

EVOLUTION DE L'ETAT ORGANIQUE DU SOL A L'ECHELLE DE LA PARCELLE : DE NOUVEAUX OUTILS POUR UNE DEMARCHE DE CONSEIL FONDEE SUR LE BILAN HUMIQUE AMG¹

Annie DUPARQUE^a, Hubert BOIZARD^b, Nathalie DAMAY^c, Jean-Luc JULIEN^c, Christine LECLERCQ^d,
Bruno MARY^b

en collaboration avec Olivier ANCELIN^{e1}, Christian DERSIGNY^{e2}, Jean-Pascal HOPQUIN^{e4},
Jacques DURANEL^{e1}, Laurent FLEUTRY^{e3}

a : Agro-Transfert Ressources et Territoires, Domaine de Brunehaut 80200 Estrées-Mons
a.duparque@agro-transfert-rt.org ; b: INRA, Unité d'Agronomie, UR 1158, Estrées-Mons, BP 50136,
F-80203 Péronne boizard@mons.inra.fr ; rue Fernand Christ, 02007 LAON, mary@laon.inra.fr ;
c : LDAR : Laboratoire Départemental d'Analyse et de Recherche de l'Aisne, rue Fernand Christ, 02007
LAON, jjulien@cg02.fr ; d : Institut Lasalle Beauvais, 19,rue Pierre Waguet BP 30313 60026 Beauvais cedex,
christine.leclercq@lasalle-beauvais.fr ; e :Chambres d'Agriculture de Picardie. e1 : département de la
Somme ; e2 : de l'Oise ; e3 : de l'Aisne ; e4 : Chambre d'agriculture régionale

I – CONTEXTE

Les sols limoneux occupent près de 50% de la Surface Agricole Utile de Picardie. Pauvres en argile, ils présentent aussi des teneurs en matière organique faibles, rarement supérieures à 2%, voire assez souvent voisines de 1,5%. Ces caractéristiques les exposent à plusieurs types de problèmes agronomiques, en particulier à la sensibilité à la battance. Une enquête menée en 2005 auprès d'un panel d'agriculteurs de la région (MN Claude, 2005) a notamment montré que ce phénomène et ses conséquences souvent coûteuses sur l'implantation des cultures figuraient au premier rang des accidents de comportement du sol rencontrés et redoutés. La battance est potentiellement source d'érosion et des cas marquants d'évènements érosifs sont connus dans chacun des trois départements picards. Ces situations correspondent souvent à des systèmes de culture intensifs à faibles restitutions organiques en place depuis plusieurs décennies ou à des situations où des systèmes de grande culture ont succédé à des prairies en zones vallonnées et sur des sols fragiles intrinsèquement. Assez généralement, les matières organiques du sol sont associées dans l'esprit des agriculteurs à la notion de « fertilité », d'« activité biologique », de « vie », de « bonne santé » du sol, dont pourrait dépendre à long terme la régularité des rendements et de la qualité des produits, critères importants dans les contrats qui lient les exploitations à l'agro-industrie. Il s'agit bien d'un patrimoine à entretenir à différentes échelles : celle de la parcelle et de l'exploitation² et celle du territoire (Balesdent, 1996). Et de fait, l'attachement ou l'inquiétude que peuvent manifester les agriculteurs à l'égard de l'état de leurs sols tient aussi au souci d'être reconnus par leurs pairs, pour la façon dont ils exercent leur métier, comme professionnels performants et soucieux du patrimoine, et par la société, comme citoyens respectueux du territoire sur lequel ils exercent leur activité.

Une étude conduite par l'INRA de Laon sur l'état organique des sols et son évolution en cours (Wylleman et al, 2001) dépeint une situation nuancée qui dément en partie les craintes alarmistes initiales : les stocks de C organique des sols apparaissent stables dans près de 50% des cas sur la durée de la période étudiée et ils augmentent dans un peu plus de 25% des cas (en majorité des parcelles à faibles niveaux de stock initial). L'étude confirme dans le même temps l'importance du sujet dans un certain nombre de situations : dans près de 30 % des cas, les stocks sont en baisse.

Ces résultats contrastent avec ceux d'études similaires portant sur d'autres régions, rapportées par Balesdent, (1996) et qui signalent clairement des baisses des teneurs des sols en matière organique. En Bretagne notamment, Walter et al, (1995) annoncent une diminution moyenne de plus de 10% des teneurs en lien avec les modifications des pratiques, principalement relatives à l'élevage.

¹ AMG : Initiales des concepteurs du modèle : Andriulo, Mary, Guérif de l'INRA de Laon

² La variation du stock de matière organique sur la durée d'un bail serait introduite dans la définition encore à l'étude du fonds cultural.

Les préoccupations manifestées par les agriculteurs et les professionnels font écho aux alarmes lancées aux niveaux international (FAO, UISS)³ et Européen (Directive européenne sur les sols) quant aux dangers de pertes irréversibles de fertilité des sols liées aux activités humaines. Elles renvoient à la nécessité de mettre en œuvre à différentes échelles les moyens opportuns pour la préserver, dans le cadre de l'agriculture modernisée et intensive commune aux grandes régions de plaine du nord de l'Europe notamment.

Les sujets d'actualité relatifs à l'effet de serre, aux possibilités de stockage de carbone dans les sols agricoles et au développement des cultures à vocation non alimentaire dont l'essentiel des parties aériennes serait exporté viennent renforcer ces questions. Les filières bioénergétiques en développement sont susceptibles de fournir à long terme des possibilités de diversification des systèmes de culture et de nouvelles sources de revenus dans les exploitations. Une demande forte d'exportation de pailles existe déjà dans certains secteurs. Elle laisse entrevoir la possibilité de dégager de la valeur ajoutée supplémentaire à partir des surfaces céréalières, mais elle suscite aussi la crainte d'une dégradation à long terme du statut organique des sols concernés. La fréquence d'exportation des pailles doit bien être raisonnée en fonction des conséquences prévisibles de cette pratique sur les sols (projet CARTOPAILLES⁴). La mise en place des cultures dédiées à la valorisation énergétique devra s'entourer des mêmes précautions et respecter le principe imposé au plan international, qui veut qu'une biomasse issue d'une zone cultivée ne soit considérée comme une ressource renouvelable que si sa mobilisation n'entraîne pas d'appauvrissement des stocks de matière organique des sols (UNFCCC, 2006).

Face aux craintes liées à des bilans humiques déficitaires et à une diminution potentielle des retours au sol des résidus de culture dans les filières énergétiques, les apports de produits organiques exogènes sur les sols agricoles sont parfois présentés comme des solutions de compensation ou de substitution (Roussel et al, 2001). Ils soulèvent cependant plusieurs types de questions (F.David, 2004) et ont justifié la conduite d'un nombre important d'essais (Bispo et Tercé, 2004).

La pression du développement urbain et avec elle, les incitations à l'épandage agricole de déchets organiques de natures très variées augmentent cependant, sensiblement depuis quelques années.. Or, la caractérisation des valeurs fertilisantes ou amendantes de l'ensemble des produits proposés aux agriculteurs est encore mal assurée et les fondements des argumentaires déployés autour de leurs effets sur le sol et vis à vis des cultures sont en général difficiles à vérifier. Dans le même temps, les exigences qu'imposent les industries de transformation agro-alimentaires aux producteurs sous l'angle de leurs préoccupations de sécurité sanitaire et de traçabilité des produits conditionnent les possibilités d'utilisation des diverses sources de matières organiques exogènes disponibles pour l'entretien de l'état organique des sols. Aujourd'hui, les projets d'installations de méthanisation créent une nouvelle voie de valorisation des déchets organiques. Ces initiatives ne sont peut-être pas sans risque, cependant, quant au bilan des retours de carbone organique dans les sols agricoles.

La diversité des questions posées et de leurs interférences laisse entrevoir la difficulté, pour les agriculteurs et les responsables agricoles de raisonner la gestion des sols et des matières organiques à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et au-delà. Le manque d'informations claires, suffisamment précises, vérifiées et opérationnelles, disponibles auprès des agriculteurs, conseillers, responsables professionnels agricoles apparaît comme un frein majeur à la construction d'un conseil technique cohérent aux plans agronomique, économique et environnemental. Il intervient aussi au détriment de la mise en place de politiques territoriales équilibrées impliquant la gestion de la qualité des sols et des matières organiques d'origine urbaine ou agricole.

