

Résumé

Les matières organiques du sol (MOS) influencent ses propriétés physiques (structure du sol, porosité, résistance au tassement et à l'érosion), chimiques (réserve de nutriments, capacité d'échange de cations) et biologiques (biodiversité). De cette manière, ses différentes fractions participent non seulement à la fertilité du sol mais aussi au maintien de l'ensemble de l'écosystème qu'il constitue (résilience, résistance à l'érosion, filtre et tampon pour polluants,...). Les MOS subissent de nombreuses transformations (minéralisations primaire et secondaire, humification) qui sont guidées à la fois par la nature biochimique des composants organiques et par les conditions du milieu : température du sol, disponibilité en nutriments, disponibilité en oxygène, hydrographie, acidité du sol, texture et structure du sol, influence du travail de l'homme sur ces facteurs (apports en matières organiques (MO) ou travail du sol).

En raison des bénéfices que les MOS apportent, une teneur élevée en carbone organique est généralement recherchée pour les sols cultivés. En même temps, la mise en culture des sols et les pratiques liées à l'agriculture intensive ont provoqué de nombreuses pertes de MOS (estimation au niveau mondiale qui varie entre 40 et 150 gigatonnes de carbone (Gt C) selon les sources). Ce phénomène s'explique par : l'accélération de la minéralisation des MOS à cause du travail du sol et les apports en engrais minéraux, les pertes de terre liées au phénomène d'érosion, la diminution des apports en MO suite à la dissociation des activités d'élevage et de culture au sein des exploitations, et enfin, dans une moindre mesure, la perturbation de la microfaune qui est liée au tassement causé par les passages répétés d'engins lourds ainsi qu'à l'utilisation de pesticides divers.

Le problème réside dans le fait qu'une diminution de la teneur en MO du sol au-dessous d'un certain seuil menace l'ensemble de ses propriétés et *in fine* son bon fonctionnement. Ce seuil critique, qui est généralement fixé à une concentration de 2% de carbone organique dans le sol (COS), varie en réalité selon le type de sol (sensibilité plus ou moins grande liée à sa texture). En région wallonne, les sols dont la teneur en COS est inférieure à 1,2% (2,4% de MOS) sont considérés comme instables. Il a été estimé que 45% des sols de l'Union Européenne (UE) présentaient une teneur faible, voire très faible en MOS (moins de 2% de COS). Consciente du caractère préoccupant de cette situation (pas seulement la diminution des teneurs en MO mais aussi l'érosion, le tassement, les glissements de terrains, l'imperméabilisation, la pollution, le déclin de la biodiversité,...), la Commission Européenne travaille depuis 2002 sur une « stratégie de protection des sols » qui devrait déboucher dans un future proche sur l'adoption d'une directive-cadre. En Région wallonne, les sols cultivés ont connu une régression de 16% de leur teneur en MOS au cours des quatre dernières décennies (1960 à 2000). Cette diminution affecte essentiellement les zones de grandes cultures (régions limoneuse et sablo-limoneuse) où les teneurs en MOS sont particulièrement faibles (de 1,1 à 2,2% de MOS).

La restauration de la qualité des sols passe par une augmentation de leur quantité de carbone organique. L'utilisation des terres cultivées et les pratiques agricoles qui visent à stocker du carbone de manière durable dans les sols pourraient donc jouer un rôle important dans la lutte contre le réchauffement planétaire (rapport Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution de climat (GIEC), 2002). Cependant, le recours à ces activités pour piéger le dioxyde de carbone (CO₂) dans les sols cultivés se heurte à plusieurs difficultés : le caractère limité et non permanent de ce stockage, les impacts sur les émissions nets de gaz à effet de serre, les autres impacts environnementaux, les problèmes de faisabilité technique, les coûts économiques liés à la mise en œuvre de ces pratiques, le besoin d'harmonisation des systèmes de mesures. De nombreuses études sont actuellement en cours pour mieux évaluer l'ampleur de ces difficultés et le potentiel réel de stockage de CO₂ qu'offrent les sols agricoles (selon une première estimation pour l'Union Européenne, 60 à 70 mégatonnes de CO₂ par an). L'état encore limité des connaissances à ce sujet justifie partiellement que peu de pays aient décidé de recourir à ces mêmes sols comme puits de carbone conformément à ce qui est autorisé dans l'article 3.4 du protocole de Kyoto. La lourdeur des mécanismes imposés pour la vérification est également invoquée.

Les pratiques qui permettent d'améliorer le bilan de carbone organique consistent soit à réduire les pertes de MOS en ralentissant leur minéralisation (techniques de labour réduit, semis direct) soit à augmenter les apports en MO (enfouissement d'engrais verts et de résidus de récolte, apports de MO exogènes). Les apports de matières organiques exogènes présentent un intérêt certain du point de vue agronomique. Ils offrent en outre une voie intéressante de valorisation de la masse croissante de déchets et sous-produits organiques qui ne seront plus acceptés en centres techniques d'enfouissement à partir de 2010. Afin d'assurer l'efficacité et l'innocuité pour l'environnement et pour la santé de ces apports au sol, Il faut :

- connaître leur composition, leurs propriétés et leur évolution dans les sols (caractérisation) ;
- maîtriser la filière du traitement de ces produits (« système d'analyse des dangers et de maîtrise des points critiques ») ;
- encadrer leur usage par une réglementation qui tient compte des caractéristiques du sol à traité (carences, zone vulnérable) ainsi que de l'ensemble des gisements et de l'ensemble des nuisances potentielles.

En Région wallonne, la production de matières organiques biodégradables, toutes sources confondues (agricoles et urbaines), était estimée à 2,5 millions de tonnes pour l'année 2000. Cette quantité ne parviendrait à combler que 22% à 45% des pertes annuelles de MOS des sols cultivés et des prairies. C'est la raison pour laquelle les préjugés qui limitent encore le recours à certains gisements (boues de stations d'épuration par exemple) doivent absolument être dépassés. D'autres solutions plus innovantes telles que la production de matières organiques exogènes riches en éléments structurants (culture de taillis à courte rotation) peuvent également être envisagées. Reste à savoir quels seront les moyens accordés à la protection des sols dans un contexte où les politiques favorisent avant tout la production d'énergie verte et où la sécurité alimentaire pourrait être menacée (suppression des jachères prévues pour 2008).

Liste des abréviations utilisées

C	Carbone (Carbon)
COT	Carbone Organique Total
COS / SOC	Carbone Organique du Sol / Soil Organic Carbon
MOS / SOM	Matière(s) Organique(s) du sol / Soil Organic Matter(s)
OC	Organic Carbon
K1	Coefficient isohumique
K2	Coefficient de minéralisation
CEC	Capacité d'Échange Cationique
C/N	Rapport carbone total sur azote total
ISB	Indice de Stabilité Biologique
CBM	Caractérisation Biochimique de la Matière Organique
ETM	Éléments-Traces Métalliques
MPO	Micro-Polluants Organiques
Mt C	Mégatonne (million de tonnes) de carbone
Gt C	Gigatonne (milliard de tonnes) de carbone
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry
	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
HACCP	Hazard Analysis Critical Control Point
	Système d'analyse des dangers et de maîtrise des points critiques
TtCR	Taillis à très Courte Rotation

Université Libre de Bruxelles
IGEAT
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire

* * *

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Gestion des matières organiques dans les sols cultivés en Région wallonne : avantages agronomiques, avantages environnementaux et séquestration du carbone

Présenté par
Muriel Frisque
En vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Année académique : 2006-2007

Directeurs :
Bernard Godden
Marc Culot

Je voudrais remercier chaleureusement :

Mr. Godden et Mr. Culot qui, en me confiant ce sujet de mémoire, m'ont permis de découvrir un univers qui m'était inconnu.

Mr. Hecq, Mr. Hannon, Mr. Destain et Mr. Colinet pour leur accueil et le temps qu'ils ont consacré à répondre à mes questions.

Mr. Goreux qui m'a aidé à mieux comprendre ce qu'était le métier d'agriculteur.

Merci aussi à ma famille qui m'a supportée tout au long de ce travail (malgré mes sautes d'humeur).

Merci à André pour son écoute, ses conseils et la relecture attentive de ce mémoire.

Merci aussi à la super équipe de relecteurs composée par Isabelle, Joëlle, Valérie, Annick et François.

Enfin, merci Eric pour ton amitié et le soutien - tant psychologique que logistique – que tu m'as apporté dans ce chantier comme dans bien d'autres auparavant.

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	Sol et matières organiques : définitions	3
2.1.	Le sol	3
2.1.1.	Les trois fractions du sol	3
2.1.2.	Texture du sol, structure du sol, porosité et argiles	4
2.1.3.	Profil et horizons.....	6
2.1.4.	Le sol agricole	7
2.1.5.	Textures et occupation des sols wallons	7
2.2.	Les matières organiques du sol (MOS)	10
2.2.1.	Les compartiments fonctionnels.....	11
2.2.2.	Les complexes argilo-humiques	12
2.2.3.	Bilan organique du sol	13
2.2.4.	Facteurs intervenant sur la transformation des MOS	14
3.	Rôle clef des matières organiques dans les sols cultivés	18
3.1.	La fertilité du sol	18
3.2.	Les autres fonctions et propriétés du sol.....	21
4.	Problème de la diminution des stocks de MOS dans les sols cultivés.....	27
4.1.	Les notions de teneur et de stock de MOS.....	27
4.2.	L'évolution des stocks et des teneurs de MO dans les sols cultivés.....	27
4.2.1.	La conversion des terres et les pratiques agricoles	28
4.2.2.	Les pertes de COS dans les sols cultivés	30
4.3.	Le risque lié à la baisse des teneurs en MOS	33
5.	Etat des lieux	36
5.1.	L'Union Européenne : une situation alarmante	36
5.1.1.	Ampleur du problème.....	36
5.1.2.	Objectif et stratégie : une directive-cadre pour la protection des sols	38
5.1.3.	Le prix de la protection des sols	39
5.2.	La Région wallonne : une situation préoccupante.....	40
5.2.1.	Classement des teneurs en carbone des sols en fonction du type de sol	41
5.2.2.	Les stocks et teneurs en carbone des sols en Région wallonne	42
5.2.3.	Risques pour la fertilité et les autres fonctions du sol.....	46
5.2.4.	Quelle réponse ?.....	48
6.	Matières organiques et puits de carbone	50
6.1.	Puits de carbone	50
6.1.1.	Piégeage du carbone.....	50
6.1.2.	Sols agricoles et puits de carbone	52
6.1.3.	Utilisation et gestion des terres cultivées.....	54
6.1.4.	Stockage de carbone : perspectives et limites.....	55
6.1.5.	Une stratégie « no regrets »	60
6.2.	Protocole de Kyoto : l'article 3.4	61
6.2.1.	Position de l'Union Européenne.....	62
6.2.2.	Position de la Belgique	63
6.3.	La Région wallonne : état des lieux.....	64
7.	Pour une meilleure gestion des MOS	66
7.1.	Les apports de MO exogènes.....	66
7.1.1.	Quels types d'apports : engrais ou amendement ?.....	67
7.1.2.	La caractérisation des matières organiques	68
7.1.3.	L'innocuité pour l'environnement et la santé	71
7.1.4.	Des apports pour quels sols ?.....	72
7.1.5.	Question de la rentabilité	73
7.2.	Les sources de matières organiques biodégradables.....	73

7.2.1.	Les résidus d'origine agricole : source déjà exploitée.....	73
7.2.2.	Les matériaux d'origine non agricole : source à mobiliser davantage	75
7.2.3.	Ressources limitées par rapport aux besoins	77
7.2.4.	Limites de l'agriculture non alimentaire ?	79
7.2.5.	Pour une gestion intégrée des matières organiques exogènes	81
7.2.6.	Production de matières organiques exogènes, une piste pour l'avenir ?	82
8.	Conclusion	84
	Bibliographie.....	87
	Liste des tableaux.....	92
	Liste des figures.....	92
	Liste des cartes	92
	Annexe I : GIEC, estimation des stocks globaux de carbone dans les terres cultivées.....	93
	Annexe II : Europe des 15, potentiels des mesures visant à capturer le CO2 dans les sols agricoles ..	94
	Annexe III : Protocole de Koto, article 3.3 et 3.4.....	96

1. Introduction

Depuis le néolithique, l'être humain tente de tirer le meilleur parti du sol, cette ressource essentielle à sa survie.

Aujourd'hui la qualité des sols cultivés est de plus en plus menacée. Soumis à une exploitation intensive et exposés à des pollutions diverses, ils risquent, à terme, de ne plus pouvoir remplir leurs fonctions. Pourtant nous leur en demandons toujours plus : ils doivent nous nourrir, nous fournir en matières premières et en énergie renouvelable, recycler nos déchets,... Depuis que la lutte contre le réchauffement planétaire est devenu un enjeu crucial, nous tentons également de les utiliser comme « puits de carbone » afin de limiter la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère.

Un des indicateurs principaux de la qualité d'un sol est sa teneur en matières organiques. Celles-ci constituent la partie vivante du sol et lui confèrent la plupart de ses propriétés.

Le but de ce mémoire est de cerner le rôle central que jouent les matières organiques du sol aussi bien pour sa fertilité que pour ses autres fonctions environnementales.

Les questions sous-jacentes qui sont développées dans ce mémoire sont les suivantes :

- Quelles sont les propriétés et fonctions essentielles des matières organiques dans les sols cultivés ?
- Quel est l'état des stocks des matières organiques dans les sols cultivés en Région wallonne et en Europe ?
- Dans quelle mesure ces sols cultivés peuvent jouer le rôle de « puits de carbone » dans le cadre du Protocole de Kyoto ?
- Quelles sont les pistes pour améliorer la gestion des matières organiques dans les sols cultivés en Région wallonne ?

Pour mieux appréhender ces problématiques, le premier chapitre de ce mémoire est consacré à un rappel des notions élémentaires de pédologie telles que la définition d'un sol ou ce que recouvre le terme « matière organique du sol ». Les fonctions et propriétés du sol sont exposées dans le deuxième chapitre.

Sont abordés par la suite les facteurs qui ont mené à l'appauvrissement en matières organiques des sols cultivés. Au sein de l'Union Européenne, l'état de dégradation de certains sols est tel que la Commission Européenne a mis en œuvre une « stratégie de protection des sols ». Les principaux points de cette stratégie sont présentés dans le

quatrième chapitre. L'état des lieux des sols cultivés de la Région wallonne et leur évolution durant ces quarante dernières années sont également présentés dans ce chapitre.

Un chapitre entier est consacré à la possibilité d'utiliser les sols agricoles pour séquestrer le CO₂. Le principe clef consiste à augmenter les stocks de carbone organique des terres cultivées en favorisant un certain nombre de pratiques agricoles ainsi que certains types d'utilisation du sol. Le potentiel qu'offrent ces pratiques et les limites ou difficultés à surmonter sont également abordés. Dans le Protocole de Kyoto, c'est l'article 3.4 qui définit l'utilisation des sols agricoles comme puits de carbone. Nous verrons que la Belgique n'a pas souhaité y avoir recours.

Enfin une des pistes qui visent à améliorer le bilan organique des sols cultivés est plus particulièrement développée dans le dernier chapitre. Il y est question d'augmenter les stocks de matières organiques en ayant recours à des apports exogènes. Pour que cette pratique remplisse toutes ses promesses, il convient de respecter un certain nombre de règles (caractérisation, hygiénisation, ...). De plus, les besoins à couvrir sont importants. L'ensemble des sources de matières organiques résiduelles doit donc lors être mobilisé. Dans la mesure où ces dernières peuvent également être valorisées pour la production d'énergie renouvelable, le choix d'une utilisation optimale des matières organiques devra être fait. La solution consiste probablement à concilier la production de bioénergie et la reconstitution des stocks organiques des sols agricoles en utilisant les produits qui sont les plus adéquats à chacune des démarches.

Les sources bibliographiques qui ont servi à réaliser ce mémoire sont essentiellement des rapports internationaux, nationaux ou régionaux, réalisés par des équipes d'experts (gestion des sols, agronomie) ainsi que des articles scientifiques dont le foisonnement témoigne des discussions et recherches intenses que suscite la question de la gestion des matières organiques dans les sols cultivés.

2. Sol et matières organiques : définitions

2.1. Le sol

2.1.1. Les trois fractions du sol

Le sol fait partie de la biosphère. Dynamique et vivant, il est le résultat d'une évolution lente au cours de laquelle le climat, le relief et les organismes ont participé à le façonner en altérant la roche mère et en la faisant interagir avec la matière vivante.

Il est un mélange complexe de fragments de roches de granulométries variées, d'organismes et d'humus (ensemble complexe de résidus de matière organique partiellement décomposée et transformée) (Campbell, 2004). Pour mieux l'appréhender, on peut le décomposer en plusieurs fractions (Soltner, 1992) :

- ◆ La **fraction solide** est constituée de deux types d'éléments distincts :
 - Les *éléments minéraux*, ou « constituants mécaniques », qui proviennent essentiellement de l'altération mécanique et chimique de la roche mère. Ils se présentent sous la forme de pierres, de graviers, de sables grossiers ou fins, de limons, d'argiles, de calcaire ou encore d'oxyde de fer. Cette fraction minérale est très dominante sur le plan quantitatif (de 80 à 99% en masse) et relativement stable en composition.
 - Les *éléments organiques*, ou la matière organique du sol (MOS). Cette fraction de compositions très variables au cours du temps, peut être plus ou moins abondante dans le sol (de 0% dans les déserts à sols minéraux à plus de 95% dans les tourbières). (Mustin 1987)

- ◆ La **fraction liquide**, ou la « solution du sol », représente l'eau contenue dans le sol et dans laquelle sont dissoutes les substances solubles provenant à la fois de l'altération des roches, de la décomposition des MOS et des apports extérieurs tels que les fertilisants et pesticides. Cette fraction est le lieu des réactions chimiques permanentes indispensables à l'évolution de la matière organique et à la croissance des végétaux. Il y a trois types de solutions (Mustin 1987) :
 - liquide libre qui s'écoule à travers le sol et qui percole par gravité ;
 - liquide utilisable par les végétaux qui est retenu plus ou moins fortement par les particules du sol, il occupe les petites lacunes et imbibe les particules par capillarité ;
 - liquide inutilisable par les végétaux qui est très fortement lié aux particules solides du sol

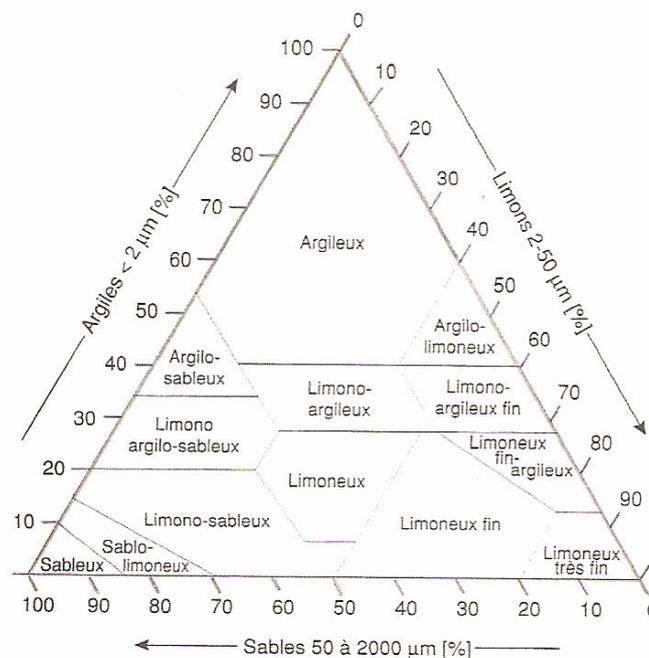
- ◆ La **fraction gazeuse**, ou l'« atmosphère du sol », est composée des mêmes gaz que l'air auxquels s'ajoutent certains gaz provenant de la décomposition des MOS (méthane et ammoniac)

2.1.2. Texture du sol, structure du sol, porosité et argiles

Les constituants du sol interagissent pour lui conférer ses propriétés (Gobat *et al.*, 2005). L'agencement des trois fractions décrites ci-dessus contrôle les fonctions de transfert (eau, soluté et gaz) et les propriétés mécaniques des sols (stabilité structurale, résistance à la compaction).

La **texture** d'un sol se définit par les proportions relatives des constituants triés selon leur taille. (Figure1, Gobat *et al.*, 1998 : p45)

Figure 1 : Triangle des textures minérales



On classe les particules minérales à partir d'une analyse granulométrique, selon une échelle allant du sable grossier (2 à 0,2 mm) aux particules microscopiques de l'argile (moins de 0,002 mm). Cette classification est physique et ne préjuge pas de la composition chimique des fractions. Les sables fins peuvent contenir des éléments de quartz, de minéraux d'altération des roches ou des particules de roches sédimentaires (calcaires, gypse,...). En ce qui concerne les fractions très fines dites argileuses, on retrouve des argiles, des colloïdes minéraux (grains fins de quartz, silice hydratée, oxyde de fer ou d'alumine, calcaires, autres éléments minéraux,...). (Mustin, 1987).

