes appropriées (ex. granulométrie ; argiles après décarbonatation en sols calcaires)
 - de renseigner précisément les conditions de réalisation du prélèvement (date ; profondeur, à comparer à la profondeur du travail du sol sur la parcelle),
 - de fournir des informations complètes sur le système de culture de la parcelle analysée.

Références bibliographiques :

- Andriulo A., B. Mary et J. Guérif. 1999.** Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*. 19. 365-377.
- Boiffin J., J. Kéli Zagbahi et M. Sébillotte, 1986.** Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hénin-Dupuis. *Agronomie* 6 (5) – 437-446.
- Bouthier A., R. Trochard, A. Duparque, V. Tomis, N. Damay, S. Sagot, B. Mary, S. Houot, P. Denoroy, 2011.** Adaptation et mise en œuvre du modèle de calcul de bilan humique à ong terme AMG, dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage. –in *10^e rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre*. GEMAS-COMIFER, Reims, novembre 2011 - *Poster*
- Chenu C., D. Cosentino, M. Balabane, F. Darboux, O. Duval, S. Houot, Y. Le Bissonnais, N. Leblond, S. Menasseri, JP Pétraud, P. Saulas ; 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
- 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 d conseil fondée sur le bilan humique AMG *in 8e rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre GEMAS-COMIFER* , Blois novembre 2007. 16 p
- Hénin S. et M. Dupuis. 1945.** Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales Agronomiques*. 19-29
- Machet J.M., P. Dubrulle, N. Damay, R. Duval, S. Recous, B. Mary, 2007.** Azofert : a new decision support tool for fertiliser N advice based on a dynamic version of the predictive balance sheet method. *In "16th International Symposium of the Tnternational Scientific Centre of Fertilizers"*, pp. 6, Gand.
- Loveland, P. et J. Webb, 2003.** Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions : a review. *Soil and tillage research* 70. 1-18.
- Mary B. et J. Guérif, 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
- Mary, B et R. Wylleman, R., 2001.** Characterization and modelling of organic C and N in soil in different cropping systems. *In: Proceedings of the 11th Nitrogen Workshop*, Reims, pp. 251–252.
- Rémy JC et A. Marin-Lafèche, 1976.** L'entretien organique des terres. Coût d'une politique de l'Humus. *Entreprises agricoles*. N°84. 3-7.
- Saffih-Hdadi K. et B. Mary, 2008.** Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 40. 594-607.
- Tomis, V., 2007.** Gestion et conservation de l'état organique des sols dans les exploitations agricoles Picardes. Mémoire de fin d'études – ISA Lille. 67 p + Annexes
- Vigot M. et O. Scheurer, 2011.** Spatialisation du bilan humique des sols cultivés à l'échelle d'un territoire - *in 10^e rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre*. GEMAS-COMIFER, Reims, novembre 2011 - *Poster*
- 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.