A l'appui de ce constat, les Chambres d'Agriculture de la région, avec le soutien de l'INRA de Laon et Mons ont suscité le développement d'un projet régional, visant à fournir aux conseillers les arguments et les outils d'un conseil adapté aux problématiques de gestion des matières organiques des sols dans les exploitations agricoles picardes. L'association Agro-Transfert Ressources et Territoires a conçu le projet et en assure la mise en œuvre depuis janvier 2004 (projet GCEOS : Gestion et Conservation de l'Etat Organique des Sols dans les exploitations agricoles de Picardie »)⁵.

³ FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations ; UISS : Union Internationale de Sciences du Sol

⁴ CARTOPAILLES : « Caractérisation, mobilisation et cartographie des ressources durables en pailles en Picardie ».

Projet financé de 2004 à 2007 par le Conseil Régional de Picardie. Partenaires : Fédération Régionale des Coopératives Agricoles INRA LAON-REIMS-MONS, Arvalis Institut du Végétal, Lasalle-Beauvais, AlternatEch.

⁵ L'association Agro-Transfert Ressources et Territoires est une plate-forme de conduite de projets de recherche-développement pour l'agriculture et les territoires ruraux basée en Picardie. www.agro-transfert-rt.org.

II – ETABLISSEMENT DU CONSEIL SUR LA GESTION DE L'ETAT ORGANIQUE DES SOLS : PRINCIPES ET BASES

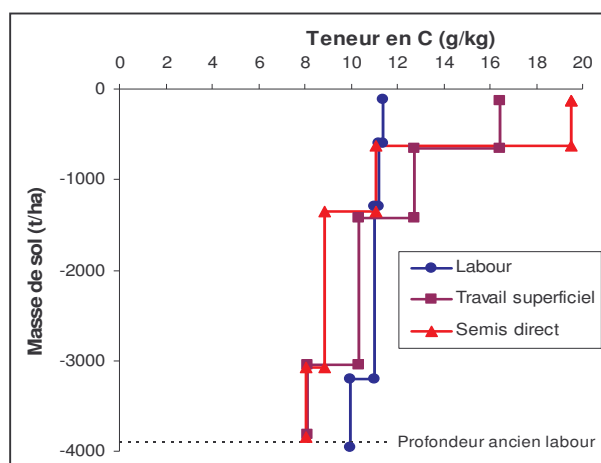
- ⇒ **Développer le conseil pour aider l'agriculteur à gérer les matières organiques ou l'état organique de ses sols implique premièrement, de définir la notion d'état organique du sol et par suite, ce que l'on entend gérer et ce que l'on peut gérer.**

Les termes « état organique » ou « statut organique » d'un sol font référence en principe à la fois à des notions de quantité, de qualité et de répartition des matières organiques de la couche de sol explorée par le profil cultural.

La quantité de matière organique du sol est appréciée par l'estimation du stock du sol par hectare sur une profondeur donnée, le stock se déduisant de la teneur en matière organique en tenant compte de la masse de terre présente par hectare de surface sur la profondeur concernée. La teneur en matière organique de la terre est déduite de sa concentration en carbone organique par application d'un coefficient multiplicateur (compris entre 1,7 et 2). Pour éviter les biais potentiels liés à la valeur retenue pour ce coefficient, **il est préférable de ne parler que de teneur ou de stock de carbone organique**. De même, pour améliorer la fiabilité du suivi de l'évolution de l'état organique d'un sol, c'est aux variations du **stock de carbone organique dans une masse de terre donnée** (soit, sur une profondeur fixe, supérieure ou égale à la plus grande profondeur de travail du sol pour une masse volumique supposée constante) que l'on doit s'intéresser. Cependant, c'est avec la teneur de la couche travaillée, que varient les principales propriétés physiques du sol que l'on rattache classiquement à l'état organique du sol.

La répartition des matières organiques dans le profil cultural peut correspondre à un critère important à considérer pour caractériser l'état organique d'un sol : la difficulté actuelle tient à la diversité des modes de travail du sol qui, pour un stock de carbone organique déterminé sur une profondeur donnée, conduisent à des distributions variables dans le profil.

Figure 1 : Exemple de profils de teneurs en carbone organique en fonction du travail du sol.
Essai de Boigneville, 2002.
source : B.Mary,



Certains indicateurs concernent la **qualité des matières organiques du sol**. Lorsqu'ils sont visuels, déduits de l'observation directe d'un profil de sol, ils permettent certaines interprétations simples sur la dynamique des matières organiques, leurs conditions d'évolution dans le sol. Mais, dans la plupart des cas, ils restent mal définis (carbone labile), mal ou non reliés au fonctionnement du sol (composition biochimique), difficiles à déterminer en routine (granulométrie des MO) ou difficiles à interpréter, car trop globaux (C/N) ou par manque de références de terrain établies à large échelle (biomasse microbienne). Il paraît évident, cependant, que des informations précieuses sur le fonctionnement des sols pourraient être déduites de ce type de critères.

Pour suivre de façon fiable l'état organique d'un sol, on doit donc s'attacher en priorité à déterminer le stock de carbone organique présent sur une masse de terre à l'hectare identique d'une date de mesure à la suivante et à considérer la répartition des teneurs dans le profil cultural en fonction du mode de travail du sol.

Le projet GCEOS est conduit en partenariat avec les Chambres d'Agriculture de Picardie, l'INRA de Laon-Reims-Mons, le LDAR de l'Aisne, l'Institut Lasalle-Beauvais, les Experts Agricoles et Fonciers, la Fédération Régionale des Coopératives Agricoles et avec le soutien financier du Conseil Régional de Picardie.

⇒ Depuis les années cinquante, le conseil sur la gestion de l'état organique des sols cultivés s'est appuyé sur quelques outils principaux :

▪ **Le modèle Hénin&Dupuis :**

Les interrogations suscitées par la disparition progressive des surfaces fourragères dans les régions de plaine (remplacement des chevaux par des tracteurs, spécialisation des exploitations et abandon de l'élevage) et la disparition consécutive des fumiers remplacés progressivement par les fertilisants chimiques ont conduits Hénin et Dupuis (1945) à développer une méthode de calcul du bilan humique, permettant de prévoir l'effet à long terme des systèmes de culture pratiqués sur l'évolution de l'état organique (teneurs et stocks de carbone organique) des sols agricoles, à partir de données simples et en majorité accessibles sur une exploitation.

▪ **Des indicateurs de propriétés, aptitudes ou comportement physiques des sols mis en relation avec la teneur en matière organique des sols.**

L'indice de stabilité structurale de Hénin est parmi les indicateurs les plus connus (Hénin, 1976) et a longtemps tenu lieu de référence. Plusieurs études en ont relié les variations à celles de la teneur en carbone organique du sol. Affilié à l'indice de Hénin, l'indice de battance (R) de Rémy et Marin-Laflèche (1974) est encore largement utilisé :

$$R = (1,5 \text{ Limons fins} + 0,75 \text{ Limons grossiers}) / (\text{Argile} + 10 \text{ Matières organiques}).$$

L'abaque de Rémy et Marin-Laflèche (1974) a été assez largement diffusé. Il donne des repères globaux de teneurs en matière organique garantissant un niveau satisfaisant de fertilité des sols en fonction de leur teneur en argile et en calcaire. Cependant, il a été établi à dire d'experts et le manque de traçabilité de son mode d'établissement fait qu'il est difficile d'en connaître le domaine d'application et donc d'en valider l'usage non seulement dans d'autres régions que la Picardie où il a été mis au point mais dans cette région même. Il est donc actuellement fortement remis en question.