La texture et son complémentaire, la **porosité** (le volume de vides laissés par les particules), agissent sur les propriétés physiques du sol (structure, aération, rétention de l'eau) :

- les sols sableux sont « perméables » et « filtrants » : la grosseur des particules de sable et les grands espaces qui les séparent favorisent la pénétration de l'eau et de l'air mais retiennent peu l'eau. Les sols sableux s'agglomèrent difficilement en motte ce qui les rend légers et faciles d'accès aux racines mais aussi sensibles à l'érosion.
- les sols limoneux sont « battants » et « asphyxiants » : leurs particules fines laissent peu d'espace, ce qui conduit le sol à se tasser sous l'effet de la pluie et à retenir l'eau qui ne s'infiltré pas en profondeur provoquant la suffocation des racines
- les sols argileux sont imperméables : leurs fines particules agissent comme une colle qui empêche l'infiltration de l'eau.

Cependant, les propriétés mécaniques d'un sol ne sont pas uniquement déterminées par sa texture. Les éléments à granulométrie variable qui le composent sont enrobés d'une sorte de pâte, de colle les réunissant en agrégats. Le sol, comme un édifice, se construit et possède une structure dont la forme et la solidité dépendent non seulement :

- de ses éléments constituants minéraux ou organiques
- mais aussi de ces éléments liants appelés « colloïdes » également d'origine minérale (argiles) ou d'origine organique (humus).

La **structure** d'un sol est donc le mode d'assemblage de ses constituants solides. On peut la définir comme « *l'ensemble des caractères liés à la disposition spatiale des éléments qui constituent le solum ainsi qu'à la nature et à l'intensité des liaisons qui existent entre eux* ». (Girard *et al.*, : p538)

Les particules du sols maintenues ensemble par des forces physiques et chimiques forment des agrégats (Pierzinsky *et al.*, 2005). L'absence ou la présence ainsi que la forme de ces agrégats définissent le type de structure (Gobat *et al.*, 1998)

La structure est un état du sol qui varie avec le temps selon la texture mais aussi selon le taux d'humidité, l'état des colloïdes et la présence de matière organique,... (Gobat *et al.*, 1998). La porosité qui en découle subit de nombreuses modifications : fissuration par les racines, labourage sous l'action des organismes fouisseurs et des vers de terres, fissuration suite à alternance pluie/dessèchement ou gel/dégel et enfin labourage ou compactage par le travail de l'homme (Girard *et al.*, 2005).

Les argiles, non au sens granulométrique mais au sens minéralogique du terme¹, jouent un rôle central dans le fonctionnement du sol. Grâce à leur caractère colloïdal, elles agissent sur ses propriétés physiques et aussi chimiques.

Le **colloïde** se dit d'un système dans lequel les particules sont en suspension dynamique dans un liquide, c'est-à-dire « comme une colle, une gélatine ». Ces particules sont entourées d'une couche dense de charges, généralement, négatives² qui attirent les ions positifs (H^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , NH_4^+). Du caractère colloïdal des argiles dépend trois propriétés essentielles (Soltner, 1992):

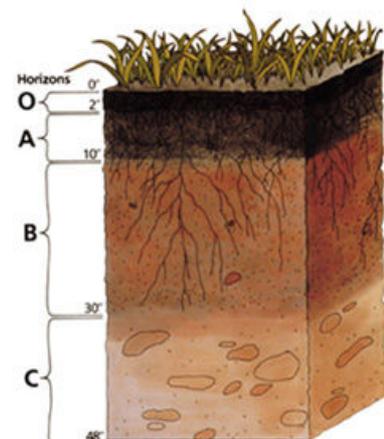
- Elles sont *électronégatives* : de cette propriété dépend la mise à disposition d'ions pour la nutrition des plantes. Localement des charges positives existent aussi sur les feuillets des argiles ce qui permet la fixation d'anions comme le phosphate (PO_4^{3-}) ;
- Elles sont *hydrophiles* ce qui leur permet de fixer l'eau ;
- Elles sont capables de se *dispenser* ou de *foculer*, propriété qui leur permet de se séparer facilement de l'eau et de souder les particules du sol en de solides agrégats.

2.1.3. Profil et horizons

Le sol, après avoir subi au cours du temps divers processus d'altération, d'humidification et de différenciation, se présente sous la forme d'une succession de couches superposées, plus ou moins distinctes selon son état d'évolution (Figure 2, Wikipédia). Ces couches diffèrent l'une de l'autre par un ou plusieurs caractères tels que l'appauvrissement ou l'enrichissement en certaines substances, la texture, la structure, ...

Figure 2: Les différents horizons d'un profil de sol

- O = horizon organique
- A = horizon organominéral
- B = horizon illuvial (enrichi d'éléments des horizons extérieurs)
- C = matériau parental altéré



¹ Les argiles issues de l'altération des roches par hydrolyse de minéraux silicatés. *La grande diversité des minéraux et des conditions biochimiques conduit à de nombreux types d'altération de silicates* (souvent combinaison d'alumine et de silice). (Gobat *et al.*, 1998)

² Les oxydes de fer et d'alumine sont des colloïdes électropositifs

Chaque couche, correspond à un **horizon**. Elle a des propriétés particulières, plus ou moins proches de celles des couches sus et sous-jacentes. L'ensemble des horizons forme le **profil** d'un sol ; que l'on peut aussi définir comme « *l'épaisseur totale du sol ayant une importance du point de vue écologique et au sein de laquelle se manifeste un certain nombre de propriétés qui rendent le sol différent de la roche-mère originelle* »³.

2.1.4. Le sol agricole

Diehl définit le sol agricole comme « *la partie de la couche superficielle de l'écorce terrestre qui, grâce à sa structure meuble et sa composition physico-chimique, est en mesure d'assurer un développement normal des végétaux cultivés.* » (Diehl cité par Soltner, 1992 : p13). Cette couche « superficielle » qui s'étend généralement sur une profondeur de 30 cm renferme la majorité des éléments nutritifs et de l'activité biologique des sols.

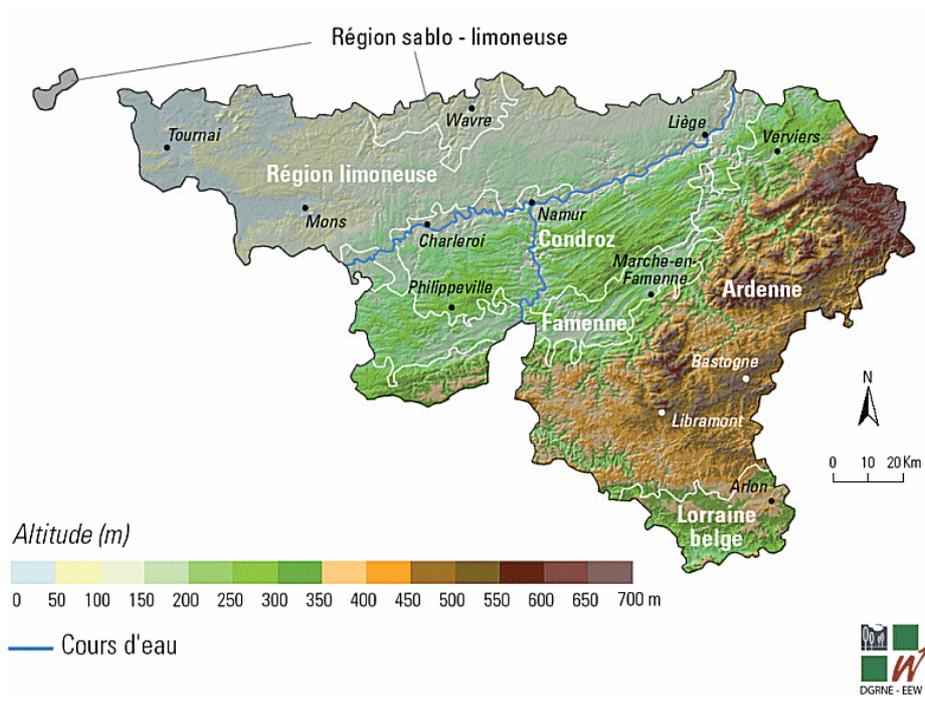
Dans ce travail, le terme « terres cultivées » se réfère aux sols qui font l'objet d'une exploitation agricole et qui sont travaillés dans le but de produire des récoltes. Il n'englobe pas les prairies permanentes.

2.1.5. Textures et occupation des sols wallons

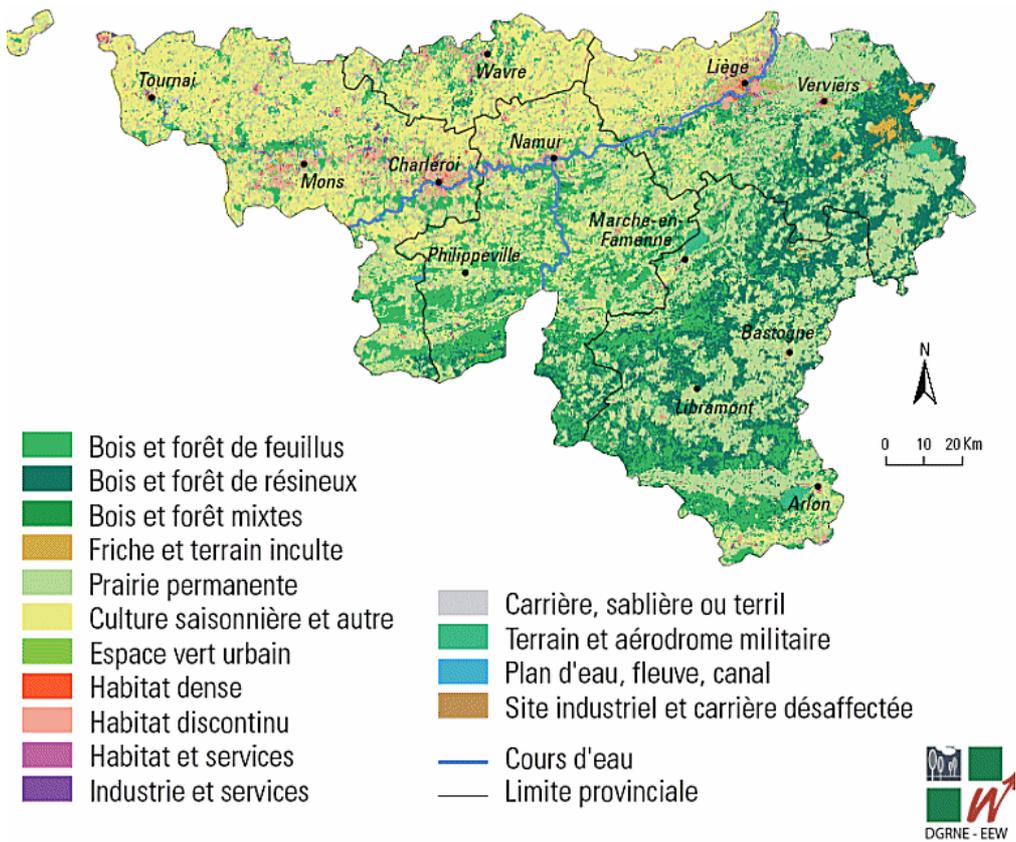
Les cartes qui suivent montrent que les zones de grandes cultures sont principalement localisées dans les régions limoneuses et sablo-limoneuses (cartes 1 et 2, CEWW, 2007).

Carte 1 : Région wallonne: régions naturelles et reliefs

³ <http://users.skynet.be/the.fly/htm/P%25E9dologie/Profil.htm>



Carte 2 : Région wallonne : occupation du sol



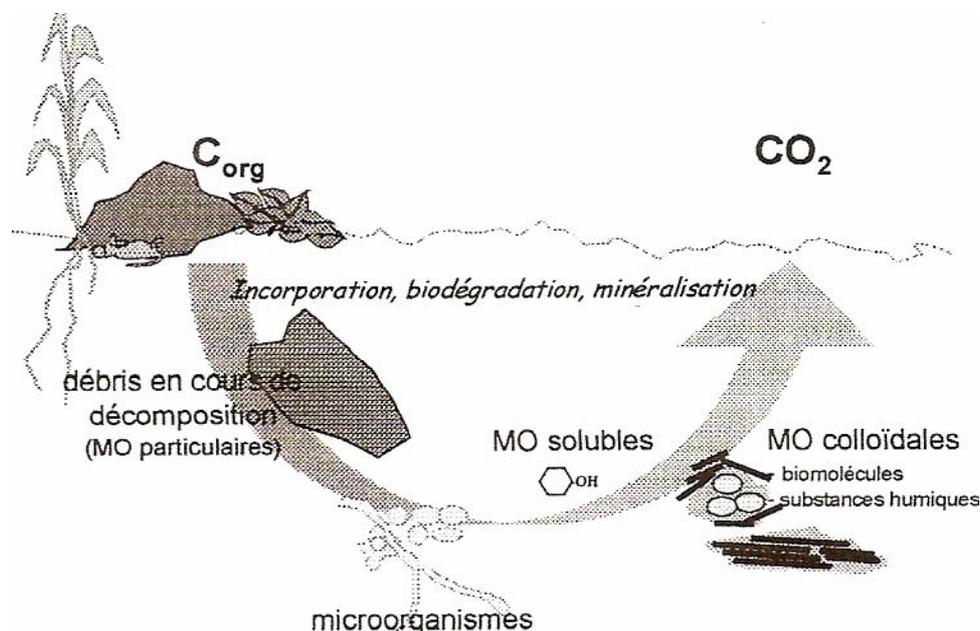
2.2. Les matières organiques du sol (MOS)

« Un sol prend naissance dès que la moindre vie végétale et animale vient s'installer dans les premiers débris de décomposition d'une roche » (Soltner, 1992, p37)

Baldock and Skjemstad définissent les matières organiques du sol comme l'ensemble de tous les matériaux organiques dans les sols quelle que soit leur origine et quel que soit leur état de décomposition⁴

Ces éléments organiques sont constitués d'un mélange variable d'éléments chimiques allant des débris végétaux relativement peu altérés aux fractions inertes hautement décomposées (Figure 3, Chenu, 2003 : p109). Comme pour la fraction minérale, les proportions relatives de chacun de ces éléments varient fortement d'un sol à l'autre. Mais, contrairement aux constituants minéraux qui sont de composition relativement stable, les MOS sont multiples et se transforment sans cesse : « Leur devenir normal est de redonner les substances qui ont servi à les construire, pour servir à nouveau à l'édification de nouvelles matières organiques. » (Soltner, opcit p37).

Figure 3: Les matières organiques sont un ensemble complexe de différents constituants organiques, en perpétuel renouvellement par incorporation et biodégradation



⁴ « all organic materials found in soils irrespective of origin or state of decomposition » Baldock et Skjemstad 1999 cité par Krull et al. 1999, p5

2.2.1. Les compartiments fonctionnels

Les MOS revêtent des formes extrêmement variées : chimiquement elles contiennent: des éléments structurels (C, H, O) et un certain nombre d'éléments en proportion variable (N, P, S, K, Ca, Mg,...).

Leur particularité en comparaison avec les constituants minéraux du sol est que les MOS sont en constante transformation.

Une des manières des les appréhender consiste à les définir par leur degré de transformation. Blaise Leclerc (2002) classe la fraction organique du sol en trois compartiments distincts : la matière organique vivante, la matière organique fraîche et la matière organique non figurée ou amorphe. La description de Soltner (1992) propose quant à elle quatre compartiments « fonctionnels »:

Les végétaux et animaux vivants qui évoluent à la surface et dans les couches plus profondes du sol :

- les racines ;
- les vers de terres et autres rongeurs ;
- la microflore du sol (bactéries, champignons, actinomycètes, algues) ;
- la microfaune du sol (protozoères, insectes, nématodes).

Cette partie est responsable de la majorité des transformations qui affectent le carbone organique du sol. Son taux de renouvellement, très rapide, est inférieur à 1 an.

Ce compartiment représente 0,5% à 4,5% du carbone organique et 4% à 10% de l'azote organique du sol (Nicolardot, 1993).

La **matière organique fraîche** qui est composée majoritairement des débris végétaux (feuilles, racines mortes, résidus de récoltes) et, dans une moindre mesure, de débris animaux (déjections, cadavres). La composition de ces débris est sensiblement la même que les tissus vivants dont ils proviennent :

- substances hydrocarbonnées (sucre, amidon, cellulose, lignine, matière grasse, résine) ;
- substances azotées, surtout sous la forme de protéines ;
- sels minéraux libres (calcium, magnésium, potassium, sodium)

Sitôt arrivées au sol, ces substances sont attaquées par la microflore et la microfaune. La vitesse de leur décomposition dépendra essentiellement de leur complexité moléculaire. Les sucres étant les premiers décomposés alors que la lignine, les résines et les tanins résistent plus longtemps à l'altération.

Les composés intermédiaires, aussi appelé « produits transitoires » ou « matière organique labile », représentent le maillon de cette chaîne de transformation où les grosses molécules de la MO fraîche se sont transformées en substances minérales simples ou en très petites molécules :

- dioxyde de carbone (CO₂) et vapeur d'eau (H₂O)
- matières minérales (nitrates, phosphates, carbonates, sulfates, etc.)

Ce processus de décomposition est appelé « **minéralisation primaire** » et les composés qui en résultent seront réutilisés comme substances nutritives par la partie vivante du sol ou serviront de précurseurs des substances humiques. Enfin, une certaine partie sera perdue par lessivage.

Leur durée de vie des composés intermédiaires peut atteindre quelques dizaines d'années. Ce compartiment regroupe 10% à 40% de la MOS.

Ces trois premiers compartiments fonctionnels de la MOS représentent la composante active de la MO du sol. Celle-ci agit comme réserve principale d'éléments nutritifs libérés après minéralisation.

L'humus, ou substances humiques, constitue la matière organique stable. Une partie des produits transitoires, au lieu de se minéraliser complètement, va connaître une évolution inversée et les molécules simplifiées vont se regrouper, se polymériser pour aboutir à des macromolécules complexes, peu solubles dans l'eau et tensioactives. Il s'agit du processus d'« **humification** »

La partie de la MOS qui en résulte est chimiquement et physiquement protégée. La complexité de ses molécules et son association avec des particules minérales du sol la rendent peu accessible et dès lors peu dégradable par les micro-organismes du sol. Outre leur stabilité, les composés humiques offrent une très grande variabilité, ce qui permet à Leclerc (2002) de dire qu'il n'existe sans doute pas deux molécules humiques identiques⁵.

La durée de vie des substances humiques varie entre quelques centaines d'années et plus de milles ans. Au cours de celle-ci, cet « humus stable » sera à son tour dégradé par les micro-organismes au cours du processus très lent de « **minéralisation secondaire** ».

2.2.2. Les complexes argilo-humiques

Les macromolécules de l'humus interagissent en permanence avec :

⁵ « Contrairement aux molécules biologiques, les substances humiques ne sont donc pas la répétition d'une séquence définie, mais elles sont construites à partir de briques élémentaires : unités aromatiques plus ou moins complexes, sucres, acides aminés, chaînes hydrocarbonées qui sont assemblées de manière aléatoire. L'ensemble forme un polymère ramifié, arrangé en pelote désordonnée, plus ou moins replié selon les conditions physico-chimiques. » (Leclerc, 2002, p16).

- Les autres molécules organiques du sol (protéines, polysaccharides, acides gras) ainsi que les pesticides et polluants organiques ;
- Les minéraux comme les argiles, les ions minéraux et les hydroxydes

L'humus possède les mêmes propriétés colloïdales que les argiles : les substances qui le composent sont hydrophiles et retiennent plusieurs fois leur poids en eau. Elles ont également la capacité de fixer des ions. (Mustin, 1987)

Malgré leur surface principalement électronégative, l'humus et les argiles s'associent dans un même complexe, grâce aux cations et hydroxydes de liaison, et se protègent mutuellement (Mustin, 1987) :

- L'humus tempère les actions néfastes des argiles sur la structure du sol en les protégeant de la dispersion.
- les argiles protègent l'humus en ralentissant la minéralisation, favorisant l'humification

Les complexes argilo-humiques jouent donc un rôle essentiel dans le fonctionnement des sols et leur présence influence les propriétés physiques et physico-chimiques de ces derniers.

2.2.3. Bilan organique du sol

Nous venons de voir que les transformations que subissent les matières organiques (MO) dans le sol sont multiples. Que ce soit par minéralisation primaire ou secondaire, elles finissent toutes par être oxydées après un laps de temps plus ou moins long (quelques jours à plusieurs milliers d'années). Il existe une série de modèles⁶ qui tentent de schématiser ces processus. Leur objectif est d'estimer la quantité de MO qui sera conservée dans le sol (Vanongeval *et al.*, 1995).

Hénin et Dupuis ont proposé en 1945 un modèle du bilan organique du sol (équation 1, Le Villio *et al.*, 2001 : p53) qui est très régulièrement cité. Il permet de calculer la concentration en matière organique stable d'un sol en tenant compte des gains (matière fraîche se transformant en humus) et pertes (par minéralisation).

⁶ Ces différents modèles (Janssen 1986, Rothamsted 1987, Century, etc) ne sont pas expliqués ici. Ils font l'objet de nombreuses recherches et d'améliorations (nombre croissant de variables pour mieux « coller à la réalité »). Leur validation en comparaison avec les observations empiriques est encore trop souvent peu probante.

Équation 1 : Formule de Hénin et Dupuis

$$y_t = \frac{K_1 x}{K_2} (1 - e^{-K_2 t}) + y_0 e^{-K_2 t}$$

y_t = quantité d'humus au temps t : y_0 à $t=0$

x = apport annuel de matière organique

(y_t , y_0 et x sont exprimés dans la même unité)

K_1 = coefficient isohumique

K_2 = coefficient de minéralisation

Le **coefficient isohumique K1** définit le rendement en MOS d'une matière organique puisqu'il représente « le rapport de l'accroissement du pourcentage de matière organique contenue dans le sol à la quantité de matière sèche apportée, exprimée en % de terre sèche » (Hénin et Dupuis, 1945 cités par Le villio, 2001 p53) En d'autres termes, il correspond au rapport entre la quantité des matières organiques apportées qui contribue à l'augmentation du taux de MOS (équivalent à la quantité de MO stable) et la quantité de matière organique totale apportée.

Les produits qui se décomposent très facilement ont un coefficient isohumique faible. Ce dernier varie généralement de 15% pour la paille à 70% pour certains composts (Le Villio, 2001).

Le **coefficient de minéralisation K2** définit quant à lui le taux annuel de destruction du stock organique du sol (minéralisation secondaire). Souvent estimé à 2%, il dépend en réalité des conditions pédoclimatiques (caractéristiques du sol et climat) comme le montre le tableau (Rémy et Marin-Lafèche, 1976 cités par Le Villio, 2001 p54). En outre, le niveau de restitutions organiques exerce aussi une influence sur K2 : plus elles augmentent, plus le K2 est important.

Tableau 1 : Coefficient annuel de destruction de la matière organique

Types de sol	Argile %	Calcaire ‰	pH	Coefficient K_2
Sableux neutre	50	2	7,0	0,020
Sableux acide	50	0	5,0	0,010
Sableux calcaire	50	100	8,0	0,017
Limon moyen	150	2	7,5	0,016
Limon argileux	220	2	7,5	0,013
Limon calcaire	100	300	8,1	0,009
Argile	380	2	7,5	0,010
Argilo-calcaire	300	150	8,0	0,007

2.2.4. Facteurs intervenant sur la transformation des MOS

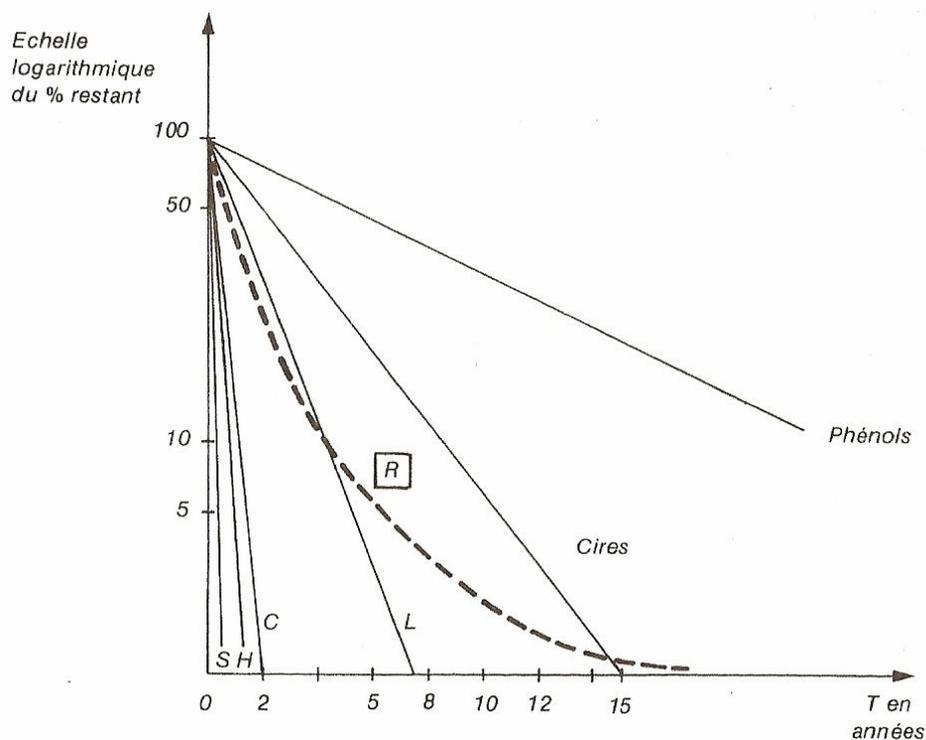
Les transformations qui affectent la MO des sols sont essentiellement dues aux activités biologiques décrites plus haut (minéralisations primaire et secondaire, humification). Ces

dernières subissent en outre l'influence des facteurs du milieu et de l'action de l'homme (Nicolardot, 1993).

◆ **Nature et caractéristiques des MOS :**

Les caractéristiques intrinsèques des matières organiques sont un des principaux déterminants de leur minéralisation (Parnaudeau, 2005). La description de ces caractéristiques la plus souvent utilisée est la composition chimique et biochimique des MO : composés solubles, hémicellulose, cellulose, lignines et cutines, et tanins. Plus les molécules organiques sont complexes, plus la biodégradabilité diminue et plus la durée de décomposition sera longue (figure 4, Mustin, 1987 : p42). En règle générale, les composés solubles sont les plus rapidement utilisés par la microflore. Les hémicelluloses et la cellulose nécessitent plus de temps, alors que la lignine s'accumule dans le sol en raison de sa résistance à la biodégradation (structure macromoléculaire dérivée du noyau de phénol incluant de multiples types de liaisons) (Mustin, 1987).

Figure 4 : Taux de biodégradation des composantes de la biomasse végétale dans les sols et litières



Composants : (S) Sucres 15 % Pourcentage litière
 (H) Hémicelluloses 15 %
 (C) Cellulose 20 %
 (L) Lignines 40 %
 Cires 5 %
 Phénols 5 %

[R] = Décomposition totale de la matière organique = Résultante

Outre ces composés d'origine végétale, d'autres types de composés comme les protéines et les lipides influent également le processus de biodégradabilité. (Parnaudeau, 2005)

De plus, la décomposition est parfois limitée par la toxicité de certains composés : paroi végétale qui contient des composés fongicides ou concentration lors de la biodégradation de toxiques initialement liés à d'autres molécules (Swift et al. et Houot et al. cités par Parnaudeau, 2005).

◆ **Facteurs biologiques**

Il existe en général, pour un sol donné, tous les micro-organismes nécessaires à la biodégradation des résidus végétaux et animaux de l'écosystème lié à ce type de sol. Les composés solubles et facilement accessibles sont principalement décomposés par les bactéries tandis que la cellulose et les lignines sont plutôt dégradées par des champignons. (Parnaudeau, 2005). La croissance de leur population respective dépend des facteurs qui suivent.

◆ **Composition chimique du sol :**

Elle peut faire varier les sources nutritionnelles des micro-organismes. Ces derniers ont besoin d'azote *minéral* pour métaboliser le carbone des résidus. La teneur en azote du sol participe donc au contrôle de la vitesse de décomposition de la MO fraîche.

◆ **Facteurs de l'environnement :**

Ils permettent d'augmenter ou de diminuer l'activité des micro-organismes.

Température du sol :

Plus la température sera élevée plus la vitesse de décomposition va augmenter. D'après Niclardot (1993), l'optimum de l'activité de la microflore est atteint, sous nos climats, à des températures comprises entre 25 et 35 °C. Pour un intervalle de température compris entre 10 et 40°C, la vitesse de dégradation est généralement multipliée par deux quand la température augmente de 10°C. En dehors de cet intervalle, la décomposition des matières organiques est fortement réduite, voire complètement inhibée.

Humidité du sol et aération du sol, disponibilité en oxygène :

En cas de manque de liquide, la minéralisation est ralentie de par le déclin de l'activité des populations microbiennes (mort ou passage en vie ralentie). En revanche, si l'humidité est

trop forte, les cavités du sol sont vite saturées et c'est le manque de disponibilité en oxygène pour les micro-organismes qui va contrôler le processus de décomposition.

L'humidité du sol dépend non seulement du climat local (régime des précipitations) mais aussi du type de sol (propension plus ou moins grande à retenir l'eau).

En cas d'absence ou de faible teneur en oxygène, la décomposition, qui est essentiellement le fait de bactérie aérobie, est fortement ralentie. Par ailleurs, la présence d'oxygène est nécessaire au développement des racines de végétaux qui sont une source élémentaire des MOS.

La teneur en oxygène d'un sol dépend de sa structure qui elle-même est influencée par l'action des racines et des vers de terre.

L'acidité du sol :

Le pH d'un sol doit être proche de la neutralité pour obtenir un optimum de décomposition. En effet la minéralisation des résidus est fortement ralentie dans les sols acides (pH 5) où la microflore est principalement de nature fongique. La plupart des sols sous couvert forestier de même que les tourbières présentent une acidité importante, ce qui explique en partie que les MOS y sont oxydées particulièrement lentement.

La texture :

La texture du sol peut également influencer la minéralisation, entre autres par la présence d'argiles, lesquelles assurent une protection physique de la matière organique (Parnaudeau, 2005).

◆ **Pratiques culturales :**

Les pratiques culturales interviennent en modifiant les facteurs précités. Les différentes méthodes de labour, de fumure et d'amendement (mulching, répartition dans le profil, etc.) en favorisant l'accessibilité du substrat pour la microflore et l'évolution des résidus dans le sol favorise la décomposition des MOS. Le travail du sol intervient également de façon marquée dans la disponibilité en oxygène et l'état hydrique du sol (labour, irrigation, drainage).

3. Rôle clef des matières organiques dans les sols cultivés

La présence de matières organiques dans un sol cultivé est l'un des indicateurs principaux de ses qualités aussi bien agronomiques (production de produits agricoles, rendement) que celles qui sont liées à ses fonctions environnementales (qualité de l'eau, de l'air, biodiversité).

La quantité, la diversité et l'activité de la faune et des micro-organismes d'un sol sont en relation directe avec la présence de la matière organique. Cette activité biologique a une influence majeure sur les propriétés physico-chimiques des sols (Gobat *et al.*, 1998).

3.1. La fertilité du sol

« *La fertilité d'un sol est son aptitude à produire* » (Soltner, p171)

Le sol remplit deux fonctions essentielles : il nourrit la plante et lui offre un site structuré de croissance où se développent ses racines et où circulent air et eau. Les sols abritent en outre une multitude de micro-organismes dont l'action participe au maintien de deux premières fonctions. La fertilité d'un sol relève donc de ses propriétés chimiques, physiques et biologiques.

La manière dont sont arrangées les différentes sortes de pores et de racines, la distribution des colonies microbiennes et la distribution des chemins préférentiels de l'eau de l'air et des solutés correspondent à un type particulier d'organisation du sol, à un type de structure et de fonctionnement et donc un type de fertilité. (Kretzschmar, 1993)

A cette fertilité « intrinsèque », s'ajoutent des caractéristiques climatiques (pluviométrie, température, ensoleillement), qui conditionnent plus ou moins favorablement la croissance végétale, ainsi que le travail de l'agriculteur (Gobat *et al.*, 1998).

La fertilité d'un sol englobe classiquement trois types de composantes distinctes (Soltner, 1992) :

- les propriétés physiques du sol (aération, humidité, facilité du travail) ;
- ses propriétés chimiques (bon fonctionnement des mécanismes de fixation et d'échange de substances nutritives entre le sol et la plante) ;
- et ses propriétés biologiques (vie microbienne intense participant à la nutrition des plantes).

La présence de matières organiques, en améliorant ces trois qualités, participe de manière essentielle à la fertilité des sols. Les différents compartiments qui les composent jouent des

rôles multiples et agissent ensemble, à la fois par leur présence mais aussi par les transformations qu'ils subissent.

◆ **Qualités physiques**

On entend par fonctions physiques d'un sol, i) ses propriétés mécaniques telles que la stabilité structurale ou la résistance au tassement et ii) le contrôle qu'il opère sur la circulation de l'eau, de l'air et des solutés en fonction de l'agencement de ses pores. Les MOS corrigent les caractères excessifs des sols.

L'humus présente les mêmes qualités colloïdales que l'argile ce qui lui permet d'améliorer la structure des sols trop « légers » en cimentant les particules en agrégats stables, et d'alléger les sols lourds en diminuant l'adhésivité et en les rendant plus friables De plus, il régularise l'humidité de tout type de sol en favorisant l'évacuation en excès des sols argileux, en augmentant la rétention d'eau des sols sableux. (Soltner, 1992)

Les lombriciens participent à l'aération du sol en creusant des galeries dont la distance peut atteindre 4000 km par hectare. Ils opèrent un travail fin et en profondeur du sol, ce qui assure la bonne répartition des fractions organiques et les prépare physiquement à la formation du complexe argilo-humique. Enfin, ils sécrètent un mucus qui maintient les fines particules du sol ensemble. (Mustin, 1987)

Comme les vers de terres, les racines, les bactéries et les champignons sécrètent des polysaccharides qui agrègent les particules minérales entre elles.

Enfin l'activité intense des micro-organismes influe sur les propriétés thermales du sol. (Krull *et al.*, 1999)

◆ **Qualités chimiques**

Les MOS constituent le réservoir d'éléments nutritifs pour les plantes. Les plantes sont composées d'éléments minéraux classés selon leur abondance (Lemaire, 1993) :

Eléments majeurs (95%) : carbone (C), hydrogène (H), oxygène (O), azote (N)

Eléments moyens (4%) : phosphore (P), potassium (K), calcaire (Ca), magnésium (Mg), Sodium (Na), chlore (Cl), soufre (S)

Eléments mineurs (1%): fer (Fe), zinc (Zn), cuivre (Cu), bore (B)...

Les MOS agissent sur l'alimentation minérale des plantes selon leur besoins particuliers et ce, par les deux voies différentes et simultanées que sont la mise à disposition des éléments minéraux et la modification des caractéristiques chimiques du sol (Lemaire 1993).

Comme les éléments minéraux existent pour la plupart sous la forme organique et sont inassimilables par la plante, l'ensemble des composés fertilisants (éléments structurants tels que l'azote, le phosphore et le soufre) et des oligo-éléments sont progressivement minéralisés et libérés sous l'action des micro-organismes du sol.

Cette libération est marquée par sa continuité et son rythme, la période de minéralisation active coïncidant généralement avec les besoins importants des végétaux, du fait d'une similitude de facteurs du développement végétal et microbien (température, humidité, teneur en oxygène, etc) (Leclerc, 2001, p26)

L'humus agit également sur la nutrition des plantes grâce à sa minéralisation continue. Mais Il améliore surtout les caractéristiques physico-chimiques du sol par ses réactions acides et ses propriétés colloïdales : rétention sur sa surface électro-négative de minéraux, des oligo-éléments et des métaux lourds, formation de complexes avec le phosphore,... De nombreux minéraux du sol, en particulier ceux qui portent au moins une charge positive, comme le potassium (K^+) le calcium (Ca_2^+) et le magnésium (Mg_2^+), adhèrent aux surfaces chargées négativement des particules colloïdales.

En retenant ces minéraux, l'humus contribue à prévenir le lessivage (l'écoulement) des nutriments et des polluants lors des pluies abondantes ou sous l'effet de l'irrigation. Ils les relâchent au profit de la solution du sol progressivement lorsque des protons du sol viennent les remplacer à la surface des particules. Ce processus, appelé échange de cations⁷, est stimulé par les racines qui sécrètent des protons et des composés formant des acides dans la solution du sol.

C'est grâce à cette capacité d'échange que la présence de MOS favorise l'action des engrais minéraux et ce, en permettant l'absorption des éléments fertilisants à travers la membrane cellulaire des racines des plantes. A ce propos, on constate une baisse d'efficacité des engrais dans les terres qui s'appauvrissent en MO.

La capacité d'échange cationique exprime également la capacité d'un sol à résister aux changements de pH (capacité tampon) et est fortement liée à sa composition (sol minéral à CEC généralement faible ou sol organique à CEC souvent élevée).

◆ **Qualités biologiques**

Les MOS représentent la vie biologique dans le sol que celle-ci soit microbienne (microflore et microfaune), animale (vers de terre, faune du sol) ou végétale (racines).

⁷ **Capacité d'Echange Cationique (CEC)** : certains cations sont situés à la surface de particules du sol ayant des charges négatives. Ces cations peuvent échanger leur place avec d'autres cations. C'est pourquoi on les nomme les "cations échangeables". La CEC correspond à la somme des cations que le sol peut échanger

Elles sont aussi le support de cette vie et son habitat : les MOS sont une source d'énergie et de nutriments pour tous les organismes hétérotrophes qui vivent dans les sols. « Il y a donc une relation étroite entre les teneurs en MO et l'activité biologique des sols. » (Raffin, 1993)

La micro faune et micro flore d'une extrême richesse ainsi entretenue est composée d'insectes, de vers de terre, de nématodes, d'actinomycètes, de champignons, d'algues. Plus ce monde souterrain est varié, plus il assurera un maintien des pathogènes potentiels du sol au dessous de leur seuil de nuisibilité. (Raffin, 1993)

Entre 20 et 75% de l'activité microbologique des sols est inféodée aux galeries de vers de terre (Mustin, 1987).

◆ Notion de « santé » du sol

La notion de fertilité correspond essentiellement à une optique de production (Warin *et al.*, 2004). Certains auteurs ont tenté de l'élargir. Ainsi Soltner (1992) la définit comme l'« *aptitude du sol à produire toute la chaîne alimentaire allant des micro-organismes à l'homme, en passant par la plante et l'animal, et ceci pendant des générations.* » (Soltner, 1992 : p175). Cette conception plus « durable » intègre la qualité de la production mais aussi la durée de cette aptitude à produire et l'évolution de celle-ci dans le temps.

Doran et Safley, cités à plusieurs reprises⁸, parlent eux de la « **santé** » du sol qu'ils définissent comme « *the continued capacity of soil to function as a vital living system, within ecosystem and land-use boundaries, to sustain biological productivity, promote the quality of air and water environments, and maintain plant, animal and human health.* ». Contrairement à la notion de qualité, qui est en réalité contingente de l'utilisation que l'on souhaite faire d'une terre (par exemple faire pousser du blé ou accumuler de l'eau), la notion de santé se réfère aux rôle environnemental au sens large du sol (Rees, 2001).

Le monde agricole a progressivement été sensibilisé au fait que les fonctions du sol dépassaient la simple perspective de la production agricole.

3.2. Les autres fonctions et propriétés du sol

◆ La résistance à l'érosion

La résistance à l'érosion est une estimation de la capacité de chaque sol à résister à l'action désagrégeante de l'eau et du vent grâce à ses caractéristiques physiques.

⁸ Rees *et al.*, 2001, Krull *et al.*, 1999, Warin *et al.* 2004

La battance et l'érosion sont des phénomènes liés à un sol dont la structure est instable et sur lequel les fortes pluies provoquent l'éclatement des agrégats. Ces particules détachées des agrégats vont colmater les interstices de la structure et former une croûte superficielle, dite de battance. L'eau qui ne peut plus s'infiltrer ruisselle sur cette croûte. Le ruissellement entraîne ensuite la formation de rigoles et de ravines. Ce phénomène naturel peut être amplifié par le relief (terrain accidenté, fortes pentes) et par l'ouvrage de l'homme (Le Villio *et al.*, 2001).

Les principales causes de l'instabilité structurale sont, d'une part la texture du sol (la texture limoneuse présente des risques d'érosion diffuse si elle contient moins de 15% d'argile) et d'autre part, la diminution du taux de matière organique à des teneurs inférieures à 2% ou 3% qui va provoquer une diminution de la stabilité des agrégats à l'eau (Le Villio *et al.*, 2001).

Une structure affaiblie sensibilise également les sols à l'érosion causée par le vent : les très fines particules sont mises en suspension et sont transportées sur de grandes distances.