⇒ Actuellement, le renouvellement du conseil peut aussi compter sur des acquis scientifiques plus récents :

Notamment, plusieurs modèles internationaux de prévision de l'effet des pratiques culturales sur l'évolution des stocks de carbone des sols peuvent être comparés (Saffih et Mary, 2007) : CENTURY (Parton et al, 1987), DAISY (Hansen et al, 1991), RothC (Coleman and Jenkinson, 1996), AMG (Andriulo et al, 1999), CN-SIM (Petersen et al., 2005). Le modèle « AMG » améliore le modèle Hénin-Dupuis pré-existant tout en conservant la simplicité de mise en œuvre. Les recherches en cours dans l'Unité INRA d'Agronomie Laon-Reims-Mons sur les cycles couplés du carbone et de l'azote dans les sols permettent de préciser le paramétrage de modèles de recherche (dont STICS, Brisson et al, 2003) et servent aussi à enrichir les fonctionnalités et le paramétrage d'AMG. (voir en III-2).

III- UNE DEMARCHE DE CONSEIL POUR GERER L'ETAT ORGANIQUE DES SOLS CULTIVES

Le développement et le renouvellement du conseil sur la gestion de l'état organique de ses sols suppose de pouvoir :

- **établir le diagnostic de l'état organique** du sol à un moment donné et **suivre son évolution dans le temps**,
- informer quant aux **répercussions possibles de cet état sur les propriétés et comportements du sol** et, directement ou indirectement, **sur les cultures**,
- prévoir **l'évolution de l'état organique du sol sur le long terme en fonction des pratiques culturales** et les risques ou bénéfices associés,
- connaître les **moyens efficaces pour infléchir cette évolution**, de savoir en **évaluer le coût** de mise en œuvre et les **effets connexes**.

Pour répondre à ces exigences, le conseil délivré doit mettre à profit les complémentarités des outils, méthodes, connaissances disponibles en les intégrant dans un ensemble cohérent et opérationnel. Ainsi, notre objectif, dans le cadre du projet GCEOS est **d'établir une démarche de conseil pour une gestion durable de l'état organique des sols cultivés à l'échelle de la parcelle cultivée et de l'exploitation.**

Trois points sont apparus comme cruciaux dans la démarche à développer :

- ⇒ **Améliorer la qualité des prélèvements pour analyse de terre** pour permettre un suivi fiable de l'évolution dans le temps de l'état organique d'un sol
- ⇒ **Mettre à la disposition des conseillers et des agriculteurs un outil de simulation de l'effet à long terme des systèmes de culture sur l'évolution de l'état organique**
 - **simple** (données d'entrée faciles d'accès sur une exploitation)
 - **suffisamment précis** (qualité du modèle)**et établir, en mobilisant cet outil, un système de préconisations rattaché à des situations types faisant référence en région**
- ⇒ **Accompagner la mise en œuvre de ces outils par le transfert des connaissances nécessaires sur la dynamique des matières organiques dans le sol, sur leurs rôles et sur les liens connus entre l'état organique d'un sol et ses principales propriétés.**

III – 1 PROPOSITION D'UNE NOUVELLE PROCEDURE DE PRELEVEMENT POUR ANALYSE DE TERRE

Pour retracer l'évolution de l'état organique des sols du département de l'Aisne, seules 391 parcelles, sélectionnées sur l'ensemble de la base de données d'analyses de terre du LDAR (plusieurs milliers de parcelles), ont pu être conservées pour mener à bien le travail (Wylleman et al, 2001). Une cause importante de ce volumineux « déchet » de tri tient au manque de précision accordée aux conditions de réalisation des prélèvements de terre. De fait, la qualité des résultats d'une analyse de terre dépend fortement de celle du prélèvement de l'échantillon transmis au laboratoire. La plupart des laboratoires sont en effet engagés actuellement volontairement dans des démarches qualité impliquant le respect de procédures d'analyses normalisées et de protocoles de vérifications périodiques des résultats par croisements d'analyses dans un réseau national (GEMAS). En revanche, et même s'il fait l'objet d'une norme (AFNOR X31-100, déc.1992), le mode réalisation des échantillonnages et prélèvements de terre au sein d'une parcelle agricole est variable selon le préleveur ou les habitudes locales. Il évolue aussi au cours des années et peut s'avérer souvent mal adapté aux utilisations des résultats de l'analyse recherchées, en particulier lorsqu'il s'agit de retracer l'évolution dans le temps d'un paramètre analytique du sol. Or, pour que des analyses de terre successives sur une même parcelle soient comparables, les échantillons de terre prélevés au cours d'années différentes doivent représenter la même couche et la même masse de terre au sein de la parcelle.

La procédure que nous proposons vise à faire porter les échantillonnages réalisés dans une parcelle à plusieurs années d'intervalle sur la même masse de terre dans la même couche de sol au même endroit : c'est à cette condition que les échantillons peuvent être comparés.

Echantillonner une même masse de terre dans une même couche de sol à deux dates différentes au sein d'une parcelle signifie :

- prélever toujours à la même période de l'année, sur la même culture de la succession culturale pour limiter les biais liés à un écart d'état structural donc de masse volumique,
- prélever dans la même zone de la parcelle, sur une surface assez faible pour limiter les effets de la forte variabilité spatiale de certains paramètres - dont en général, la teneur en carbone organique,
- prélever sur une même profondeur de sol,
- estimer les masses volumiques⁶ du sol aux deux dates pour corriger le calcul si elles sont différentes.

⁶ ou « densité apparente »

- **Choix de la période de prélèvement**

Le prélèvement ne doit pas intervenir sur un sol trop récemment labouré ou travaillé, fertilisé ou amendé (Norme AFNOR X31-100, 1992). **La période de l'interculture en fin d'été est la plus favorable pour réaliser des analyses de contrôle périodiques et suivre l'évolution de certains éléments dans le sol.** Le prélèvement doit intervenir après la récolte de cultures d'été et avant tout nouveau travail, notamment avant déchaumage. La masse volumique du sol a alors atteint sa valeur maximale dans l'année et le sol est dans un état que l'on peut globalement retrouver à la même époque, derrière la même culture une autre année. Cependant, si entre temps la parcelle a subi des tassements importants ou que le système de travail du sol a changé (par exemple, passage au non labour), cette précaution n'est plus suffisante et l'estimation de la masse volumique du sol aux deux dates devient nécessaire pour corriger les biais.

Une limite de l'intervention à cette période est l'enrichissement transitoire de la couche supérieure du sol en potassium par les exsudats racinaires après la récolte d'une céréale à pailles qui peut conduire à sous estimer la fertilisation potassique pour la culture suivante. Dans le cas le plus général en effet, l'analyse n'est pas réalisée principalement pour suivre les variations de teneurs en carbone organique.

- **Zone de prélèvement, nombre et répartition des échantillons élémentaires**

JL Julien a consacré à ce point une grande partie de son intervention lors des journées du GEMAS-COMIFER de 2005 (Julien, 2005). Nous reprenons ses conclusions.

Si l'on cherche à caractériser la fertilité du sol d'une parcelle dans son ensemble pour raisonner les interventions de fertilisation, la réalisation d'une quinzaine de prélèvements élémentaires au sein d'une zone de surface limitée (15 à 20 m de diamètre) jugée représentative de la parcelle ou de la zone à fertiliser constitue une solution simple (à préférer à la diagonale). L'analyse donne alors des valeurs moyennes représentatives de l'ensemble de la parcelle mais trop imprécises pour permettre un suivi dans le temps. Concernant notamment, la teneur du sol en carbone organique, la variation dans le temps de ce paramètre sur une période de moins de 10 ans est en effet le plus souvent d'un ordre de grandeur inférieur ou équivalent à celui de sa variabilité spatiale (Nobuurs et al 2000, cité par Arrouays et al, 2003).

Si l'on s'attache à suivre l'évolution dans le temps de certains paramètres par le moyen d'analyses successives espacées de plusieurs années, **la zone de prélèvement doit être de surface réduite (10 à 15 m de diamètre ou 100 m²). Elle doit aussi être précisément repérée** (Arrouays et al, 2003), au mieux **par GPS** pour permettre le retour strictement sur cette zone pour les analyses suivantes car seule cette précaution autorise la comparaison de leurs résultats respectifs. Si deux ou plusieurs grandes zones apparemment différenciées partagent la surface de la parcelle, deux zones de prélèvements ou plus, repérées et suivies avec la même rigueur, donneront lieu à deux ou plusieurs analyses distinctes.