Ce phénomène d'érosion (surtout hydrique mais aussi éolienne) est à l'origine de pertes importantes de sols cultivables (aggravation de la dégradation de leur stabilité, de leur structure voire de leur texture, réduction de la disponibilité de nutriments entraînés, semences emportées, plantes endommagées). Ils peuvent en outre avoir des conséquences écologiques et financières importantes pour les structures et les écosystèmes situés en aval (Goor, 2006) :

- Destruction de routes, de chemins, de ponts, de clôtures, d'habitations ;
- Ensablement des cours d'eau, engorgement des collecteurs d'égouts et des bassins d'orage, risque d'inondation
- contamination des cours d'eau et des autres agro-systèmes par les particules importées qui véhiculent des polluants et/ ou des pathogènes.

Les sols agricoles, soumis aux pratiques culturales qui tendent à homogénéiser le paysage (remembrement), à abaisser la teneur en matières organiques, à dégrader la structure du sol et à le compacter (labour), sont particulièrement sensibles à l'érosion. Ils le sont d'autant plus que ce phénomène tend à s'amplifier avec le temps : les sols exposés sur des sites érodés seront plus facilement dégradables et les sous-sols, dont la fertilité est amoindrie, seront souvent la cause de rendements inférieurs et donc d'un couvert végétal moins dense, avec comme résultat une surface moins bien protégée. A long terme, la stabilité d'un sol, sa structure et même sa texture peuvent s'en trouver modifiées avec le risque d'altérer sa capacité de rétention, ce qui le rendra particulièrement sensible dans les périodes de sécheresse.

◆ **Le contrôle de la qualité des eaux**

Grâce à ses propriétés de rétention d'eau et à sa capacité d'agir comme tampon, le sol se comporte comme un filtre naturel. L'eau qui circule dans les sols cultivés se charge des nutriments et de polluants divers. Ces substances sont partiellement retenues par les particules colloïdales évitant ainsi leur lessivage et permettant de préserver la qualité des eaux de surface et des eaux profondes. (CRMOS, 1995)

◆ **La neutralisation de nombreux polluants**

Toujours grâce à ses propriétés physico-chimiques, mais aussi grâce à sa riche activité biologique, le sol agit non seulement comme un tampon mais en plus, il « traite », transforme et neutralise les différents substances polluantes ou contaminantes pour les rendre inoffensives. (Pierzynski *et al.*, 2005)

Les sols agricoles charrient une quantité importante de micropolluants organiques divers (pesticides, herbicides, anti-fongiques). La présence d'une activité biologique intense en leur sein est un bon indicateur de leur capacité à dégrader ces substances.

◆ **La biodiversité**

Les sols représentent un réservoir immense de biodiversité. Cette biodiversité se répartit depuis le gène, les micro-organismes, la faune, jusqu'aux organismes situés au-dessus du sol (Robert, 2002). Tous les échelons de la chaîne alimentaire y sont représentés, à l'exception des organismes photosynthétiques qui sont limités à la surface du sol. En termes de densité d'individus, on retrouve près de 10 000 milliards de procaryotes par kg de sol, entre 100 et 500 millions de protistes par m², de 250 000 à 5 millions de vers de terre par hectare,... La richesse spécifique est également énorme : les estimations du nombre d'espèces de bactéries se chiffrent en milliers d'espèces par gramme de sol, les collemboles peuvent compter 50 à 60 espèces qui coexistent dans la litière et les horizons superficiels du sol,... (André, 2006). Sans compter qu'une partie immense des espèces de la microflore (95%) sont encore méconnues (Robert, 2002).

La biodiversité est quant à elle un facteur important de résilience des écosystèmes sols. Bien qu'un nombre restreint d'espèces clefs suffise à remplir les fonctions essentielles des sols (décomposition de la matière organique, cycle des nutriments et stabilisation de la structure), et bien que la présence d'autres espèces assumant les mêmes fonctions ne soit pas absolument indispensable, le maintien de la biodiversité offre une certaine garantie en cas de modification du milieu. En effet, les espèces différentes participant pourtant aux mêmes

fonctions réagissent de manière distincte aux facteurs limitants. Elles ne sont donc pas toutes affectées par une perturbation du milieu (présence de substances toxiques, changement du régime hydrique, changement des conditions physico-chimiques) (André, 2006) et continuent à assurer la bonne fertilité.

Dans les sols cultivés, la biodiversité dépend de facteurs naturels (type de sol, type d'humus, niveau d'acidité, la biodisponibilité de nutriments, ...) eux-mêmes influencés par des facteurs anthropiques (pratiques agricoles, pollution des sols).

En général, la conversion de terres sous couvert forestier en terres arables de même que certaines pratiques agricoles provoquent une perte importante de biodiversité : le travail du sol induit une désorganisation profonde des horizons superficiels ; le tassement et la lutte chimique contre les organismes indésirables provoque la disparition d'une partie de la microfaune ; les monocultures réduisent la diversification des milieux dans l'espace.

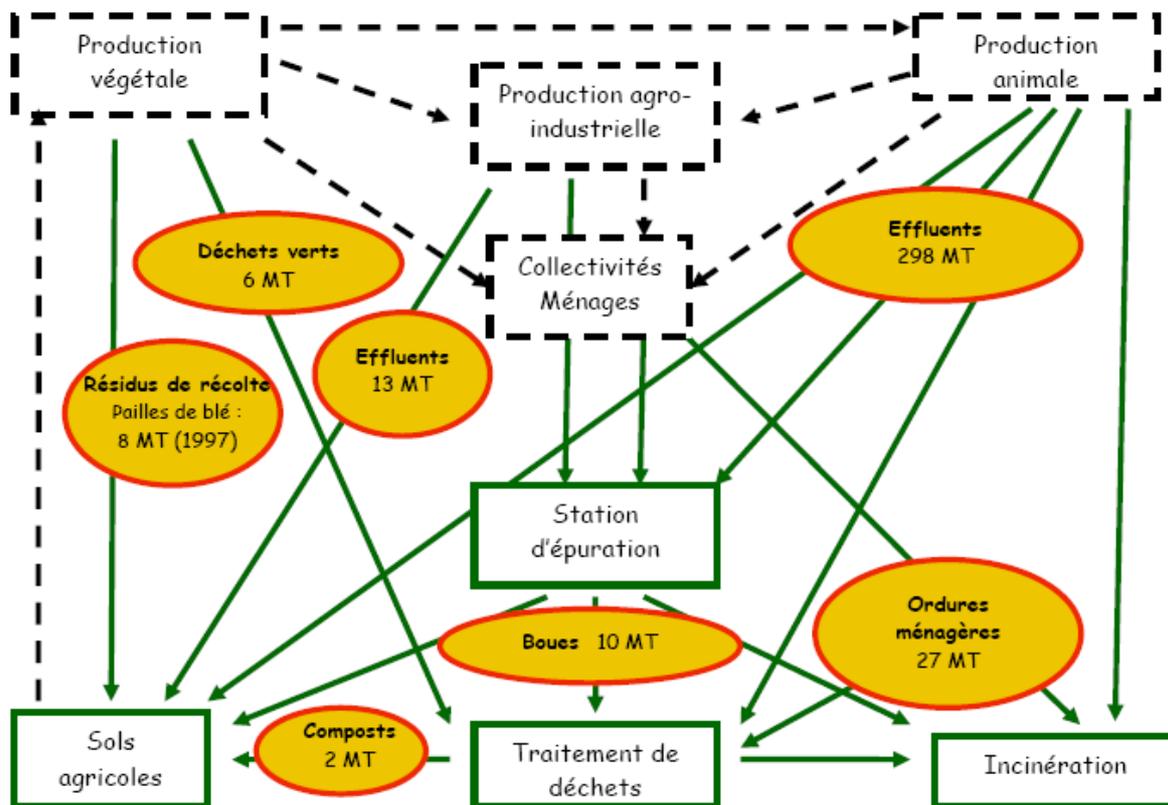
Il existe pourtant une série de pratiques qui favorisent le maintien de la biodiversité dans les sols cultivés : maintien d'une couverture végétale ; rotations culturales longues ; présence de haies. On constate également que la quantité de bactéries présentes peut augmenter de plusieurs ordres de grandeur (10^3 à 10^{12}) aussitôt qu'une source de matière organique est présente en abondance (Robert, 2002). L'apport en matières organiques doit néanmoins être raisonné. Bien qu'il stimule l'activité biologique, il peut aussi favoriser les espèces communes tolérantes à l'azote au détriment de d'espèces nitrophobes qui sont plus rares (André, 2006).

◆ **L'entreposage et la biodégradation de nombreux sous-produits et déchets⁹**

Les sols agricoles sont de plus en plus régulièrement sollicités pour leur fonction de recyclage de matières organiques diverses comme les effluents d'élevage, les boues résiduaires d'industrie alimentaires et de stations d'épuration (Honnay in CRMOS, 1995). En effet, l'activité humaine génère des déchets de nature diverse en quantité sans cesse croissante. La question du devenir de ces déchets, bien que très ancienne, est un enjeu majeur pour nos sociétés (Parnaudeau, 2005). La figure 5 (Arrouays et al., IFEN, Association Biomasse Normandie, cités par Parnaudeau, 2005 :p13) qui s'applique à la situation de la France montre bien le rôle significatif des sols agricoles dans cette problématique.

⁹ Déchets ou sous- produits ? Le décret du 27 juin 1996 relatif aux déchets concerne « toute matière ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ». Mustin (1987) les définit les sous-produits comme la part de production qui est mise sur le marché secondaire, les résidus, comme des sous-produits potentiels (possibilité techniques d'utilisation) et les déchets, comme des produits non valorisables dans une situation donnée (obstacles technologiques, économiques et psychologiques). Selon cette acceptation, la notion de « déchet » est donc relative.

Figure 5 : Quantité des principaux types de produits organiques résiduaire et filières majeures de recyclages et d'élimination en France en 2000



En Région wallonne, cette fonction des sols agricoles deviendra d'autant plus importante qu'il est prévu dans le décret du 27 juin 1996 relatifs aux déchets que la mise en centre d'enfouissement technique (décharge) des déchets organiques sera interdite à partir de 2010 (OWD, 1999).

Le Plan d'Environnement pour le Développement Durable¹⁰ (PEDD) prévoit de plus, dans son chapitre relatif à l'agriculture (action 86), de renforcer les politiques de mise en œuvre en matière de valorisation et de recyclage des matières organiques (OWD, 1999).

Le PEDD, le décret du 27 juin 1996 et le Plan wallon des déchets « horizon 2010 » s'inscrivent tous dans la stratégie de l'Union Européenne¹¹ et les principes édictés dans la sa directive-cadre de 1991 relative aux déchets¹². La politique européenne prévoit en effet une hiérarchie dans le traitement des déchets : priorité absolue à la prévention de la production des déchets, ensuite la valorisation et enfin, l'élimination sans danger. Il faut de plus que ce

¹⁰ Adopté le 9 mars 1995, le Plan d' Environnement pour le Développement Durable (PEDD) vise à inscrire résolument la politique de la Région wallonne dans cette perspective tout en concrétisant les conventions, les déclarations et le plan d'action 21 adoptés en juin 1992 par la Conférence des Nations - Unies sur l'Environnement et le Développement et en anticipant sur les exigences internationales.

¹¹ Approuvée par le Conseil dans sa résolution 12820/96 du 9 décembre 1996

¹² Directive cadre 91/156/CEE relative aux déchets

choix soit la meilleure solution du point de vue de l'environnement, compte tenu des coûts économiques.

Or dans le cas des matières organiques résiduelles, leur épandage est bien souvent la voie d'élimination la plus acceptable du point de vue économique et environnemental. Il permet d'exploiter les propriétés épuratrices et de recyclage des sols situés à proximité de la source de production de ces sous-produits. De plus : « *si la gestion de l'épandage est optimisée, la matière organique de ces produits résiduels peut améliorer la qualité des sols.* » (Parnaudeau, 2005 : p17)

Pourtant, cette pratique qui est ancestrale pour les sous-produits de la production agricole¹³ est fortement sujette à controverse pour les matières organiques résiduelles qui ne proviennent pas de ce secteur. Les agriculteurs exigent plus de garantie sur la qualité des produits épandus et sur les conséquences que les épandages pourraient avoir à la fois sur la commercialisation des produits agricoles (système de certification) et sur la valeur patrimoniale des sols. En même temps les distributeurs et les consommateurs restent méfiants quant à l'effet de l'épandage sur la qualité des produits¹⁴.

La réglementation en matière d'épandage et les efforts pour mieux caractériser ces sous-produits devraient permettre de dépasser ces difficultés. L'enjeu double : garantir leur innocuité vis-à-vis de l'environnement (pollution des eaux par les nitrates et de l'air par les émissions d'ammoniac et de protoxyde d'azote) et de la santé publique (métaux lourds notamment) et en même temps d'augmenter le bénéfice agronomique lié à leur apport au sol.

◆ **Échange de nombreux gaz avec l'atmosphère**

Ces gaz sont essentiellement l'oxygène (O₂), le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O), le diazote (N₂), le méthane (CH₄) et de l'ammoniac (NH₃). Ce point sera développé plus en détails dans le chapitre consacré aux puits de carbone.

¹³ Ce qui est produit et réutilisé au sein de la même exploitation n'est pas considéré comme déchets.

¹⁴ Entretien avec Francis Goreux, agriculteur à Braine-l'Alleud (Brabant wallon)

4. Problème de la diminution des stocks de MOS dans les sols cultivés

Nous venons de voir que la capacité du sol à remplir ses différentes fonctions (fournir des aliments, à accumuler l'eau, à échanger des gaz, à dégrader les polluants, à résister à la dégradation physique et à produire des récoltes de manière durable) est fortement influencée par la présence et l'action des MOS.

4.1. Les notions de teneur et de stock de MOS

La notion de **teneur en MO** désigne le contenu de matières organiques que l'on retrouve dans un poids de sol déterminé (Van Wesemael, 2006). Elle s'exprime habituellement en % (g de MO/g de sol sec) et elle représente la concentration de MO à un endroit donné. Cette concentration est un indicateur du bon fonctionnement du sol et de sa fertilité. C'est la raison pour laquelle les mesures de teneur se font généralement dans un horizon de 30 cm maximum. C'est en effet au sein de cette couche que se trouve le siège de la fertilisation (grande majorité des substances nutritives). C'est également la partie du sol sur laquelle le travail de l'agriculteur a une influence directe.

Le **stock de MO** représente quant à lui la quantité totale de MO présente sur une profondeur de sol et une superficie données. Il est souvent exprimé en tonnes par hectare. Les mesures de stocks englobent des horizons plus larges (1m de profondeur). En effet, si les couches plus profondes sont moins directement gérées pour la production végétale elles agissent bel et bien comme réservoir de carbone (organique ou minéral).

Une mesure de stock dans un sol peut correspondre à plusieurs teneurs différentes. A l'inverse, une teneur mesurée dans un sol peut correspondre à des stocks de carbone différents selon l'épaisseur de sol et la superficie considérées.

4.2. L'évolution des stocks et des teneurs de MO dans les sols cultivés

Le développement de l'agriculture, au cours des 100 dernières années, a engendré des pertes substantielles de MOS. Selon Paustian *et al* (cités par Rees, 2001), les stocks mondiaux de carbone organique des sols cultivés seraient passés de 209-222 Giga tonnes de carbone (Gt C) à 168 Gt C actuellement, soit une diminution de 41 à 54 Gt C.

Ces pertes, inégalement distribuées autour du globe, sont imputables, d'une part à la conversion des prairies et/ou des terres sous couvert forestier en terres agricoles et, d'autre part aux pratiques agricoles intensives. Ces deux phénomènes sont eux-mêmes le résultat

d'une demande croissante en produits agricoles, corollaire de la croissance démographique (Rees, 2001).

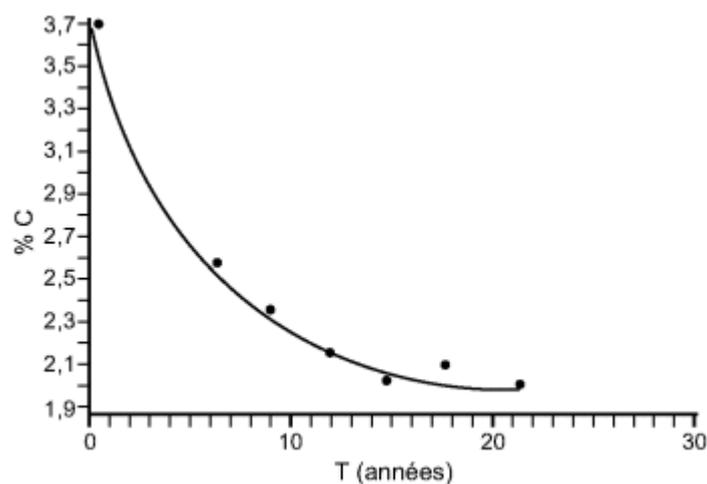
4.2.1. La conversion des terres et les pratiques agricoles

Il est unanimement reconnu que les niveaux de SOC diminuent quand les terres sous prairie ou sous couvert forestier sont converties en terres arables. En effet, la restitution de matière organique au sol qui a lieu dans les forêts (retombées foliaires) et dans les prairies (densité racinaire importante) est fortement réduite dans les terres cultivées dont la production est exportée lors des récoltes (sauf si engrais verts ou résidus de récolte).

A ce propos, il existe une série d'exemples historiques bien documentés pour les zones tempérées. La plupart d'entre eux sont le résultat d'expériences agronomiques à long terme (Robert, 2002).

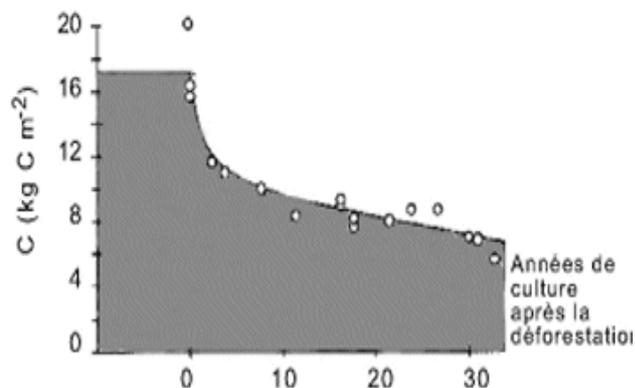
La série d'expériences de Rothamsted et Highfield (figure 6, Johnson, 1973 cité par Robert, 2002 : p13) montre que la conversion de la prairie en sol arable a eu pour conséquence une perte de 55% de carbone en 20 ans, avec des teneurs de carbone organique du sol qui sont passées de 3,5% à 2%.

Figure 6 : Evolution du carbone dans l'expérience de Rothamsted-Highfield pour la conversion prairie-terre arable



Selon les expériences menées pour des forêts tempérées par Arrouays et Pélissier (1994, cités par Robert, 2002), le déboisement, outre le fait qu'il entraîne généralement la perte presque totale de la biomasse, provoque une perte de carbone du sol de 40% à 50% dans l'espace de quelques décennies, la moitié se produisant en moins de 5 ans (figure 7, Arrouays *et al.*, 1994 cités par Robert, 2002 p13).

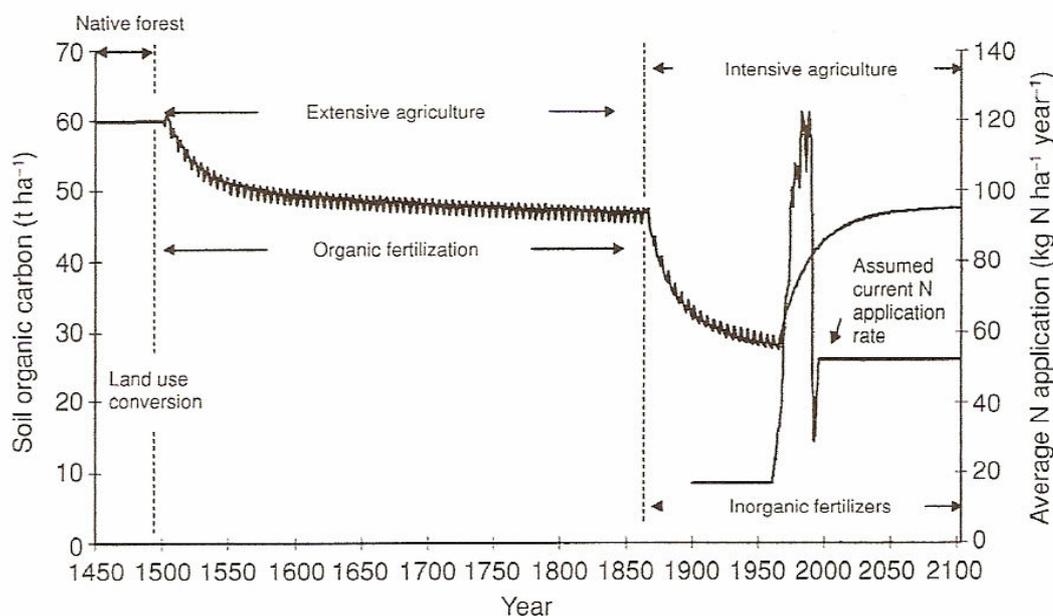
Figure 7 : Evolution de la teneur en carbone organique après déforestation et mise en culture de maïs



Comme on le constate, cette diminution, spécialement rapide dans les premières années qui suivent la conversion, ralentit progressivement jusqu'à atteindre un nouvel équilibre. On considère que, après les 50 à 100 années qui suivent la conversion, les niveaux de stocks de carbone sont de 50% à 60% inférieurs à leur niveau d'origine (Robert, 2002).