Pour gérer la fertilité d'une parcelle, les deux procédés proposés peuvent être combinés :

- faire une analyse rendant compte de la globalité de la parcelle (premier procédé) tous les 4 à 5 ans et l'utiliser pour raisonner la fertilisation minérale (P et K, Mg) et les amendements basiques,
- réaliser une analyse tous les 7 à 10 ans à partir d'une zone de prélèvement très précise pour suivre l'évolution de l'état organique du sol et d'autres paramètres analytiques.

- **Profondeur de prélèvement**

La profondeur de prélèvement couramment conseillée et conforme à ce qu'indique la norme, est celle de l'opération de travail du sol la plus profonde, le plus souvent celle du labour le plus profond pratiqué dans les 5 à 10 années précédentes. Or, certaines observations prouvent que la profondeur effective de labour est souvent mal appréciée (Favre, 2004). De plus, les pratiques de travail du sol devenues assez variables évoluent vers une diminution de la fréquence et, en tendance, de la profondeur des labours. Une solution pour améliorer la prise en compte de ce paramètre très important pour la qualité du prélèvement de terre est de **standardiser la profondeur de prélèvement.**

Nous préconisons la **profondeur standard de 30 cm** en considérant que :

- dans la majorité des systèmes de culture pratiqués actuellement, les labours n'excèdent plus cette profondeur depuis près de dix ans,
- les labours se sont couramment pratiqués à cette profondeur pendant des décennies homogénéisant la répartition verticale des éléments minéraux peu mobiles et de la matière organique dans le profil cultural, sur cette couche du sol. Les principales références élaborées pour raisonner la fertilisation minérale P-K-MG s'appuient d'ailleurs bien sur des résultats d'essais labourés sur 28 à 30 cm. C'est aussi dans cette couche que se concentrent la biomasse racinaire et l'activité biologique du sol et, puisqu'elle est enrichie, relativement aérée et au moins en partie travaillée, que se produit la plus grande part de la minéralisation des matières organiques actives du sol. C'est là, en définitive que s'observe l'essentiel des variations de stocks d'éléments minéraux et organiques dans un sol cultivé.

Bien entendu, en sols superficiels, la profondeur de prélèvement sera évidemment limitée à la profondeur de sol accessible et conservée constante au fil des années.

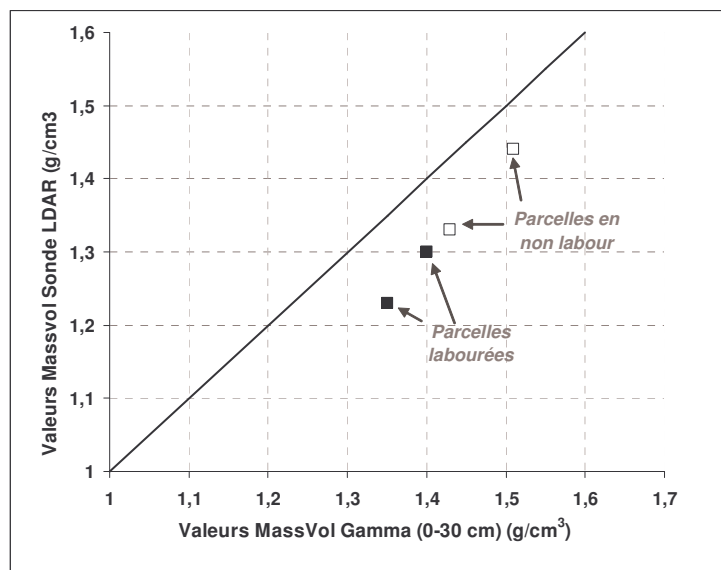
• Estimation de la masse volumique du sol

Pour le moment, en région Picardie et souvent au-delà, les données associées au triangle des textures de la carte des sols de l'Aisne font office de référence. A l'avenir les résultats du RMQS (Jolivet et al, 2006) actualiseront et compléteront cette base. Néanmoins, il restera des situations (texture * type de système de travail du sol), éventuellement nombreuses, où la masse volumique réelle sera mal approchée par les références.

L'importance de la prise en compte de la masse volumique du sol lors du prélèvement, telle qu'elle ressort dans ce qui précède, sa forte variabilité potentielle d'une parcelle à une autre et la difficulté à prédire sa valeur par modélisation justifient l'investissement réalisé dans le cadre du projet pour étudier les possibilités d'accéder à la de ce paramètre sur l'échantillon de terre prélevé pour l'analyse.

Ainsi, une sonde à usage manuel, a été conçue et réalisée par le LDAR pour prélever des carottes de sol non perturbées, sur une profondeur standard de 30 cm. Les résultats des tests de la sonde LDAR montrent qu'elle ne permet pas de rendre compte de la valeur absolue de la masse volumique mesurée par la méthode de référence (sonde gamma) mais qu'elle permet de classer les situations explorées de façon cohérente avec ces valeurs lorsque le sol est « rappuyé » (délai suffisant après labour) (Figure 2). En sol sableux, la correspondance avec la mesure de référence est très bonne. Dans les sols argileux et/ou labourés depuis moins de 4 ou 5 mois, qui plus est si leur humidité est proche de la capacité au champ, la variabilité des mesures est forte. L'adaptation de la sonde à un usage sur quad est à l'étude avec le LDAR et les chambres d'agriculture de Picardie.

Figure 2 : Tests de la sonde LDAR : évaluation de la qualité des mesures de masse volumique obtenues par confrontation des mesures aux résultats de la méthode de référence (sonde Gamma)



III - 2 UN OUTIL DE SIMULATION FONDE SUR LE MODELE AMG AU COEUR D'UN SYSTEME DE PRECONISATIONS PAR CAS-TYPE.

III – 2.1 – Le modèle AMG, base d'un outil de simulation de l'évolution des stocks de carbone organique à long terme

a) Principes

Le modèle AMG reprend le principe de calcul du modèle Hénin-Dupuis. Il réalise le calcul d'un bilan humique simple, à l'échelle de temps annuelle :

Entrées	-	Sorties
humification du carbone des résidus de cultures, engrais verts, produits organiques apportés		minéralisation d'une partie du carbone organique du sol

La totalité du carbone entrant est supposée soit décomposée et soit humifiée sur le pas de temps de un an. Le bilan humique, moyenné à l'échelle d'une succession culturale, est intégré dans le temps simulant l'évolution à long terme (20, 30,..., 100 ans, ...) du stock de carbone organique du sol sur la couche 0-30 cm. On suppose que la succession culturale se reproduit à l'identique sur toute la durée choisie de la simulation.

Comme le modèle Hénin-Dupuis, le modèle AMG est utilisable facilement à partir de données disponibles directement sur l'exploitation :

- Sont demandés concernant les entrées de carbone par humification : rendements des cultures (les biomasses aériennes et racinaires des résidus en sont déduites) ; nature et biomasse des engrais verts enfouis ; nature, fréquence et dose des apports de fertilisants organiques ;
- et pour les sorties de carbone (facteurs influençant la minéralisation du carbone du sol) : teneurs en carbone organique, argile et calcaire et proportion de cailloux ; Travail du sol : fréquence et profondeur de l'opération de travail du sol la plus profonde pour chaque année de la succession ; données climatiques : température moyenne annuelle de l'air, bilan hydrique annuel.

A la différence du modèle Hénin-Dupuis où le compartiment de carbone humifié du sol est considéré comme un tout, le modèle AMG distingue deux fractions de l'humus (Figure 3) :

- la fraction « stable » qui se comporte comme une constante (sa durée moyenne de renouvellement supposée est élevée, très supérieure à la durée envisagée des simulations),

- et la fraction dite « active » qui est seule affectée par les flux d'entrée et de sortie - son temps de renouvellement supposé est de l'ordre de 25 ans. La nature exacte de cette fraction reste encore à définir et aucune méthode de mesure ne permet actuellement de la déterminer de façon sûre. Dans les autres modèles internationaux, la fraction stable de l'humus prise en compte représente de 10 à 50% du carbone organique total du sol (Saffih et Mary, 2007).

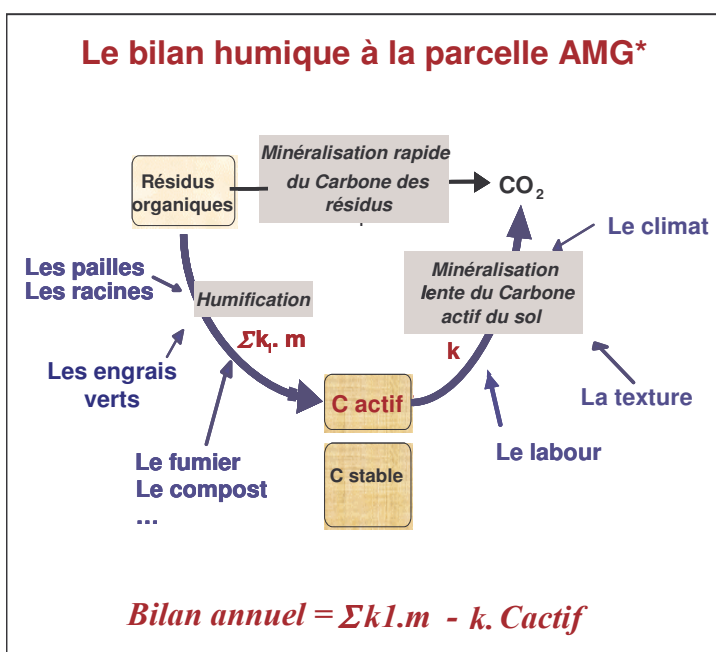


Figure 3: Schéma du modèle AMG

Comparé aux modèles internationaux cités, le modèle se distingue aussi par son petit nombre de paramètres. Il en comporte trois :

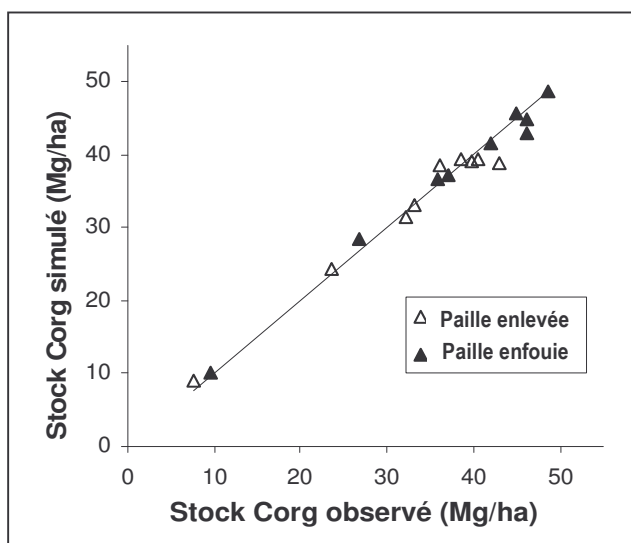
- k_1 : désigne de façon générique les coefficients isohumiques (ou rendement d'humification) des matières organiques fraîches apportées au sol (résidus de cultures aériens et racinaires, engrais verts enfouis, amendements organiques). Les entrées du bilan sont données par la somme des produits $k_1 \cdot m$ où m est la masse de carbone apportée par chaque source de matières organiques fraîches.
- Le coefficient de minéralisation annuelle ici noté k affecte uniquement le stock de carbone « actif » du sol.
- Le rapport C organique actif / C organique total,

b) Paramétrage, tests et évolutions récentes ou prévues du modèle

Le modèle AMG a été paramétré, comme l'avait été le modèle Hénin&Dupuis (Mary et Guérif, 1994 ; Wylleman, 1999) par ajustement des données simulées aux résultats de mesures de flux de carbone réalisées sur l'essai de longue durée de Boigneville (Essonne)- système maïs grain/blé en sol de limon moyen ; trois modalités de travail du sol : labour permanent à 28 cm, travail superficiel permanent à 10 cm, semis direct. Le modèle a ensuite été testé sur une sélection de parcelles de la base de données d'analyses de terre du LDAR. Il améliore très sensiblement les performances du modèle Hénin-Dupuis, qui testé dans les mêmes conditions, tendait à surestimer les variations de stocks de C organique pour des prévisions de long terme, à la baisse dans les systèmes à faibles restitutions organiques et à la hausse en situations d'apports élevés (Mary et Guérif, 1994 ; Wylleman et al, 2001).

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 et Mary, 2007). Malgré sa simplicité, le modèle AMG a conduit à de bonnes prédictions des données expérimentales mobilisées.

Figure 4 : Evaluation du modèle AMG sur 9 essais de long terme avec ou sans restitution de paille. Comparaison des stocks observés et simulés en fin d'essai (25 ans) (Saffih et Mary, 2007)



Le travail entrepris dans le cadre du projet GCEOS a permis d'aménager le calcul des biomasses de résidus de cultures en le rendant cohérent avec le mode de calcul déjà adopté par l'outil AZOFERT (Machet, 2007), de faire évoluer la prise en compte du travail du sol (Tomis, 2007) et de pointer des possibilités d'optimiser certaines fonctions en s'appuyant notamment sur des simulations opérées par le modèle STICS : réponse à la température et à l'état hydrique du sol.

Les questions des agriculteurs et des conseillers concernant la valeur agronomique des produits organiques de plus en plus variés proposés en région met l'accent sur la nécessité d'enrichir les tableaux de paramètres permettant la prise en compte des effets de ces apports sur les teneurs et les stocks de carbone du sol dans le modèle. Un travail spécifique est envisagé sur ce point.

Une intégration plus précise des apports de carbone à long terme par les engrais verts est également à l'étude actuellement.

c) Etude de sensibilité du modèle

L'étude de sensibilité du modèle a été conduite en s'appuyant sur la définition de situations de référence associant un type de sol * un système de culture * un type de climat et en faisant varier de manière systématique, la valeur de chaque variable d'entrée du calcul alors que les valeurs des autres restaient fixes. La représentation des variations relatives des stocks de carbone organique du sol en fonction des variations relatives de chaque variable d'entrée met en évidence la **sensibilité particulière du modèle aux variations de la teneur initiale du sol en carbone et du rapport C actif/ Corg** (supérieure pour ces deux paramètres à celle observée par rapport la teneur du sol en argile) (Figure 5a). Ce constat, déjà établi par Saffih et Mary (2007) renforce **l'intérêt des efforts engagés pour améliorer la qualité du prélèvement de terre et donc la fiabilité de la détermination des teneurs et stocks en carbone organique des sols**. Elle souligne aussi l'importance des moyens de recherche et de transfert à développer pour affiner l'approche de la fraction active du carbone organique du sol et permettre de la déterminer de façon fiable, accessible dans la majorité des situations culturales connues.

Parmi les variables traduisant les modalités des pratiques culturales (rendement, apports organiques, travail du sol), **la quantité de biomasse apportée par les résidus de culture** joue un rôle de premier plan (figure 5b). Par construction, les variations liées aux valeurs prises par le **coefficient k1** sont identiques à celles-ci.