La plupart des terres agricoles en Europe ayant connu cette conversion il y a près d'un demi siècle au moins, on peut dire que le nouvel état d'équilibre a été atteint aujourd'hui. Entre-temps, l'agriculture intensive a causé des pertes supplémentaires de MOS dans les terres cultivées (figure 8, modèle CENTURY présenté par Fallon *et al.*, 2001 : p57), avec un effet jugé défavorable sur la structure des sols et leur fertilité, mais aussi sur les changements climatiques. D'après le rapport du Programme des Nations-Unies pour le Développement (1997, cité par Rees, 2001), il a été estimé que, pour l'année 1990, environ 562 millions d'hectares, soit 38% de la surface agricole mondiale, avaient subi une série de dégradations causées par de mauvaises pratiques agricoles. Dans la décennie qui a suivi, la dégradation des terres agricoles a été évaluée à 5 à 6 millions d'hectares par an et cette tendance devrait se poursuivre.

Figure 8 : Historique et projection future de l'évolution des stocks de COS en combinaison avec l'utilisation de fertilisants



4.2.2. Les pertes de COS dans les sols cultivés

Les pertes de carbone organique et les baisses de teneur en matière organique dans les sols cultivés sont essentiellement dues à l'intensification de l'agriculture et aux pratiques culturales qui y sont associées (Le Villio *et al.*, 2006).

◆ Travail du sol

Le labour a une histoire millénaire (Robert, 2002). Il a pour fonction de lutter contre les mauvaises herbes, d'enfouir des matières organiques de surface, d'aérer le sol et de l'ameublir pour faciliter la circulation de l'eau et la pénétration des racines (Mozayer et Roudart, 2002). Or l'augmentation de l'aération du sol a également pour conséquence de stimuler la vie microbienne souterraine et d'accélérer par ce fait la minéralisation de la matière organique. En même temps, le travail du sol en le perturbant (modification des agrégats) joue un rôle principal de «déprotection» de la matière organique. Et ces processus agissent en spirale : ils commencent par toucher la fraction de carbone la plus biodégradable puis, avec la diminution des teneurs en MOS, la stabilité des agrégats baisse et la minéralisation de l'ensemble des matières organiques s'accroît.

Le labour, en diluant le carbone apporté en surface sur toute la profondeur labourée, maintient une teneur basse dans la couche superficielle. Ainsi les matières organiques des premiers centimètres sont déprotégées. Avec le renouvellement annuel du labour, petit à petit, tout l'horizon labouré est concerné. Il s'agit d'un processus lent et cumulatif. (Leclerc, 2002 : p26)

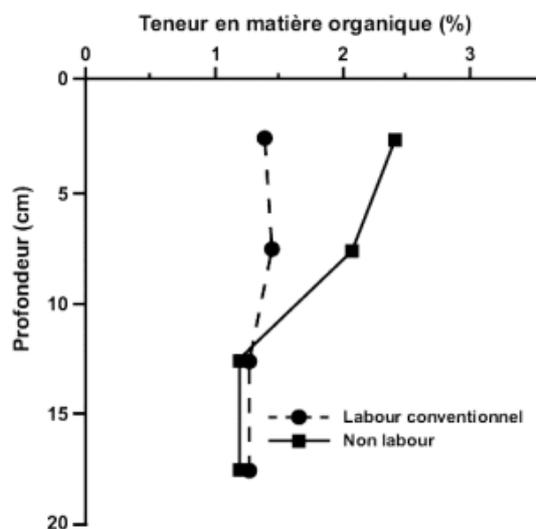
A cela s'ajoute le fait que grâce à la mécanisation accrue de l'agriculture, les profondeurs de labour n'ont fait qu'augmenter au fil du temps, amplifiant ainsi le phénomène.

Il existe à ce sujet de nombreuses discussions sur les effets des différents types de labour. La littérature est particulièrement riche en Amérique du Nord (USA, Canada)¹⁵ où le recours au non-labour ou à un labour réduit est de plus en plus préconisé pour éviter les pertes importantes de matières organiques. En effet, les résultats d'une cinquantaine d'expériences à long terme menées sur ce continent¹⁶ ont montré que les augmentations du carbone dans le sol variaient, du labour conventionnel au non-labour, de 10 à 30 pour cent (figure 9, Robert, 2002 : p22).

¹⁵ Voir Meyer *et al.* 2006, Jones *et al.* 2006, Baker *et al.* 2006

¹⁶ numéro spécial de «Soil and Tillage Research» cité par Robert, 2002

Figure 9 : Effet du labour conventionnel et du non-labour sur la teneur en matière organique dans le sol

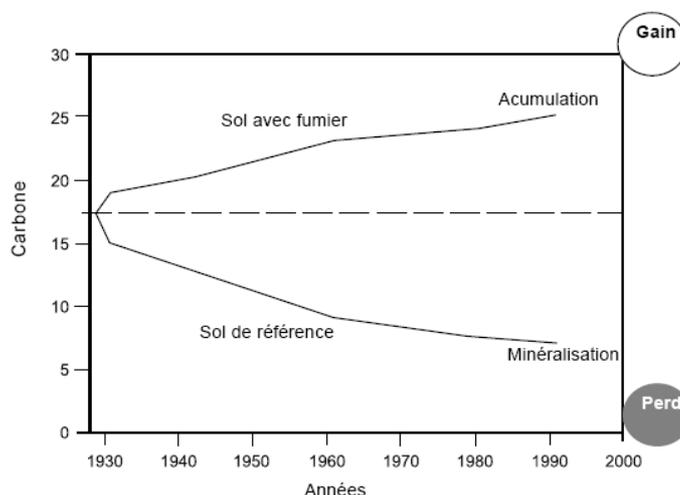


◆ **Diminution des apports en MO**

Avec le temps, les exploitations agricoles ont évolué vers un niveau plus élevé de spécialisation avec une dissociation de leurs activités, se consacrant plus spécifiquement à un type de culture déterminé (notamment la betterave et la pomme de terre qui sont faiblement restitutrices d'humus (La Villio *et al.*, 2001)) ou à l'élevage. L'absence d'une source de matière organique sous forme de fumier à proximité des exploitations ainsi que les progrès de l'industrie agrochimique ont favorisé le recours aux engrais minéraux comme source d'éléments nutritifs.

L'expérience dite des «42 parcelles» de Versailles (INRA), mise en place en 1929, (figure 10, cité par Robert, 2002 : p12) montre que la teneur en MOS diminue fortement pour les sols qui n'ont pas bénéficié d'apports en matière organique sous la forme de fumier (Robert, 2002).

Figure 10 : Evolution de la teneur en carbone dans les sols entre 1928 et 1991 avec ou sans fumier (site expérimental de l'INRA, Versailles «quarante deux parcelles»)



En réalité, deux phénomènes agissent conjointement. Premièrement, les pertes « naturelles » par oxydation des matières organiques ne sont pas compensées par des apports nouveaux. En second lieu, les engrais minéraux incorporés au sol en quantité importante stimulent non seulement la croissance végétale mais aussi la croissance des micro-organismes. La conséquence directe est l'accélération du processus de minéralisation.

Il faut cependant noter que certains auteurs refusent de réduire les bénéfices des engrais organiques à la seule fertilisation des sols. A ce propos, J. Duthil explique que des expériences de longue durée ont démontré que la fertilisation intensive ne se traduisait pas systématiquement par un amenuisement des réserves en humus sur le long terme. Selon lui, *« plus on augmente les doses d'engrais minéraux et plus on accroît les rendements. Les résidus aériens et souterrains suivent la même règle. La fertilisation intensive, mieux que tout autre, est susceptible d'équilibrer les bilans de matière organique »* (Duthil, 1973 : p166)

◆ Erosion des sols

Comme expliqué plus haut, l'action de la pluie et du vent peut mener à la destruction des micro-agrégats par une minéralisation accélérée ainsi qu'à la disparition presque complète de la partie superficielle du sol. Or les sols cultivés, laissés nus entre les cultures (en particulier pendant la mauvaise saison) sont exposés aux pluies, aux dessèchements et aux ré-humectations brutales. De plus les progrès techniques en terme de mécanisation ont permis de repousser toujours plus loin la frontière des terres cultivables. Des sols plus sensibles à l'érosion de par leur texture ou leur topographie (forte pente) ont été mis en exploitation avec des conséquences parfois désastreuses.

On estime aujourd'hui que l'érosion du sol par l'eau ou le vent représente le processus le plus important de la dégradation du sol affectant plus d'un milliard d'hectares dans le monde (Robert, 2002). Les pertes du sol varieraient entre 1 et 10 tonnes par hectare par an et atteindraient 50 tonnes dans certains cas. La matière organique dans l'horizon supérieur du sol est une partie importante de cette perte de sol. La perte mondiale de MOS par érosion serait dans l'éventail de 150 à 1 500 Mt par an. (Lal, 1995; Gregorich *et al.*, 1998 cités par Robert, 2002).

Enfin, certaines cultures, telles que la betterave et la pomme de terre, entraînent également des pertes de sols non négligeables lors de leur récolte. Les racines récoltées sont recouvertes de terre que l'on nomme la « tare-terre ». Cette dernière, outre le coût qu'elle représente en termes d'érosion des sols, occasionne également de frais de transport, de stockage et de recyclage inutiles. C'est la raison pour laquelle les agriculteurs tentent de

diminuer ces pertes. En Région wallonne, la quantité annuelle de « tare-terre » estimée pour la récolte des betteraves s'élève à 6-10 tonnes par hectare¹⁷.

◆ **Compaction et produits phytosanitaires**

Si le travail du sol s'est intensifié avec le temps (fertilisation, traitements sanitaires,...), le développement de la mécanisation agricole a permis de couvrir plus rapidement, et avec un nombre réduit de passages, des surfaces cultivées de plus en plus importantes (remembrement). Pour ce faire, le poids de l'outillage et des tracteurs, dont la puissance est en croissance constante, a fortement augmenté. A cela s'ajoute le fait qu'une force motrice accrue permet de réaliser le traitement du sol dans presque toutes les conditions d'humidités.

Les passages répétés d'engins lourds *a fortiori* en conditions humides ont favorisé le tassement des sols sous culture. S'en sont trouvés modifiés le contenu et la répartition de la matière organique (activité biologique aérobie et biodisponibilités de nutriments réduites) ainsi que la structure et la porosité des sols (compaction des sols en profondeur et lissage et imperméabilisation à la surface du sol). Cela rend les sols concernés d'autant plus sensibles aux tassements futurs et surtout aux risques d'érosion (Brahy et Loyen, 2006).

Enfin, l'usage répété de produits phytosanitaires et la persistance de certaines des molécules dans les sols cultivés présente un risque pour la partie vivante de la matière organique qui n'est pas visée par leur usage (vers de terre et micro-organismes) (Goor *et al.*, 2006).

4.3. Le risque lié à la baisse des teneurs en MOS

◆ **Matière organique des sols (MOS) et carbone organique des sols (COS)**

Comme il est difficile de mesurer directement les matières organiques du sol, on évalue généralement la quantité de carbone organique d'un échantillon de terre en laboratoire via différentes méthodes d'extraction que nous n'allons pas décrire ici.

En considérant que la matière organique du sol est composée d'environ 50% de carbone organique, il est facile d'opérer une conversion entre ces deux mesures en appliquant un coefficient de multiplication égal à 2. Toutefois, ce coefficient de conversion est loin de faire l'unanimité et, selon les méthodes d'extraction et d'échantillonnage ou selon les types de sol, il peut varier de 1.4 à 3.3 (Krull *et al.*, 1999). Bien que le facteur de conversion le plus souvent cité soit 1.72 (le carbone organique du sol représente 58% de la matière organique

¹⁷ Information fournie par courrier électronique par Jean-Pierre Vandergeten de l'irbab (Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la Betterave)

du sol), de nombreux auteurs préfèrent commenter et interpréter les résultats exprimés en COS pour éviter des confusions imputables à l'arbitraire (Colinet *et al.*, 2005).

◆ Notion de valeur seuil de teneur en COS

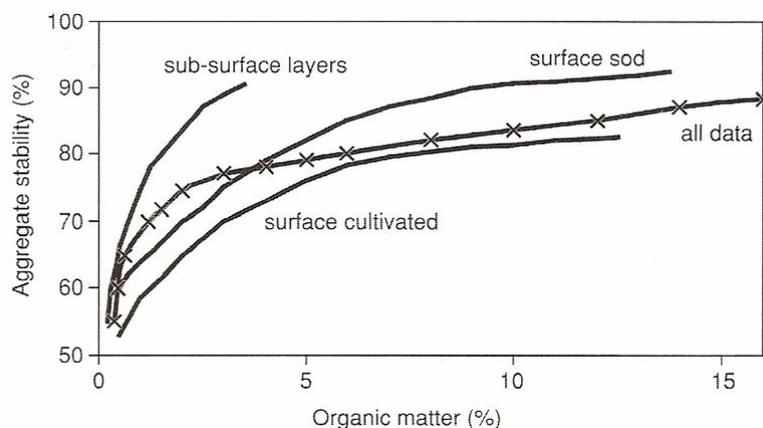
Les quantités de MOS sont souvent exprimées en COS (carbone organique des sols) ou COT (carbone organique total). Ceci est dû au fait que ces quantités sont calculées sur base d'échantillonnages qui subissent plusieurs méthodes d'extractions différentes qui permettent de déterminer leur teneur en carbone oxydable.

Le carbone organique total, calculé à partir de la teneur en carbone oxydable, est plus facile à estimer en laboratoire. On considère généralement que la matière organique dans les sols agricoles contient en moyenne 50% de carbone. Toutefois, le taux de conversion de 2 n'est pas unanimement admis. Pour éviter des confusions imputables à l'arbitraire, il est dès lors préférable de commenter et interpréter les résultats exprimés en COT.

Pour que les sols continuent à remplir leurs fonctions, on considère généralement qu'il faut que la concentration de COS reste au-dessus d'un niveau minimum. En dessous de ce seuil, les pertes de MOS risqueraient de provoquer le déclin irréversible des propriétés du sol (Loveland *et al.*, 2001).

Une étude menée dans l'ouest des États-Unis et au Canada (Kemper and Koch, 1966) met en évidence la chute brutale de la stabilité structurale du sol après la baisse de MOS (figure 11, Kemper et Koch, 1966¹⁸). Egalement citées par Loveland *et al.* (2001), d'autres études qui concernent aussi bien la stabilité structurale que la densité apparente et la capacité de rétention d'eau, montrent bien une relation de corrélation entre l'augmentation et la diminution en MOS et celle de l'efficacité du sol.

Figure 11 : la relation entre la stabilité des agrégats et la contenance en MOS pour 519 échantillons de sol provenant de l'ouest des États-Unis et du Canada



¹⁸ Cités par Loveland *et al.*, 2001, p25

Selon les observations empiriques de Greenland *et al.* (1975)¹⁹, la valeur minimum de carbone organique correspondrait à une teneur en COS de 2% soit 3,4% de MOS²⁰. Après avoir travaillé sur 180 échantillons qui provenaient d'une grande variété de type de sol en Angleterre et au Pays de Galles, ils ont proposé la classification suivante :

- En dessous d'une teneur de 2% en COS, le sol est jugé instable ;
- Pour une teneur située entre 2 et 2,5% en COS, le sol est considéré comme modérément stable ;
- Au-delà d'une teneur de 2,5% en COS, le sol est normalement stable.

Dans sa communication sur la stratégie thématique en faveur de la protection des sols, la Commission Européenne considère que les teneurs en COS inférieures à 2% sont trop faibles, qu'elles sont moyennes entre 2% et 6% de COS, et qu'elles sont bonnes au-delà de 6% (Commission des Communautés Européennes, 2006 :p3)

En Région wallonne, le taux minimum de teneur de COS en dessous duquel il est estimé que les qualités des sols peuvent être remises en question s'élève à 1,2 %²¹. Nous verrons dans le chapitre suivant que cette valeur varie en fonction des différents types de sol. Les auteurs du *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007* affirment quant à eux que les sols qui présentent une teneur en MO inférieure à 1,7% sont en général considérés par les agronomes comme étant dans un stade de « prédésertification » (Van Wesemael et Brahy, 2006).

Cependant, la détermination d'une valeur seuil de teneur en matière organique qui serait souhaitable pour assurer la bonne fertilité d'un sol doit être nuancée. Si les propriétés du sol sont fortement influencées par la présence de matières organiques, la texture initiale et les conditions climatiques jouent également un rôle déterminant. Par exemple, « *en présence d'une texture limoneuse, le seuil de carbone en dessous duquel les risques d'instabilité structurale apparaissent est sujet à discussion, (...)* (Le Villio *et al.*, 2001 : p50)

Loveland *et al.* (2001), concluent après une étude bibliographique qui a porté sur près de 1500 articles, qu'il est difficile (« dans l'état actuel des connaissances »), d'établir un seuil unique de quantité de matière organique minimale.

¹⁹ Ibid.

²⁰ Ce seuil, définit Greenland *et al.*, (1975) pour l'Angleterre et le Pays de Galles est généralement celui qui est admis dans l'ensemble de la communauté scientifique (Loveland *et al.*, 2001).

²¹ Selon les normes du Ministère de l'Agriculture, la base d'un optimum est fixée à une teneur de 2,4% (Bock et Laroche, 2002, p4)

5. Etat des lieux

5.1. L'Union Européenne : une situation alarmante

La prise de conscience grandissante du fait que les sols sont une ressource essentielle et non renouvelable a poussé la Commission Européenne (CE) à établir une stratégie de protection des sols. En 2002, Margot Wallström, la Commissaire chargée de l'Environnement, déclarait déjà : « *Nous plaçons désormais la protection des sols au même plan que l'épuration de l'air et de nos ressources en eau. Pendant trop longtemps nous avons considéré le sol comme un bien acquis. Or, l'érosion, la diminution de la qualité et l'imperméabilisation des sols sont des problèmes majeurs dans toute l'Union Européenne (UE). Il s'agit d'un enjeu pour le développement durable car ces tendances sont en grande partie irréversibles et le sol est essentiel pour notre subsistance* » (citées par Warin et al. : p70)

Cette préoccupation a débouché en fin d'année 2006 sur une proposition par la CE de directive-cadre pour la protection des sols. Dans sa *Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions* (CCE, 2006), la CE ne se contente pas d'énumérer les dangers qui sont liés à une dégradation croissante de la qualité des sols en Europe. Elle rapporte également les conclusions provisoires d'une analyse des impacts (écologiques, économiques et sociaux) d'une telle situation ainsi que les coûts et bénéfices des mesures de prévention à envisager. Enfin, elle propose sa stratégie d'action pour faire face à cette problématique.

5.1.1. Ampleur du problème

La Commission rappelle pour commencer que « *la dégradation des sols représente un grave problème en Europe* » (CCE, 2006 : p3). Elle confirme ensuite que celle-ci est « *provoquée ou aggravée par des activités humaines inadéquates* » qui concernent le secteur de l'agriculture mais aussi de l'industrie, du tourisme et l'expansion urbaine.

Elle ajoute enfin que les prévisions pour le futur sont préoccupantes dans la mesure où tous les facteurs sont réunis pour que la dégradation des sols se poursuive à un rythme accéléré : « *les tendances indiquent que les facteurs de menace liés à l'homme sont en augmentation. Le changement climatique, sous la forme de hausses de températures et de phénomènes météorologiques extrêmes, accroît les émissions de gaz à effet de serre provenant des sols et aggrave les menaces telles que l'érosion, les glissements de terrain, la salinisation et la diminution de teneur en MO.* » (Ibidem)

La diminution de la teneur en matière organique occupe une place importante sur la liste des dégradations majeures que l'on peut observer :

- environ 45% de l'ensemble des sols européens présentent une teneur faible, voire très faible, en matières organiques (entre 0 et 2% de COS) ;
- 45% présentent une teneur moyenne de 2 à 6% de COS.
- La situation est particulièrement préoccupante dans les régions méditerranéennes où environ 75% des superficies analysées présentent des teneurs en MO inférieures à 3,4%.