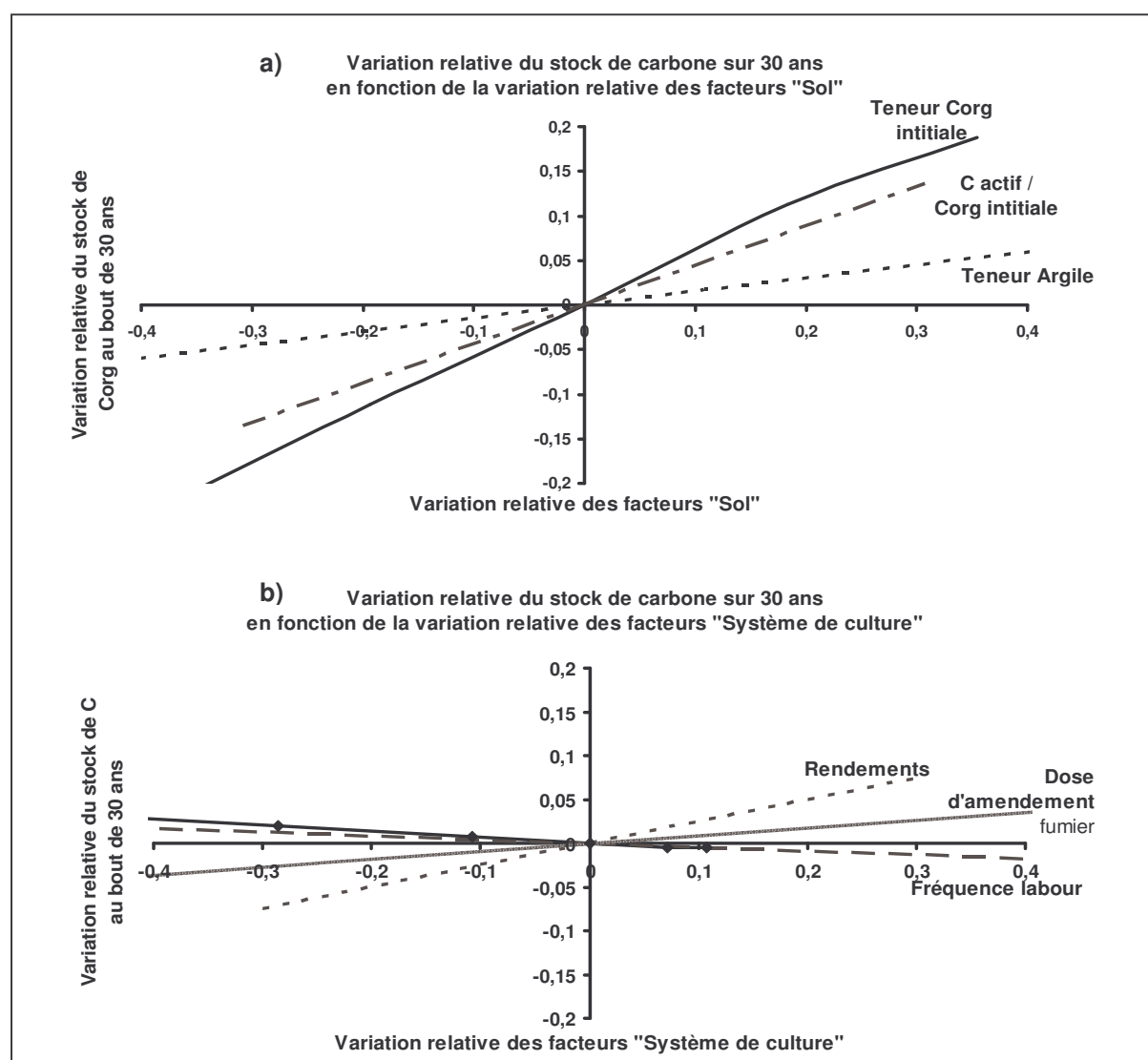


Figure 5 : Etude de sensibilité du modèle AMG. Illustration pour les principales variables d'entrée.

Système de culture de référence : Betterave/blé/pois/blé ; 1 engrais vert/4 ans ; Fumier : 30T/ha tous les 4 ans ; 2 labours/4 ans à 28 cm ; Travail superficiel à 12 cm. Sol : Limon argileux à 1,9 % de MO ; Stock de Corg : initial : 38,3 T /ha ; après 30 ans : 42,7 T/ha (\Leftrightarrow 2,1 % de MO)

III – 2.2 - L’outil de simulation « AMG », au cœur de la démarche de conseil

L'utilisation du modèle pour développer une démarche de conseil dans le projet GCEOS vise deux types d'applications de l'outil de simulation :

- une application de l'outil sur des cas-types - situations combinant sol * système de culture * climat - destinée à illustrer les principales problématiques de gestion des sols et des MO identifiées en région : elle vise à proposer des gammes de préconisations adaptées.
- une utilisation individuelle de l'outil, appliqué aux cas particuliers des parcelles d'une exploitation, aux questions et aux objectifs de l'agriculteur,

Ces deux types d'applications sont complémentaires : la première offre la possibilité d'une « entrée en matière » quant à l'utilisation de l'outil. Elle a en cela un rôle pédagogique. Elle permet en effet à un agriculteur de situer les différentes parcelles de son exploitation par rapport à certaines des situations types décrites. Il peut ainsi examiner, à priori, d'une part les conséquences potentielles de pratiques qu'il met en œuvre, ou qu'il prévoit de développer, et d'autre part certaines solutions alternatives envisageables. Sensibilisé aux possibilités et aux limites de la prévision, il lui est plus facile d'envisager une application plus personnelle de l'outil.

a) Propositions de gammes de préconisations par cas-type : des bases pour le conseil

Sept principaux cas-types ont été définis d'après la typologie des situations de gestion des sols et des matières organiques établie à dire d'experts par les conseillers du groupe régional « Sols&Matières organiques » des chambres d'agriculture et d'après des informations recueillies sur des cas concrets d'exploitations en région par une enquête conduite en 2005. (Claude, 2005 ; C. Leclercq et al, 2007) :

- Systèmes légumiers en sols sableux
- Systèmes betteraviers-patatiers en sols limoneux
- Systèmes betteraviers ;
- Systèmes céréaliers avec exportation de paille
- Systèmes céréaliers avec restitution des pailles ;
- Systèmes propres à des exploitations de polyculture –élevage
- Systèmes d'agriculture biologique

Pour chaque cas-type de base, une gamme de scénarios de modification des pratiques a été retenue et leurs conséquences simulées avec l'outil « AMG ». Les modifications envisagées sont proposées :

- soit comme des solutions pour corriger une évolution défavorable de l'état organique du sol induite par le système de départ (voir exemple en figure 6),
- soit par les experts, selon les évolutions prévisibles des systèmes de production et des pratiques culturales en fonction du contexte économique, politique et social,
- ou encore, à la suite de questions posées par les agriculteurs enquêtés en 2005.

Les préconisations sont finalement élaborées en tenant compte des résultats des simulations des scénarios via l'outil « AMG », des atouts et freins potentiels associés à la mise en œuvre des recommandations, de l'avis des conseillers. Puis, quelques agriculteurs affiliés au cas-type de départ sont consultés pour examiner l'acceptabilité des pratiques préconisées, et ainsi préparer la phase d'élaboration du conseil proprement dit qui reste la part du conseiller.

Rotation : Pomme de Terre / Blé / Pois conserve / Betteraves / Carottes

en sable-limoneux

Adaptation des pratiques

Système actuel :

- Labour : 4 ans sur 5
- Prof. de labour : 28 cm
- CIPAN : 2 années sur 5

Test d'un type de changement (A)

- Suppression d'un labour (3 années sur 5)
- Réduction de la profondeur de labour : 22 cm

Test d'un 3ème type de changement (C)

- Apport de 10 T/ha de compost de déchets verts/5ans
- Suppression d'un labour et réduction de prof. Labour à 25 cm

Test d'un autre changement (B)

- Apport de 10 T/ha de compost de déchets verts/5ans
- CIPAN : 3 années sur 5

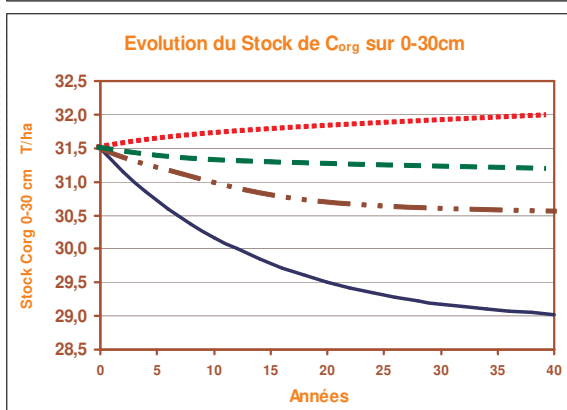
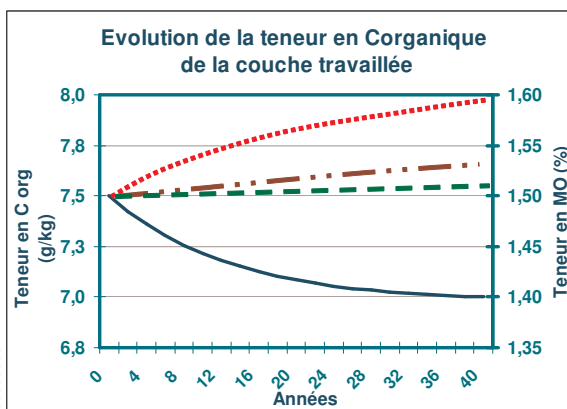


Figure 6 : Exemple d'utilisation de l'outil de simulation « AMG » pour orienter les pratiques de gestion de l'état organique des sols (cas-type « Légumier en sol sableux ») Source : Agro-Transfert

b) Exemple de mise en œuvre de la démarche de conseil par cas-type : aide à la décision pour gérer durablement la mobilisation de la ressource en pailles à des fins énégiétiques

Un outil simple, de type arbre de décision, peut être développé en s'appuyant sur l'outil de simulation AMG et sur le principe de la démarche de conseil par cas-type décrite, pour aider les agriculteurs à évaluer les possibilités d'exporter de la paille des différents types de parcelles de leur exploitation en préservant la fertilité des sols à long terme.

Une série de cas-types plus spécifiquement adaptés à la question « Gestion durable des pailles » est définie et différentes hypothèses d'exportations des pailles sont considérées et simulées via l'outil « AMG ». Pour suivre les recommandations de l'UNFCCC (2006), ne doivent alors être retenus que les taux d'exportation de paille qui ne conduisent pas à une baisse des stocks de carbone organique des sols. Dans toutes les autres situations, l'exportation des pailles doit être exclue.

Dans certains cas, quel que soit le scénario examiné, les stocks de carbone organique du sol évoluent à la baisse avant même toute exportation de paille : les possibilités d'exportation sont évidemment nulles dans ces systèmes (ex. Systèmes patatiers-légumiers en sols sableux). Dans d'autres cas, tous les scénarios permettent une exportation de paille. Certains même autorisent le prélèvement de la totalité des pailles (ex.: Systèmes céréaliers Colza/blé/orge en limons argileux et labour réduit). L'application de la démarche dans la plusieurs cas intermédiaires conduit cependant à remettre en cause l'application de la seule règle de décision retenue : « les stocks de carbone organique des sols ne doivent pas baisser ».

En effet, comme l'illustre la figure 7, comment admettre que les possibilités d'exportation de pailles sur des parcelles au sol pauvre en matière organique soient finalement plus élevées que celles permises pour des parcelles conduites avec le même système de culture mais sur sol plus riche ? Le modèle montre-t-il ses limites ? De fait non, et la simulation est très logique : plus l'état organique initial est élevé, plus les entrées de carbone dans le sol doivent être importantes pour maintenir le stock initial et plus l'exportation de pailles peut induire facilement une dynamique de baisse.

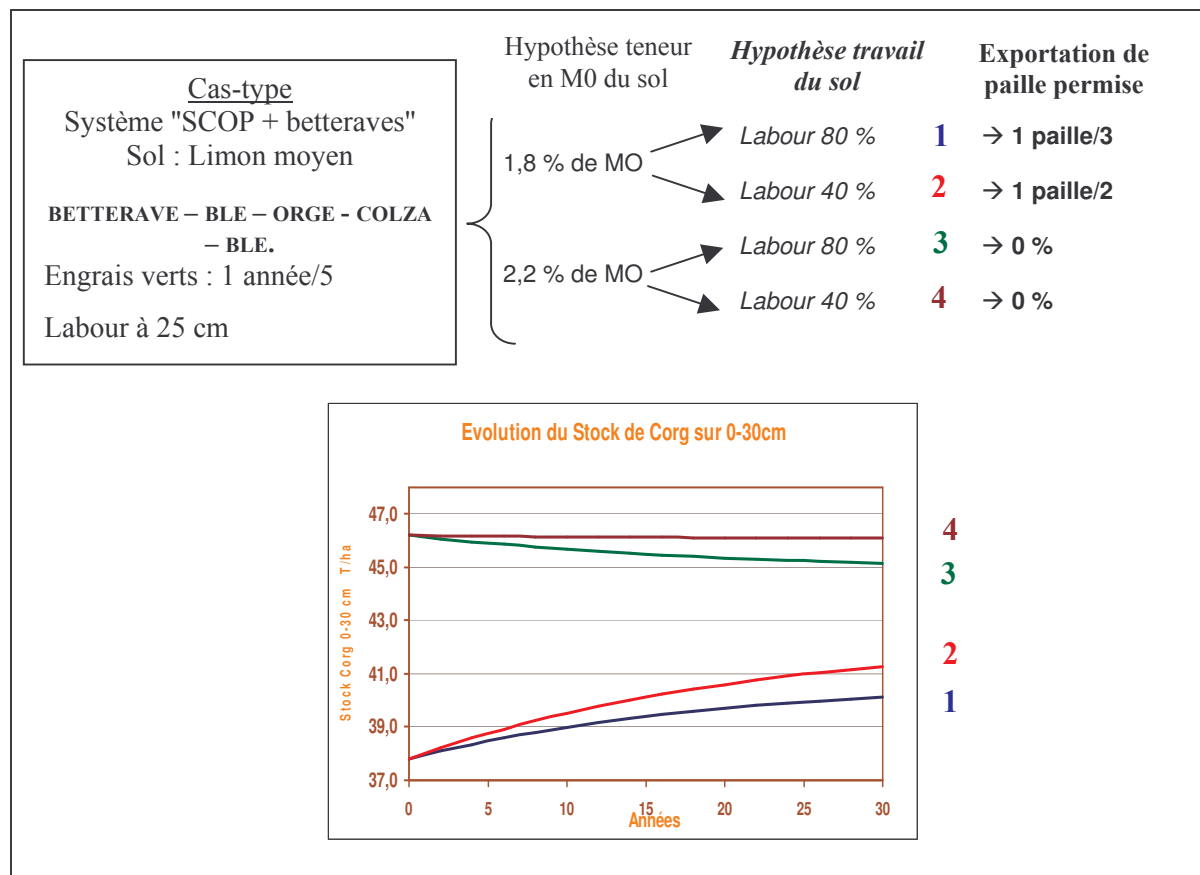


Figure 7 : Examen des possibilités d'exportation de pailles pour un cas-type défini *Source : Agro-Transfert*

Ainsi, le maintien du stock de carbone organique ne devait peut-être pas être la seule condition prise en compte dans certaines situations. La notion de teneur en matière organique satisfaisante d'un sol pourrait aussi entrer en jeu, autorisant éventuellement une baisse du stock dans des limites définies.

Or, aucune référence satisfaisante ne semble établie permettant de concrétiser cette notion actuellement. Notamment, à notre connaissance depuis 30 ans, aucun travail de synthèse abouti n'a permis de remplacer l'abaque maintenant controversé de Rémy et Marin Lafèche (1974).

Des initiatives récentes ont néanmoins ouvert des pistes importantes en ce sens (Adamiade et al, 2006 ; projet « MOST » de GESSOL2⁷ : Chenu et al, 2006) et méritent d'être poursuivies pour conduire à des outils transférables au service du conseil agricole.

⁷ GESSOL2 : appel à projets national pour la GESTion et la conservation des SOLS porté par le MEDD (2006-2009) dans le cadre de la construction de la Directive européenne « SOL »

IV – CONCLUSION

La complexité des matières organiques des sols, celle des processus impliqués dans leur transformations et leur évolution quantitative ainsi que la diversité des systèmes de culture potentiellement concernés font qu'il est délicat d'apporter des réponses claires et univoques aux nombreuses questions que posent les praticiens, agriculteurs ou conseillers quant aux pratiques à adopter pour gérer durablement les matières organiques des sols cultivés.