Si les conditions climatiques représentent un facteur explicatif important - la teneur en MO dans les sols diminue d'une part, du nord au sud suivant un gradient croissant de température et d'autre part, d'ouest en est en suivant un gradient décroissant d'humidité dans le sol – elles justifient moins que certaines régions de France, du Royaume-Uni, de l'Allemagne et de la Suède soient également touchées.

Le coût annuel estimé de ces faibles teneurs en MOS est de 3,4 à 5,6 milliards d'euros.

Cette situation est d'autant plus alarmante que la plupart des autres risques majeurs sont fortement liés à cette pauvre qualité du sol engendrée par la réduction du taux de MO²² :

- ◆ **L'érosion** : l'Agence Européenne de l'Environnement estime que 115 millions d'hectares, soit 12% environ de la superficie totale des terres en Europe, sont soumis à l'érosion par l'eau, et 42 millions d'hectares subissent l'érosion éolienne. Les dégradations graves concernent 2% de cette superficie. Le coût annuel estimé est de 0,7 – 14,0 milliards d'euros ;
- ◆ **Le tassement** : en moyenne, les estimations des sous-sols vulnérabilisés tournent autour des 30% du territoire européen ;
- ◆ **Les glissements de terrain** : la superficie totale touchée n'a pas encore été estimée, mais le problème semble être lié à la croissance démographique, au tourisme, à l'utilisation intensive des terres et aux changements climatiques. Les conditions pédoclimatiques sont en effet déterminantes : « la fréquence des glissements de terrain est plus grande dans les sols facilement érodables, les sous-sols argileux, les terrains escarpés, et en cas de précipitations intenses et abondantes ou lorsque les terres sont abandonnées, comme dans les régions alpines et méditerranéennes ». Le coût estimé va jusqu'à 1,2 milliard d'euros par événement ;

²² Les informations concernant la **perte de fertilité des sols** (perturbation des cycles de nutriments) et les **inondations** ne sont pas détaillées dans cette communication.

- ◆ **L'imperméabilisation** : la superficie des terrains touchés par ce problème représente environ 9% de la superficie totale dans les états membres et a connu une augmentation de 6% entre 1990 et 2000.
- ◆ **Le déclin de la biodiversité** : « la biodiversité des sols se rapporte non seulement à la diversité des gènes, écosystèmes et fonctions, mais aussi à la capacité métabolique de l'écosystème. La biodiversité des sols est menacée par tous les processus de dégradation évoqués ci-dessus, et tous les facteurs mentionnés s'appliquent (également) à la perte de biodiversité des sols ».

Les problèmes de **salinisation** et de **contamination des sols**, qui sont également évoqués (coûts estimés respectivement de 158-321 millions d'euros par an et de 2,7 à 17,3 milliards d'euros par an) ne sont quant à eux pas directement liés au statut organique des sols.

La communication précise pour conclure ce constat que le coût de ces dégradations, estimé au total à près de 38 milliards d'euros par an, est généralement supporté par l'ensemble de la collectivité : « *la plupart des coûts liés à la dégradation des sols ne sont pas supportés par les utilisateurs immédiats des terres, mais généralement par la société dans son ensemble et par des acteurs géographiques éloignés des sites en cause.* » (*Ibid.*, p4)

5.1.2. Objectif et stratégie : une directive-cadre pour la protection des sols

Le projet de directive-cadre prévoit à la fois un volet sur la prévention contre toute dégradation ultérieure et un volet sur la restauration des sols déjà endommagés.

Son premier but est d'harmoniser la panoplie d'approches qui existe déjà dans certains États-membres et, le cas échéant, de combler les lacunes qui persisteraient. Il s'agit en outre d'assurer la conformité de son action par rapport aux engagements qui ont déjà été pris (par l'Union européenne et/ou par ses membres) au sein de plusieurs conventions internationales également concernées par la protection de la qualité des sols :

- la Convention des Nations-Unies sur la lutte contre la désertification
- le protocole sur la protection des sols de la Convention alpine
- le protocole de Kyoto, qui souligne le rôle de puits de carbone joué par les sols
- la Convention sur la diversité biologique qui a inscrit la biodiversité des sols parmi les domaines qui requièrent une attention particulière.

La future réglementation doit s'inscrire dans une optique de développement durable et « *tenir compte de l'ensemble des diverses fonctions que peuvent remplir les sols, de leur variabilité et de leur complexité ainsi que de la gamme des différents processus de dégradation dont ils*

peuvent faire l'objet, tout en considérant également les aspects socio-économiques » (Op.cit., p 5). Des considérations telles que la distorsion de marché interne et externe à l'Union et la sécurité alimentaire doivent également être prises en compte.

Le cadre juridique de la directive-cadre apparaît comme le plus approprié pour mener une politique de protection des sols, l'objectif étant de conforter des lignes directrices en UE tout en gardant à l'idée que leur gestion sera largement influencée par des données plus locales (conditions climatiques et géo-pédologiques, types d'exploitation du sol, structure économique, acceptabilité sociale).

Ainsi, chaque État-membre devra développer, « sur la base d'éléments communs à prendre en considération » : 1) des systèmes de surveillance, 2) des mesures d'identification des zones à risque, 3) des inventaires, 4) des objectifs d'assainissement et 5) des mécanismes de financement. Les programmes pourront se fonder sur des mesures qui sont déjà mises en œuvre dans le cadre national et/ou dans le cadre communautaire :

- l'éco-conditionnalité,
- le développement rural,
- les codes de bonnes pratiques agricoles,
- les programmes d'action adoptés en vertu de la directive sur les nitrates,
- les futures mesures adoptées au titre des plans de gestion de district hydrographique pour la directive-cadre sur l'eau,
- les plans de gestion des risques d'inondation,
- les programmes forestiers nationaux, ainsi que les pratiques sylvicoles durables et les mesures de prévention des incendies de forêt.

La communication insiste enfin sur l'importance capitale d'affiner les connaissances dans le domaine de la protection des sols. A ce propos, la proposition de septième programme – cadre (2007-2013) inclut la recherche sur les fonctions du sol dans le cadre des domaines prioritaires « Environnement » et « Alimentation, agriculture et biotechnologie ».

5.1.3. Le prix de la protection des sols

Les études d'impact ont permis d'évaluer les coûts engendrés par la mise en œuvre de la directive-cadre. Ces derniers pourraient atteindre :

- 290 millions d'euros par an pour l'Europe des 25 durant les 5 premières années ;
- 240 millions d'euros pour les 20 années suivantes ;
- après quoi, ils seraient inférieurs à 2 millions d'euros par an.

Le caractère régressif de ces dépenses se justifie dans la mesure où elles concernent essentiellement l'obligation d'inventorier les zones à risque et de répertorier les sites contaminés. Par la suite, cet effort, dont le coût devrait principalement être supporté par les pouvoirs publics, produira ses premiers bénéfices grâce à l'adoption de mesures plus ciblées et plus efficaces, les menaces étant mieux localisées et la gravité des situations mieux estimée. Les bénéfices totaux dépendront quant à eux de la volonté de chaque État-membre de réellement exploiter ces nouvelles connaissances et de répartir la prise en charge des coûts supplémentaires entre les différents acteurs (exploitants, pollueurs, pouvoirs publics).

La communication conclut ce volet sur le coût de la restauration des sols en rappelant que, du fait des différents services rendus par les sols, les bénéfices nets estimés de leur protection seront largement supérieurs aux coûts engendrés par les menaces énumérées plus haut. Et ce d'autant plus que les sols représentent une ressource non renouvelable.

5.2. La Région wallonne : une situation préoccupante

Les informations qui sont présentées dans cette partie proviennent des 4 sources suivantes :

- le Rapport de L'IRSIA sur l'état organique des terres agricoles en Belgique (1995)²³.
- Le Tableau de bord de l'environnement wallon 2005
- La Base de données sols de RéQuaSud, deuxième synthèse 2005
- Le Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007

Ces documents reprennent les estimations des stocks de COS en Région wallonne (et en Belgique pour le premier) ainsi que leurs évolutions dans le temps. Les données sur lesquelles ils se basent couvrent en effet une période qui va des années 1960 aux années 2000.

L'estimation des teneurs en matières organiques a été réalisée grâce à une méthodologie basée sur de nombreuses mesures de carbone organique effectuées chaque année dans une série de parcelles agricoles et forestières. Ces données ont ensuite été regroupées en unités cartographiques (polygone de superficie moyenne de 33 ha) qui présentent une utilisation du sol homogène et appartenant à une seule association de sol.

Pour l'année 1960, les mesures proviennent essentiellement de données Aardwerk (analyses d'environ 13 000 profils de sol échantillonnés dans le cadre de la réalisation de la

23 Ce rapport paru à la fin de l'année 1995 est le résultat d'observations et d'expériences menées par un groupe de laboratoires spécialisés dans le domaine de la fertilité des sols Centre de Recherche Agronomiques de l'Etat de Gembloux, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, R.U.Gent Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, K.U. Leuven. Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen.

carte des sols de Belgique). Pour les années 1990 et 2000, les mesures proviennent d'autres sources d'information telles que le service pédologique de Belgique, la base de données REQUASUD, les centres d'informations agricoles, la DGRNE-DNF, etc.

Bien que les différents usages du sol aient été appréhendés (terres sous culture, sous prairie ou forêts) nous allons principalement nous concentrer sur les résultats obtenus pour les terres cultivées.

5.2.1. Classement des teneurs en carbone des sols en fonction du type de sol

Nous l'avons vu plus haut, les qualités du sol et ses propriétés sont fonction à la fois de la teneur en MOS et d'autres données géo-pédologiques. Le tableau 2 (Vanongeval *et al.*, 1995 : p12) reprend une classification des parcelles étudiées en fonction de leur type de sol et une appréciation des différentes teneurs en carbone qui y sont associées (horizon de labour 0-23 cm).

Tableau 2 : Appréciation de la teneur en carbone de parcelles agricoles en fonction de la classe texturale

Appréciation	Sablonneux % C	Sablo-limoneux et limoneux % C	Polders % C
Très faible	< 1.2	< 0.8	< 1.0
Faible	1.2 - 1.4	0.8 - 0.9	1.0 - 1.2
Assez faible	1.5 - 1.7	1.0 - 1.1	1.3 - 1.5
Normal	1.8 - 2.8	1.2 - 1.6	1.6 - 2.6
Assez élevé	2.9 - 4.5	1.7 - 3.0	2.7 - 4.5
Elevé	4.6 - 10.0	3.1 - 7.0	4.6 - 10.0
Tourbeux	> 10.0	> 7.0	> 10.0

Des données qui proviennent du document publié par l'IRSIA en 1995, on peut conclure que la situation en Belgique est « plutôt bonne »: 75 % des sols cultivés présentent une teneur en carbone jugée suffisante d'après les normes belges. Cette proportion semble stable dans le temps puisqu'elle reste inchangée pour la période qui va de 1982 à 1994. Les auteurs attribuent cette situation à une bonne gestion du niveau organique des sols grâce aux fumures organiques et aux apports d'engrais verts et de résidus de récolte.

Tableau 3 : Distribution de fréquence de la teneur en carbone de parcelles agricoles en sept classes d'appréciation

Appréciation	1982-1985 (01.05.82 - 30.04.85)	1989-1991 (01.01.89 - 31.12.91)	1992-1994 (01.01.92 - 15.11.94)
Très faible	2.0%	2.3%	1.9%
Faible	6.8%	6.3%	6.0%
Assez faible	13.9%	12.3%	12.6%
Normal	52.0%	50.7%	51.7%
Assez élevé	22.9%	25.8%	25.7%
Elevé	2.3%	2.4%	2.0%
Tourbeux	0.1%	0.2%	0.1%
	100.0%	100.0%	100.0%
Nombre d'échantillons	62586	66346	51643

Le tableau 3 (*Ibid*, p13) nous montre cependant que pour un cinquième des parcelles l'appréciation est inférieure à la valeur « normale ». Et, bien que la situation évolue de manière positive entre les périodes 1982-1985 et 1992-1994, le nombre de parcelles dont la teneur en carbone est très faible reste quant à lui constant.

Enfin il faut rappeler que cette étude porte sur le territoire belge dans son entièreté et qu'elle cache des disparités importantes à la fois entre les régions flamande et wallonne et au sein de leur territoire respectif. Ces disparités régionales traduisent aussi bien des différences d'occupations du sol que des variations de conditions pédoclimatiques.

5.2.2. Les stocks et teneurs en carbone des sols en Région wallonne

◆ Situation en 2000

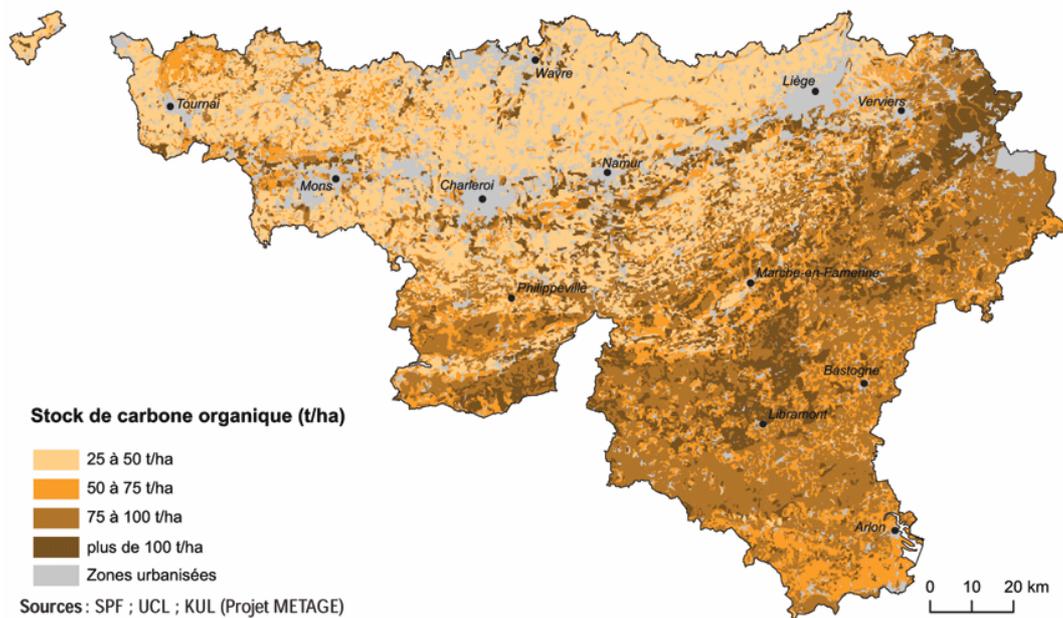
La carte (CEEW, 2005) montre une répartition des stocks de carbone organique très inégale entre :

- d'une part les sols cultivés situés essentiellement dans les régions de grandes cultures ;
- d'autre part, les sols où le couvert forestier est dominant.

Les sols dont les stocks de carbone organique sont les plus élevés (100t C/ha) se situent en majorité dans les Fagnes (tourbières) et sur les hauts plateaux ardennais, dominés par la forêt et où les conditions climatiques (températures plus faibles et périodes de gel plus longues) favorisent l'accumulation de carbone.

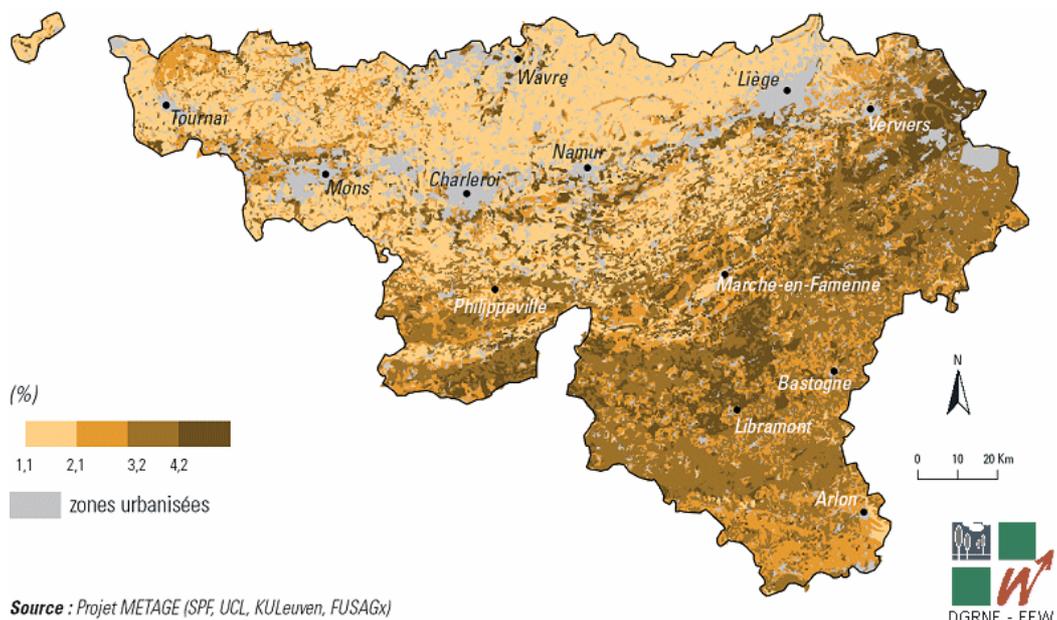
Les parcelles où les quantités de matières organiques sont les plus faibles (25 à 50 tC/ha) se retrouvent quant à elles dans les régions de grandes cultures (régions limoneuses et sablo-limoneuse).

Carte 3 : Stocks de carbone organique dans les sols en Région wallonne (année 2000)



En ce qui concerne les teneurs en carbone, la carte 4 (CEEW, 2007) nous montre que les tendances sont identiques.

Carte 4 : Teneurs en matière organique dans les sols en Région wallonne (année 2000)



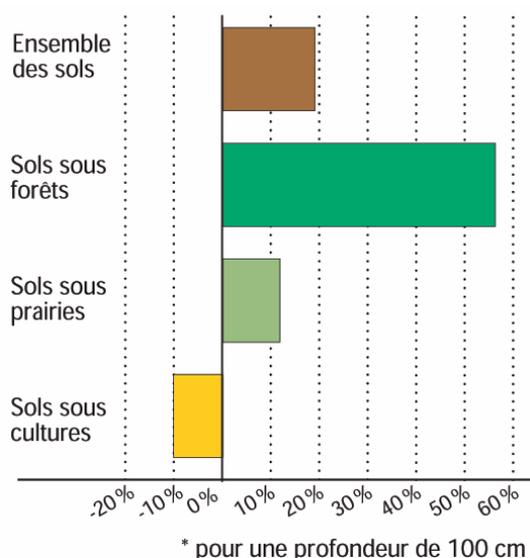
Les Fagnes et les hauts plateaux ardennais sont les zones où les sols présentent les teneurs en MO les plus élevées (4,2%) tandis que les zones de grandes cultures, qui incluent la région limoneuse et la région sablo-limoneuse, présentent les teneurs les plus faibles (1,1 et 2,2%).

Ici encore, les conditions pédoclimatiques et l'utilisation des sols sont présentées comme les principaux facteurs d'explication. En effet, le taux moyen de matière organique dans les sols est le plus élevé sous forêts (4,1%). Il s'élève à 3,2% pour les prairies et 2% pour les sols sous culture.