Cependant, le respect de certaines précautions et l'accès à de nouveaux outils, simples à mettre en œuvre à l'échelle de la parcelle et à celle de l'exploitation peuvent d'ores et déjà faciliter la prise de décision des agriculteurs et les aider à respecter leurs objectifs dans ce domaine, alors même que les conséquences de leurs pratiques actuelles ne sont perceptibles qu'à long terme.

Le modèle AMG améliore les performances du modèle très connu et encore très utilisé de Hénin et Dupuis, dont il est dérivé, et permet une prédiction des effets des pratiques culturales sur l'évolution des stocks de carbone organique des sols globalement aussi fiable que plusieurs autres modèles internationaux, pour leur part plus complexes. Mobilisable à partir de données classiquement disponibles dans une exploitation, il a permis de développer un outil d'aide à la décision et une démarche de conseil par cas-type fournissant certaines références en termes de préconisations pour gérer l'état organique du sol notamment en lien avec les principales problématiques identifiées en région Picardie.

Le modèle se montre particulièrement sensible à la valeur initiale du stock de carbone organique. On doit donc accorder du soin à la détermination de cette grandeur. Cela s'ajoute à l'intérêt évident de coupler un suivi de l'évolution effective de l'état organique du sol avec les prévisions permises par le modèle et fait de l'amélioration de la qualité des prélèvements de terre un objectif majeur pour permettre l'établissement de préconisations sûres. Ainsi, le respect d'une procédure rigoureuse s'impose. Celle-ci a été réfléchie pour identifier clairement la masse de sol concernée par l'analyse (localisation, standardisation de la profondeur, estimation de masse volumique), et donc être en mesure de la ré-explore sans biais majeurs au cours d'un suivi de l'évolution dans le temps de paramètres analytiques du sol.

D'autre part, le poids de la valeur donnée au rapport carbone actif /carbone organique total dans le résultats des simulations et les difficultés rencontrées pour mesurer et prédire cette valeur marquent la principale limite du calcul actuel et pointent l'intérêt du développement de travaux de recherche dans ce domaine.

Enfin, la mise en œuvre de l'outil dans le cadre d'une démarche de conseil permet de détecter les situations (sol*climat*système de culture) qui peuvent conduire à une baisse durable des stocks de carbone organique et de corriger les pratiques associées. Cependant, l'application stricte de ce principe minimum de « maintien des stocks de carbone organique », indépendamment de la teneur initiale en matière organique du sol conduit à certaines préconisations difficiles à comprendre. Ainsi, une meilleure connaissance et une formalisation opérationnelle des principales relations existant entre la teneur en matière organique d'un sol et ses propriétés physico-chimiques ou son comportement physique sont-elles indispensables au renouvellement du conseil sur la gestion de l'état organique des sols cultivés et doivent être développés.

Remerciements :

Certains des résultats présentés ont bénéficié du concours de Marie-Noëlle Claude étudiante de l'ENSA Rennes, en stage de fin d'études en 2005, de Stéphanie Berlier étudiante de l'ESITPA et Pierre Rigolle, étudiant de l'ENITA de Clermont-Ferrand, en stage d'entreprise en 2006 ou de Vincent Tomis étudiant de l'ISA de Lille, en stage de fin d'études en 2007. Nous tenons à les en remercier.

BIBLIOGRAPHIE

- Adamiade V., P. Défossez, H. Boizard, G. Richard. 2006.** Prediction of soil physical behavior according to organic carbon content in the context of straw exportation for energy production » - In *Soil Management for Sustainability* . R. Horn, H. Fleige, S. Peth, X.Peng Editors - Coll Advances in geocology 38. p320-327
- AFNOR, 1992.** Norme X31-100,1992. Qualité des sols. Echantillonnage. Méthode de prélèvement d'échantillons de sol.
- Andriulo A., B. Mary et J. Guérif. 1999.** Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*. 19. 365-377.
- Arrouays D., C. Feller, C. Jolivet, N. Saby, F. Andreux, M. Bernoux et C. Cerri. 2003.** Estimation des stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps
- Balesdent J. 1996.** Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Etude et Gestion des Sols*. 3(4). 245-260.
- Bispo A. et M.Tercé. 2004.** Les programmes AGREDE (Agriculture et épandage de déchets urbains de l'INRA) et VADETOX (évaluation des risques écotoxicologiques liés à l'épandage des déchets et produits dérivés en agriculture de l'ADEME). In *Retour au sol des matières organiques. Acquisition de références agronomiques et environnementales : bilan et perspectives*. Journées techniques _ Paris – 27 et 28 avril 2004. 21-35
- Brisson N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussière, YM Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, JP Gaudillière, C. Hénault, F. Maraux, B. Seguin et H. Sinoquet. 2003.** An overview on the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*. 18, 309-332.
- Claude, MN. 2005.** Gestion de l'état organique des sols dans les exploitations agricoles en Picardie. Des pratiques aux représentations : un état des lieux régional. Mémoire de fin d'études. ENITA Bordeaux. 58 p + Annexes
- Chenu C., et al. 2006.** Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion « MOST » In *De la recherche sur les sols à la décision publique : le programme GESSOL, un support à la directive sur la protection des sols*. Recueil des interventions. 21-22 novembre 2006 – Paris.
- 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
- David F. 2004.** Valorisation agricole des matières organiques en Agriculture conventionnelle et raisonnée : pratique et situation en France des essais agronomiques. 7-16
- Favre L. 2004.** Diagnostic de la structure des sols en culture de pomme de terre dans les limons du Santerre. Mémoire de fin d'études DESS Elaboration et amélioration de la production végétale – ENITAC. 48 p + Annexes
- 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
- Hénin, S. 1976.** Cours de physique du sol. Initiations. Documentations Techniques. n°28, 1. 87-120.
- Jolivet C., D. Arrouays, L. Boulone, C. Ratié et N. Saby. 2006.** Le réseau de mesure de la qualité des sols en France (RMQS). *Etudes et Gestion des Sols*, 13,3. 149-164.
- Julien JL. 2005.** Le prélèvement d'échantillons de terre. In *Fertilisation et société*. Septièmes rencontres de la fertilisation azotée (COMIFER) et de l'analyse de terre (GEMAS). 15-16 novembre 2005, Blois, France. 129-133.

- Leclercq C., MN. Claude, A. Duparque et H. Boizard, 2007.** Gestion de l'état organique des sols en Picardie : une typologie des pratiques pour des références adaptées à la diversité des situations. 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
- Machet JM, 2007.** AZOFERT® : Présentation et mise en œuvre. 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.
- 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
- 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.
- Petersen BM, J. Bernsen, S. Hansen, LS. Jensen, 2005.** CN-SIM – a model for the turn over of soil organic matter. I – Long term carbon and radiocarbon development. *Soil Biology and Chemistry*. 37, 359-374.
- Rémy JC et A. Marin-Lafèche, 1974.** L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Annales Agronomiques*, 25(4), 607-632.
- Roussel O., E. Bourmeau et C. Walter, 2001.** Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Etude et Gestion des Sols*, 8(1). 65-81
- Saffih-Hdadi K. et B. Mary, 2007.** Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. En ligne sur site *Soil Biology and Biochemistry*
- Tomis, V., 2007.** Gestion et conservation de l'état organique des sols dans les exploitations agricoles Picardes. Contribution à l'élaboration d'une démarche de conseil. Mémoire de fin d'études – ISA Lille. 67 p + Annexes
- UNFCCC/CDM, 2006.** Definition of renewable biomass. EB23 report, Annex 18, P1-2
http://cdm.unfccc.int/EB/023/eb23_repan18.pdf
- Walter C. T. Bouedo et P. Arousseau, 1995.** Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. Rapport ENSA Rennes. 30p.
- Wylleman R., 1999.** *Caractérisation et modélisation de l'évolution des stocks de matière organique des sols de grande culture en Picardie*. Rapport de fin d'étude. INRA Laon, 87 pp + annexes.
- Wylleman R., Mary B., Machet J.M., J. Guérif et Degrendel M., 2001.** Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture : analyse et modélisation. *Perspectives Agricoles*, n°270, juillet-août 2001 : 8-14.