◆ Evolution depuis 1960

On observe une évolution positive des stocks totaux de MOS (sur une profondeur d'1 mètre) qui ont augmenté de 20% en moyenne de 1960 (137 Mt) à 2000 (163 Mt). Mais cette tendance est très inégale pour chaque type d'occupation du sol. (Figure 12, CEEW, 2005)

Figure 12 : Variation des stocks de carbone organique dans les sols en Région wallonne (entre 1960 et 2000)



Sources : SPF ; UCL ; KUL (Projet METAGE)

Si les stocks de carbone sont en augmentation de 56%²⁴ dans les sols forestiers, l'augmentation n'est que de 12% pour les sols sous prairies. Les sols sous cultures ont perdu quant à eux en moyenne 10% de leurs réserves en carbone organique

Nous avons vu plus haut l'influence que l'activité agricole pouvait avoir sur les stocks de carbone des sols cultivés. La localisation des terres sous couverts forestiers dans des zones

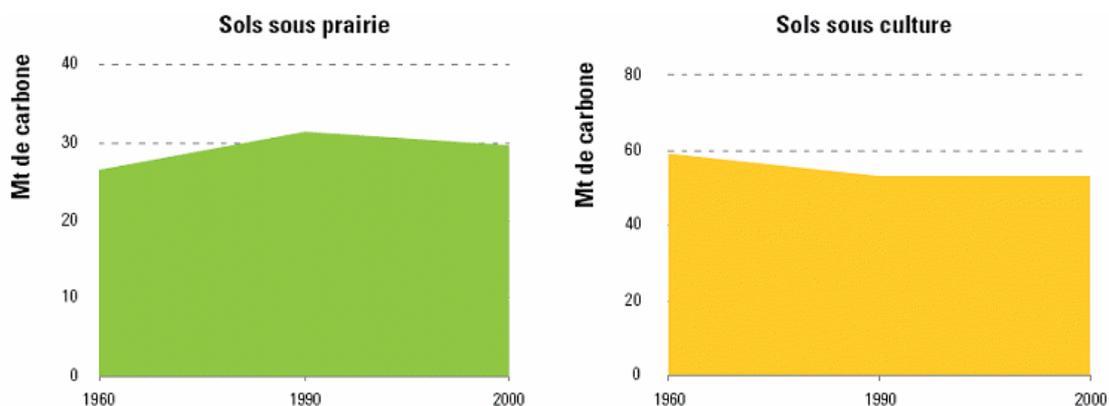
²⁴ cette augmentation s'explique par le fait qu'une part importante de la forêt wallonne est encore assez jeune et productive ce qui implique que les sources de matières organiques dans les sols (litières et racines) augmentent en même temps que la biomasse. Une autre explication réside dans l'extensification de la gestion forestière qui augmente le retour des résidus de récolte.

pédoclimatiques moins propices à la production végétale et climatiquement plus favorables à la conservation des MOS a également son importance. Les auteurs évoquent en plus le phénomène de l'érosion des sols agricoles : « *cette évolution est probablement à mettre en relation avec l'extrême sensibilité des sols limoneux à l'érosion hydrique et avec l'augmentation au cours des trente dernières années, des quantités de particules érodées exportées vers les cours d'eau.* » (CEEW, 2005)

Enfin, sont mises en cause certaines pratiques culturales comme le labour et la réduction des apports en MO exogènes, suite notamment à une gestion plus restrictive des effluents d'élevage.

Sur ce dernier point, les auteurs du rapport tentent d'expliquer les évolutions inversées qu'ont connues les prairies et les sols au cours de ces 40 dernières années. D'après eux, une grande part d'explication réside dans la gestion des effluents depuis 1960. (Figure 13, CEEW, 2007)

Figure 13 : Stocks de matière organique dans les sols en Région wallonne (sur un profondeur de 0 à 1 mètre), selon le type d'occupation du sol



Source : Projet METAGE (SPF, UCL, KULeuven, FUSAGx)

Si l'on considère que la production totale de fumier et de lisier a peu évolué dans la plupart des régions depuis les années 1960²⁵, sa répartition a quant à elle été modifiée (Van Wesemael et Brahy, 2006).

Premièrement, cette stabilisation des apports totaux correspond à une augmentation de la production de lisier au détriment de la production de fumier, suite à une dissociation des activités d'élevage et de culture. Or les apports de lisier ne favorisent pas la formation

²⁵ « Il faut noter que la stabilisation des apports totaux de fumier et de lisier correspond à une augmentation de la production de lisier au détriment de la production de fumier, suite à une dissociation des activités d'élevage et de culture. Cette évolution a probablement une influence sur le taux de MO, étant donné que les apports de lisier ne favorisent pas la formation d'humus stable » Van Wesemael et Brahy, 2006, p475.

d'humus stable dans les sols et donc la constitution de stocks durables de carbone organique.

Ensuite, la conversion des prairies en terres arables s'est soldée par une augmentation de la densité du cheptel sur les prairies et une diminution (dilution) des applications d'effluents d'élevage sur les cultures. Ceci peut expliquer l'augmentation des teneurs en MO dans les sols sous prairie entre 1960 et 2000 et la diminution des teneurs dans les sols sous cultures pendant cette même période. Cette explication est également valable pour la comparaison des évolutions opposées en Flandre (développement exponentiel de l'élevage) et en Wallonie (développement des grandes cultures). D'après le rapport de l'IRSIA de 1995 (Vanongeval *et al.*, 1995), les teneurs en MO dans les sols sous prairie ont en effet augmenté de 31% en Région flamande pour seulement 18% en Région wallonne. La différence est également marquée pour les sols cultivés (+14% en région flamande vs -16% en région wallonne).

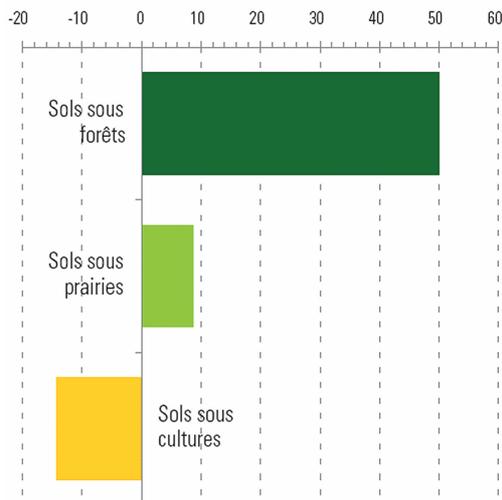
La tendance s'inverse entre 1990 et 2000 et ce alors que les changements d'occupation des sols agricoles sont plus limités (seulement -4,4% pour les sols sous prairie) pendant cette période.

- La diminution des teneurs de MO en prairie trouve probablement son explication dans l'adoption d'une réglementation plus stricte en ce qui concerne les épandages d'effluents d'élevage dans le cadre de la gestion durable de l'azote.
- Pour l'augmentation des stocks de carbone organique dans les sols sous culture, les pratiques agri-environnementales (augmentation des taux de couverture des sols et par là du retour de résidus végétaux) et les évolutions récentes des pratiques culturales vers un travail réduit du sol (sans labour) sont invoquées.

5.2.3. Risques pour la fertilité et les autres fonctions du sol

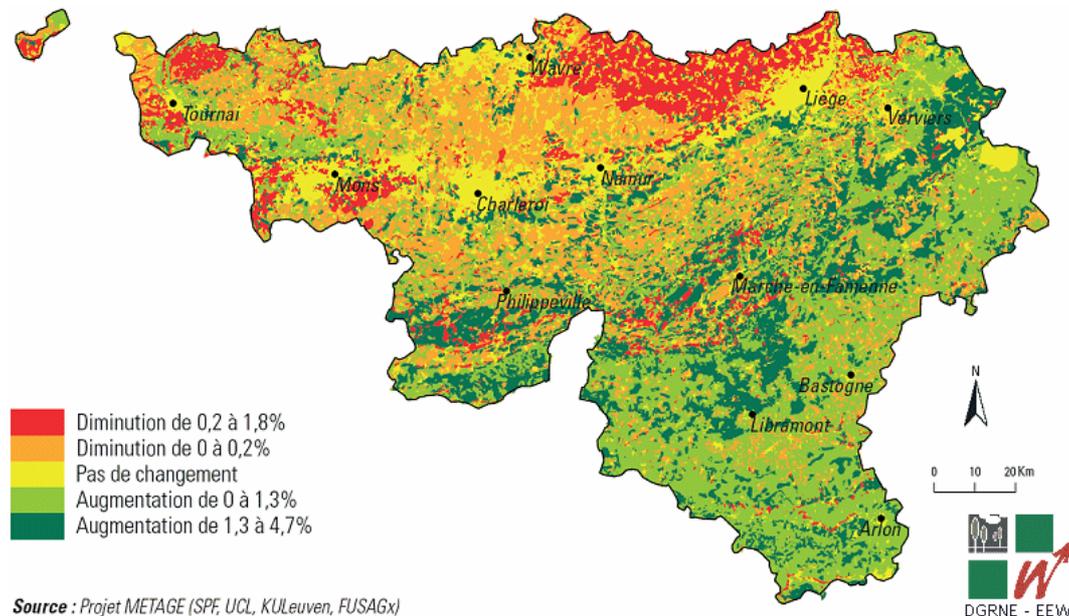
Malgré cette évolution jugée positive en termes de stocks, la tendance que suit la teneur en MO pour les sols cultivés est préoccupante dans la mesure où elle est considérée comme un indicateur important de la qualité du sol et de sa capacité à remplir ses différentes fonctions. La figure 5.3 montre une régression de 16%. (Figure 14, CEEW, 2007)

Figure 14 : Evolution de la teneur en matière organique dans les sols (sur une profondeur de 30 cm) en Région wallonne entre 1960 et 2000



D'autre part, les résultats de l'analyse d'un échantillonnage réalisé en 2005, à partir d'environ 400 profils ayant déjà fait l'objet d'une analyse en 1955, confirment l'état critique de certains sols cultivés dans le Condroz et dans les régions limoneuses et sablo-limoneuses. Le pourcentage de profils avec une teneur en MO inférieure à 2% est en effet passé dans ces régions de 30% en 1955 à 63% en 2005. (Carte 5, CEEW, 2007)

Carte 5 : Evolution des teneurs en matière organique dans les sols entre 1960 et 2000 (%)

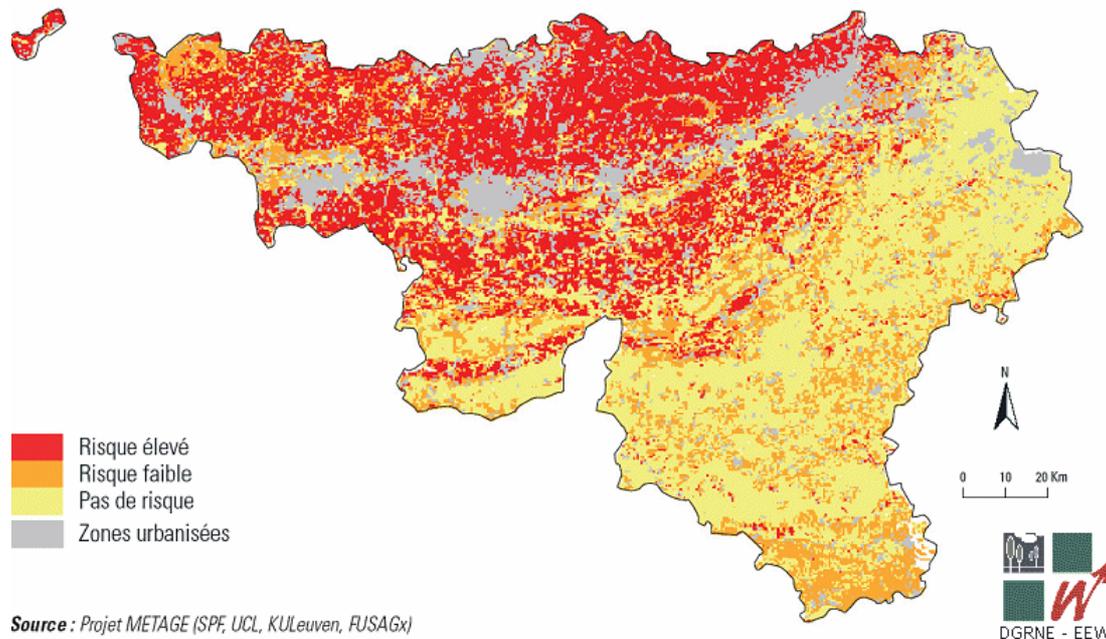


Nous avons vu plus haut que si la teneur en MOS descendait en dessous d'un certain seuil, les propriétés du sol risquaient fort d'être mises à mal. Les agrégats deviennent instables, augmentant ainsi les risques de dégradation (érosion, désertification, ...). Une carte du risque d'atteindre ce seuil critique (évalué ici à 2%) a été dressée pour l'ensemble du territoire belge, en tenant compte des zones déjà carencées en 2000 et des zones dont les sols

avaient connu une diminution de leur teneur en MOS entre 1996 et 2000 (CEEW, 2007 : p472).

On voit sur la carte 6 (CEEW, 2007) que la majorité des sols situés au nord du sillon Sambre-et-Meuse se trouvent dans une situation précaire.

Carte 6 : Risque d'atteindre moins de 2% de matière organique dans les sols dans les sols (2000)



5.2.4 Quelle réponse ?

Quelles sont les initiatives qui ont été prises à l'échelle de la Région wallonne pour maintenir ou améliorer le statut organique des sols cultivés ? Bien qu'il n'existe pas de mesure spécifique, la politique régionale de développement rural inclut une série de mesures qui concernent plus ou moins directement cette problématique. Au niveau agricole, il s'agit essentiellement (CEEW, 2007 : p473) :

- Du respect des règles de conditionnalité visant le maintien des niveaux de MO du sol et des terres consacrées aux pâturages permanents
- De la mise en oeuvre de certaines mesures agri-environnementales (tournières enherbées, couverture hivernale du sol...)
- Du soutien au développement de l'agriculture biologique (utilisation exclusive d'engrais organiques (compostés))
- De la possibilité d'épandre des MO exogènes sur les sols (boues de station d'épuration, composts, digestats, déchets des industries alimentaires...) moyennant le respect de

conditions particulières (octroi de certificats d'utilisation, analyses de sols obligatoires pour vérifier le respect de certaines normes)

La Région wallonne a en outre développé depuis 2004 un projet appelé « ARVA »²⁶ (Association pour la Recherche et la Valorisation en Agriculture) dont la mission est de mettre sur pied un système harmonisé de surveillance de la qualité des terres agricoles et ce afin de répondre aux exigences attendues de la future directive « sols » évoquée plus haut (Warin *et al.*, 2004). Son action doit se dérouler en quatre phases :

- I. « La recherche d'une démarche de surveillance en adéquation avec la volonté européenne et les exigences de qualité de l'agriculture ;
- II. L'inventaire des connaissances déjà acquises sur la qualité des sols et l'analyse de leur utilité sur l'ensemble du territoire ;
- III. L'évaluation de la précision avec laquelle il est possible de détecter une évolution dans les sols en Région wallonne moyennant les sites chantiers mis en place pour valider la méthodologie des mesures ;
- IV. Une analyse des stratégies de structuration d'un futur réseau de surveillance. » (Warin *et al.*, 2004 : p69)

²⁶ Arava = « terres arables » en latin.

6. Matières organiques et puits de carbone

Le dioxyde de carbone (CO₂), dont la concentration dans l'atmosphère a augmenté de 280 parts par million dans le milieu du XIX siècle à 379 parts par million en 2005, est reconnu par la quasi totalité de la communauté scientifique comme le principal responsable du réchauffement planétaire. Ce dernier est estimé à +0,6°C pour le XX siècle (GIEC, 2007). Or, les études plus approfondies du cycle du carbone et l'établissement d'un bilan des échanges de cet élément au niveau global ont vite suggéré l'existence de « puits ». En effet, l'accroissement réel du CO₂ atmosphérique (3,3 Gt par an) s'est avéré moins fort qu'attendu au vu des émissions anthropiques enregistrées (6,3 Gt par an). Une partie a donc été « piégée », c'est-à-dire absorbée, emmagasinée, par d'autres écosystèmes. Et la mise en évidence de ces puits a permis d'envisager leur utilisation ou leur développement pour lutter contre le renforcement de l'effet de serre.

6.1. Puits de carbone

6.1.1. Piégeage du carbone

On entend par piégeage du CO₂, « *tout processus tendant à faire augmenter la teneur en carbone d'un bassin ou d'un réservoir de carbone autre que l'atmosphère* » (GIEC, 2000 : p21), si possible de manière stable et durable. Ces puits, qui absorbent le carbone dans le cycle, sont la biomasse terrestre et l'océan.

A ce jour, certains chercheurs envisagent sérieusement de recourir à d'autres types de puits qui seraient « non naturels ». La technique à l'étude consisterait à capturer le CO₂ à la sortie d'importantes sources dites stationnaires (centrales électriques, industries) qui produisent de l'énergie pour l'« injecter » dans les couches géologiques du sol.

L'idée d'utiliser l'océan et d'injecter le CO₂ dans les abysses océaniques a quant à elle été progressivement abandonnée face au danger d'acidification que représentaient des doses excessives de CO₂ dissous. Il en va de même pour les projets de fertilisation océanique, visant à amplifier son rôle naturel de puits de carbone, qui présentent aussi des risques environnementaux importants (impact sur les écosystèmes).

En ce qui concerne les échanges entre l'atmosphère et la biomasse terrestre, on sait que le CO₂ circule depuis des centaines de millions d'années entre ces deux réservoirs par les processus naturels que sont la photosynthèse et la respiration des plantes et du sol (Robert, 2002).

On explique le phénomène d'accumulation croissante du CO₂ dans la biomasse par :

- D'une part, une augmentation globale de la production photosynthétique, elle-même engendrée par une concentration accrue de CO₂ dans l'atmosphère et
- D'autre part, l'allongement de la durée végétative qui résulte de l'augmentation de température.

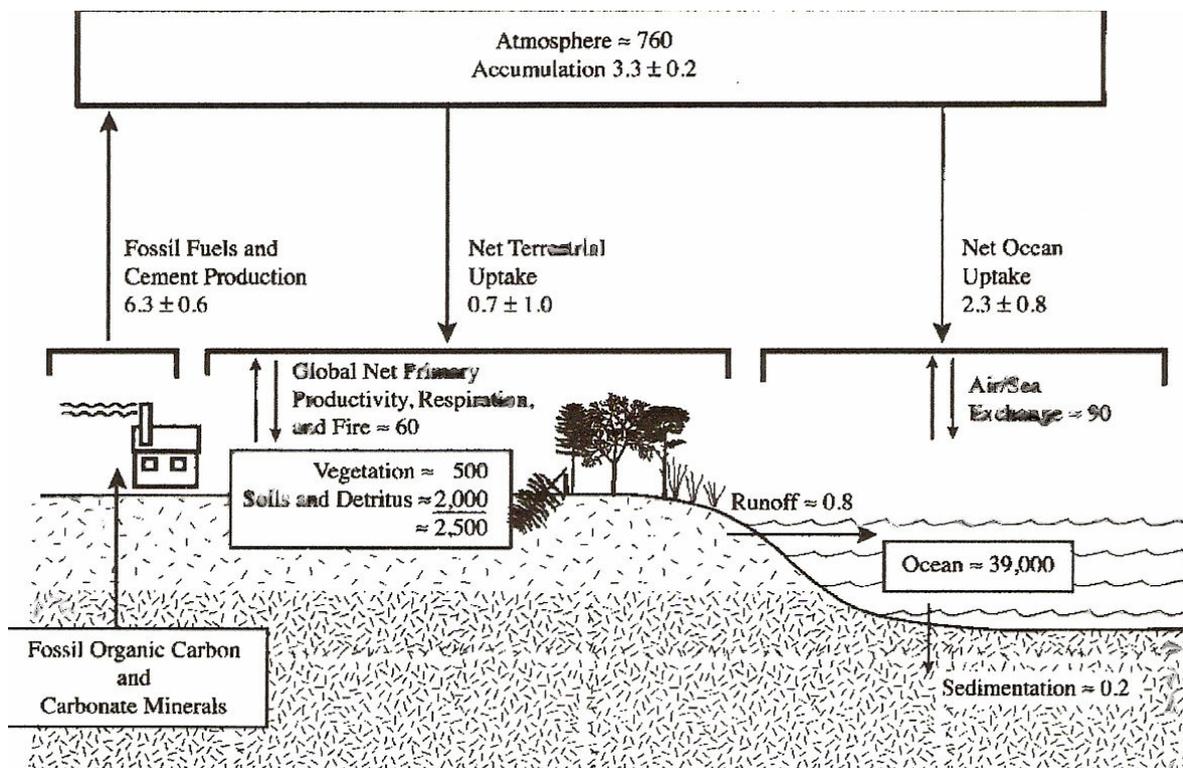
Au niveau des sols, cela se traduit par une augmentation de la biomasse et ensuite de la nécromasse (Girard *et al.*, 2005).

Une autre hypothèse mise en avant est celle de la diminution de la vitesse de la décomposition de la matière organique : « *une autre cause, hypothétique à ce stade, serait une augmentation du temps de résidence du carbone dans le bois sur pied ou dans les sols* » (Girard *et al.*, p240). Cette idée est cependant en contradiction avec la théorie évoquée en première partie selon laquelle la décomposition serait accélérée sous l'effet d'une augmentation de la température.

Bien que les quantités varient selon les sources, on estime que les sols constituent le plus grand réservoir terrestre de carbone (entre 1500 et 2000 Gt de carbone).

En ce qui concerne les flux de carbone, la figure 15 (Watson et al cité par Van Wesemael, 2006 : p4) décrit leur valeur au niveau mondial.

Figure 15 : Cycle global du carbone : flux principaux au niveau global



Dans un premier temps, les plantes fixent le CO₂ atmosphérique par la photosynthèse. La partie située au dessus du sol ainsi que les racines restituent une partie de ce CO₂ par la respiration.

Tant que les plantes continuent à pousser, l'absorption de CO₂ (120Gt C par an) est plus importante que les rejets dus à la respiration autotrophe des plantes (60 Gt C par an).

Les micro-organismes qui décomposent les résidus de végétaux et de racines libèrent également du CO₂ par la respiration hétérotrophe (55 Gt C par an). Sous l'action de ces décomposeurs et de phénomènes physico-chimiques, une partie du carbone est conservé sous une forme plus stable : 5 Gt C par an prennent la forme d'humus stable qui sera réfractaire à la dégradation. Les temps de résidence du carbone organique dans les sols sont en moyenne de quelques dizaines d'années (*Ibidem*).

Dans un écosystème en équilibre, il n'y a pas d'échange net de CO₂ entre l'atmosphère et les écosystèmes terrestres. Mais ce bilan doit également prendre en compte les processus perturbateurs naturels, tels que les feux ou les maladies, et bien sûr aussi des activités humaines telles que le défrichement des forêts. En soustrayant ces perturbations de 1,6 Gt C par an au piégeage annuel de carbone par les écosystèmes terrestres (2,3 Gt C par an), on obtient une séquestration nette de CO₂ des écosystèmes terrestres de 0,7 Gt C par an (*Ibidem*).

6.1.2. Sols agricoles et puits de carbone

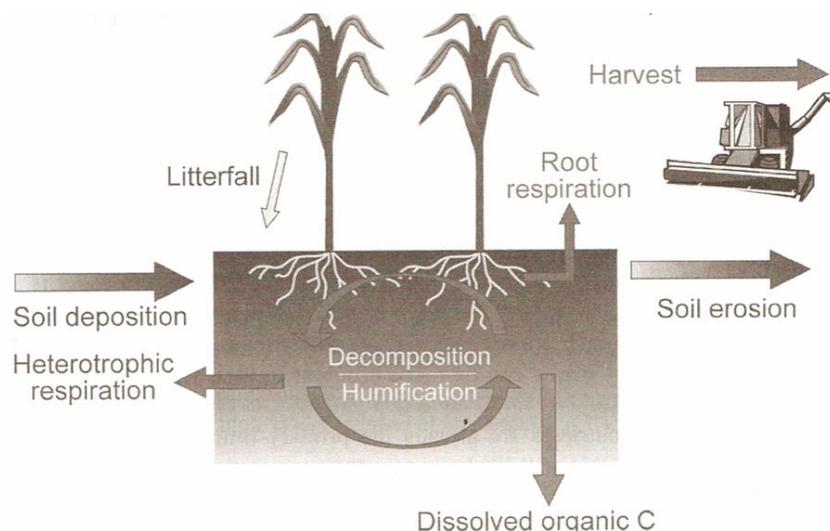
Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2000) rapporte que les stocks de carbone des terres cultivées, sur une profondeur d'1 mètre, s'élèvent à 128 Gt, soit 5% du carbone contenu dans la biomasse continentale qu'il estime à 2 477 Gt de carbone²⁷.

Comme expliqué dans le chapitre précédent, en travaillant la terre, l'homme a modifié les échanges « naturels » de carbone entre l'atmosphère et la biosphère terrestre. S'en est suivit une diminution importante des stocks de carbone organique dans les sols cultivés.

La figure 16 montre le cycle du carbone pour les terres agricoles (Pierzynski *et al.*, 2005 : p424).

²⁷ GIEC, 2000 p 4 voir annexe 1

Figure 16 : le cycle du carbone en terre cultivée



S'il ne doit pas y avoir d'échange net de CO₂ dans un écosystème non perturbé, dans le cas des terres cultivées, la majeure partie du carbone fixé dans la plante sera exportée lors de la récolte. Il n'y a donc presque pas de possibilité de séquestration dans la biomasse. Par contre, le taux de MOS peut fortement évoluer grâce au bilan qui somme les intrants organiques, sous forme d'amendement ou de fertilisants, et leur décomposition.

Ce bilan, nous l'avons vu peut fortement être influencé par les pratiques agricoles. Aux pertes de MOS engendrées par un travail accru des couches toujours plus profondes du sol arable et par des apports moindres en matières organiques exogènes, vient s'ajouter le phénomène de l'érosion des sols: « *Worldwide, an estimated 25 billion tons of soil are lost to erosion each year and, assuming 4% organic C content, that represents a potential C input of 1Gt/year or 20% to 30% of the net increase in atmospheric each year* » (Ibid, p 423).

La situation est telle que d'aucuns considèrent aujourd'hui que les terres agricoles représentent une source de carbone plutôt qu'un puits et que leurs émissions de CO₂ devraient faire l'objet d'une comptabilisation au même titre que les autres gaz à effet de serre (GES) liés à leur exploitation (Robert, 2002).

On comprend bien dès lors que la lutte contre le réchauffement planétaire passe non seulement par une meilleure compréhension du cycle du carbone mais aussi par l'étude de la manière dont les activités de cultures ont et vont affecter ses flux et ses stocks. Ceci implique également que le secteur agricole, qui s'était déjà engagé dans cet effort en tentant de maîtriser ses émissions de méthane et de protoxyde d'azote²⁸, soit à nouveau sollicité

²⁸ Selon l'Agence Européenne pour l'environnement, les émissions de GES pour l'Europe des 15 ont diminué de 10% entre 1990 et 2004 et les projections pour 2010 prévoient une diminution totale de 16% par rapport à l'année de référence 1990 (EEA, 2006)

afin de favoriser les pratiques qui permettront de réduire les pertes de carbone et/ou d'augmenter son absorption.

Les activités qui concernent le piégeage du carbone dans la biomasse sont reprises dans le rapport spécial du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat sur « l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie » (GIEC, 2000) et sont plus généralement désignées sous l'acronyme LULUCF («Land Use, Land Use Change & Forestry »).

6.1.3. Utilisation et gestion des terres cultivées

Comme expliqué précédemment, les sols agricoles peuvent à la fois constituer des sources ou des puits de CO₂.

En cas d'équilibre entre les apports annuels (résidus de cultures et autres apports de MO) et le taux annuel de décomposition et à conditions environnementales et d'exploitations constantes pendant plusieurs décennies, le niveau de matière organique devrait également rester constant. En d'autres termes, si les conditions climatiques ne changent pas, le facteur qui va contrôler la concentration des MOS sera très largement déterminé par l'usage qui est fait d'un sol et par sa gestion.

Pour accroître les stocks de carbone organique on peut donc améliorer le bilan entrée de MO / sortie de CO₂ (Sleutel, 2005) :

- soit **en augmentant les « entrées » de matière organique**, en accroissant la production primaire, en augmentant les restitutions au sol de résidus, en important des MO non agricoles (épandage de déchets organiques d'origine industrielle ou urbaine) ;
- soit **en retardant les « sorties » par minéralisation**, en jouant sur la composition des MO ou sur l'usage qui est fait du sol et les pratiques agricoles.

L'idée est donc de favoriser les usages du sol et/ou les pratiques agricoles qui agissent sur chacun de ces mécanismes ou sur les deux à la fois.

◆ Utilisation des sols

La conversion de terres arables en terres sous prairie et/ou zones boisées va automatiquement permettre une augmentation des stocks de carbone dans le sol. Le fait que ces sols ne soient pas travaillés va en outre diminuer la vitesse de décomposition de la MOS.

◆ Gestion des sols

En ce qui concerne la gestion des terres cultivées, les options suivantes s'offrent à l'agriculteur :

Pour augmenter les apports de carbone il peut adapter : la rotation culturale ; la durée de période de friche ; ses techniques de fertilisation (engrais verts, fumures organiques et minérales) ; la gestion des résidus de cultures (enfouissement).

Dans le cas de la réduction de la vitesse de réduction des MOS, les conséquences des actions sont moins faciles à prédire. Nous avons vu que les processus de transformation étaient multiples et qu'ils étaient soumis à de nombreux facteurs qui échappent au contrôle du cultivateur (climat). Si les connaissances à ce sujet doivent encore être étoffées, on sait néanmoins que deux éléments peuvent être maîtrisés :

- la composition de la MO apportée lors de la fertilisation ou de l'amendement. Elle dépend également de la sélection des cultures. Les teneurs relatives de ces apports en azote, cellulose, hémicellulose, lignine et tanins vont influencer la vitesse de décomposition ;
- le travail du sol qui doit être le plus réduit possible pour ne pas perturber les agrégats et pour éviter une accélération de la minéralisation.

On pourrait également envisager de jouer sur la réduction de la libération de CO₂ lors du processus de décomposition (Sleutel, 2005). Une manière d'augmenter le niveau de carbone organique du sol serait de diminuer la proportion de carbone minéralisée directement en CO₂ et d'augmenter la formation plus stable de carbone organique dans la MOS. Par exemple, l'action de champignons reconnue comme plus importante dans le processus d'humification pourrait être favorisée par rapport à celle des bactéries grâce, entre autre, à un labour réduit du sol. On pourrait également accroître la présence de lignine dont la décomposition est réputée plus lente. Ici encore, les facteurs qui contrôlent le processus d'humification sont nombreux et les réactions sont encore méconnues.

6.1.4. Stockage de carbone : perspectives et limites

Partant de l'idée que les sols, détournés de leur évolution végétative naturelle pour être soumis à une exploitation agricole, vont perdre entre 25% et 50% de la MO qu'ils contiennent, les estimations globales des pertes historiques de carbone organique dans les terres cultivées varient entre 40 à 60 Gt (Sleutel, 2005) et 50 à 150 Gt (Pierzynski et al., 2005). Nous avons vu au chapitre 4 que Paustian *et al* (cités par Rees, 2001), estimaient que les stocks mondiaux de carbone organique étaient passés de 209-222 Gt C à 168 Gt C actuellement.

Ceci offre une perspective sur les potentiels de séquestration de carbone que présentent ces sols. Les niveaux d'origine peuvent en effet être considérés comme l'objectif ou la limite supérieure à atteindre. « *If we could return that C to soils, this would represent the maximum benefit that could be realized by C soil sequestration.* » (Pierzynski et al, 2005 : p424). C'est ainsi près de 40 Gt de carbone qui pourraient être capturées dans les terres cultivées pour les cinquante prochaines années. Le piégeage actuel dans les écosystèmes terrestres estimé à 2 Gt de CO₂ par an pourrait être doublé, pas uniquement par des activités de reforestation mais aussi par une meilleure gestion de ces terres (*Ibidem*).

A l'échelle de l'Union européenne, le Programme Européen sur le Changement Climatique (ECCP)²⁹ a chargé en 2002 un sous-groupe de travail d'investiguer sur les potentialités qu'offrent les sols agricoles en tant que puits de carbone³⁰. Ce dernier a passé en revue les différentes options d'utilisation et de gestion des sols en estimant le potentiel qu'elles représentaient, leur faisabilité et leurs éventuels impacts tant environnementaux que socio-économiques. Le résultat de ces premières investigations a été publié en 2003 : « *According to the estimates provided by the experts, there is the potential to sequester up to 60-70Mt CO₂ y-1 in agricultural soils of EU-15 during the first commitment period, which is equivalent to 1,5-1,7% of the EU' anthropogenic CO₂ emissions.* »(ECCP 2003, p4)³¹ Il s'agit d'environ 20% des efforts à fournir (337 Mt de CO₂ par an) pour la période qui va de 2008 à 2012.

En France, l'institut National de la Recherche agronomique (INRA), dans son rapport de 2002, estime le potentiel de stockage du territoire métropolitain à 1 à 3 Mt de carbone par an pendant une durée de 20 ans.

Les rapports de l'ECCP et de l'INRA attirent cependant l'attention sur les limites et difficultés liées au recours aux terres agricoles comme puits de carbone.

◆ **La saturation des puits**

La capacité des sols à stocker du carbone n'est ni linéaire, ni illimitée. Les expériences qui portent sur de longues périodes ont montré que la croissance des quantités de carbone organique accumulées est maximale juste après que le changement de gestion ou d'usage des terres ait eu lieu. Au cours des années qui suivent (entre 20 et 100 ans), ce taux de croissance diminue progressivement jusqu'à ce que le sol ait atteint un nouvel équilibre (où entrées et minéralisation de MOS se compensent).

²⁹ Ce programme regroupe plusieurs équipes composées d'experts provenant d'horizons divers et d'acteurs sociaux qui travaillent sur des thèmes précis afin de fournir à l'UE les fondements d'expertise et de réflexion nécessaires à la politique de lutte contre les changements climatiques.

³⁰ L'Europe des 15 à l'époque

³¹ Pour le détail des mesures et le potentiel qu'elles offrent voir annexe 2

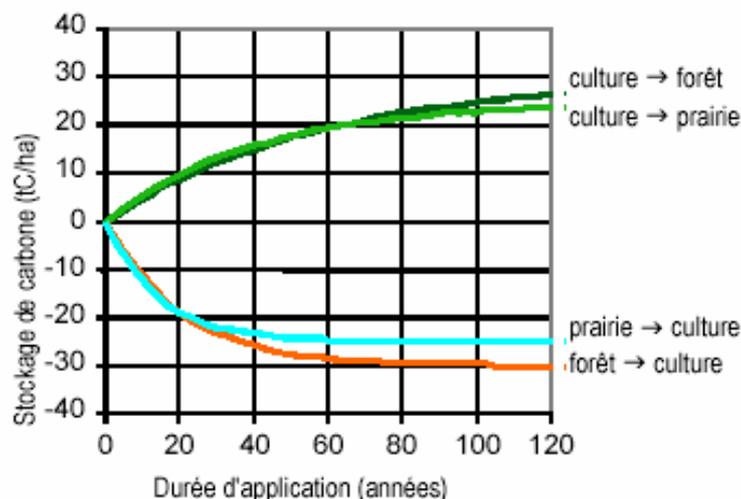
Il en résulte que le recours aux sols agricoles pour compenser les émissions de CO₂ ne peut être qu'une solution temporaire.

Par ailleurs l'augmentation de la biomasse reste conditionnée par une série de facteurs tels que la disponibilité en eau et en nutriments ou les conditions climatiques. Au-delà d'un certain stade de croissance, cette dernière peut être arrêtée sous l'effet limitant de ces facteurs (par exemple une sécheresse).

◆ Leur caractère non permanent

Il a également été démontré que le carbone organique du sol mettait moins de temps pour disparaître que pour s'accumuler. Dans ces circonstances, l'abandon ou l'interruption temporaire des activités « stockantes » se traduit le plus souvent par des pertes accélérées de carbone. Comme le montre la figure 17³², « sur 20 ans, par exemple, le stockage lié à la conversion terre arable -> forêt est deux fois plus faible que le déstockage induit par la conversion inverse » (Arrouays et al., 2002 : p8).

Figure 17 : Evolutions du stock de carbone dans le sol associées aux pratiques provoquant les stockages (0,5 t C/ha/an durant les 20 premières années) ou les déstockages (1 t C/ha/an) extrêmes.



Il en va de même lorsque l'on repasse à un travail du sol traditionnel après avoir eu recours au travail du sol conservateur : « *Whilst agricultural soils that are tilled every few years may contain more carbon than the same soils cultivated every year, much of the benefit of reduced tillage is lost by ploughing, when compared to a permanent management change.* » (ECCP, 2003 : p26) Pour qu'une mesure soit efficace, elle devrait être permanente. Or qui peut garantir aujourd'hui l'affectation des terres pour les 50 prochaines années ?

³² Valeurs modales pour le territoire français ; l'intervalle de confiance à 95% sur ces valeurs est de l'ordre de ±40%.

◆ **Les aspects socio-économiques**

Cette question est d'autant plus pertinente que les terres agricoles subissent de nouvelles pressions. L'augmentation récente du prix du blé en témoigne, la demande de matières premières, y compris de produits agricoles, suivra la croissance démographique. A cela s'ajoute la nécessité grandissante de limiter notre dépendance à l'énergie fossile en recourant aux biocombustibles. Les choix d'utilisation des sols risquent fort dans ce contexte de répondre à d'autres priorités que le piégeage du CO₂.

De plus la conversion vers des activités « stockantes » de carbone représente un certain coût (coût des équipements, charge de travail supplémentaire). A moins d'être encouragées et soutenues financièrement par les pouvoirs publics, ces mesures ont peu de chance d'être adoptées si elles sortent des limites strictes de la rentabilité de la production agricole. Seulement, le recours aux instruments financiers d'incitation, déjà bien connu dans le cadre de la Politique Agricole Commune (PAC) pose particulièrement problème si, comme cela vient d'être évoqué, les avantages de la conversion en terme de stockage du CO₂ devaient aller en décroissant et si tout retour en arrière ou changement d'orientation pouvait supprimer les bénéfices acquis.

On peut alors se demander si le recours aux autres mécanismes de flexibilité ne serait pas plus judicieux. L'ECCP estime à ce propos que le financement de la conversion ne sera pas une bonne opération aussi longtemps que la tonne de carbone s'échangera à un prix inférieur à 22 € (ECCP, 2003).

◆ **Faisabilité technique**

Outre ces considérations économiques, les contraintes techniques ne doivent pas être négligées. A titre d'exemple, si l'on souhaite jouer sur les stocks de carbone organique en augmentant les apports de MO exogènes, il faut s'assurer de leur disponibilité en suffisance à proximité de la zone d'exploitation (pailles, effluents animaux).

◆ **Les émissions nettes de GES et les aspects environnementaux**

Par ailleurs, les autres émissions de gaz à effet de serre telles que le méthane (CH₄) ou le protoxyde d'azote (N₂O) et aussi le CO₂ qui provient de la combustion d'énergies fossiles (transport, travail du sol, engrais minéraux) doivent également être prises en compte.

Le travail du sol réduit donne lieu à une réduction des émissions de CO₂. Une augmentation des apports en engrais organiques permet quant à elle un recours réduit aux engrais minéraux azotés dont la synthèse exige beaucoup d'énergie. Cependant ces pratiques, bien que favorables au stockage du carbone, peuvent se traduire par des émissions accrues

d'autres GES, rendant l'opération neutre voire défavorable en terme de réduction de l'effet de serre.

Par exemple les bénéfices en terme de séquestration de CO₂ de l'apport de MO par épandage de fumier ou enfouissement de résidus de culture peuvent être annihilés par les émissions de N₂O (processus de dénitrification). Rappelons que le potentiel de réchauffement global du N₂O est 310 fois plus élevé que celui du CO₂ (Van Wesemael, 2006 : p 5).

De même, si l'on s'en tient strictement au bilan de CO₂, d'autres pratiques que le stockage de la matière organique dans les sols offrent un plus grand intérêt. D'après le rapport de l'INRA de 2002, ce serait le cas de la valorisation énergétique des résidus de culture : « *Pour 7 t de pailles, le stockage de C dans le sol est évalué à 0,15 tC/ha/an, alors que la combustion permettrait une économie de 2,4 tC, soit un gain de 2,25 tC/ha/an.* » (Arrouays et al., 2002 : p12)

Sur le plan agronomique, nous avons vu plus haut que les effets d'une quantité accrue de MOS sont positifs : amélioration de la stabilité structurale des sols, de leur réserve en éléments fertilisants et de leur réserve en eau. Il convient cependant de tenir compte de certains effets négatifs tels que l'utilisation accrue de pesticides dans le cas de l'abandon du labour et du risque de pollution des sols et des eaux souterraines qui y est associé.

◆ Pas de règle unique

Même si les pratiques agricoles peuvent influencer les stocks de carbone organique, les facteurs pédo-climatiques n'en restent pas moins déterminants. On sait par exemple que les sols argileux peuvent accumuler le carbone très vite alors que les sols sableux peuvent ne pas en accumuler même après plusieurs décennies d'apports en matière organique exogène. Comment dès lors donner une appréciation générale pour chaque action ?

Dans ses calculs pour estimer les potentiels de stockage des sols européens, l'ECCP a utilisé des valeurs moyennes pour l'ensemble du territoire de l'Europe des 15. Ces résultats masquent pourtant des variations importantes entre les différentes régions. Il a notamment été observé que la réduction du labour ne convenait pas du tout aux sols humides.

Si les potentiels de stockage de C sont à ce point inégaux entre les différentes régions, il devient difficile d'envisager de recourir à des prescriptions à caractère général (instruments normatifs et incitants économiques) pour encourager certaines actions jugées bénéfiques.

◆ Difficulté d'évaluation des stocks de carbone

Dans le même ordre d'idées, les estimations de stocks reposent généralement sur des mesures ponctuelles de teneurs en carbone des sols, converties ensuite en stock (passage d'une teneur rapportée à une masse de sol à un stock rapporté à un volume). Etant donné la forte variabilité temporelle et géographique de ces stocks dans les sols, ainsi qu'un gradient vertical marqué (les teneurs décroissent en fonction de la profondeur), les données disponibles pour les évaluer doivent être nombreuses, complètes et comparables entre elles. Les risques d'erreurs d'extrapolations abusives sont donc aussi importants que le coût que représente ce travail. Il est de plus difficile de mettre en évidence des variations de stocks, qui restent très faibles comparées à des stocks eux-mêmes très variables.

« Vu que les changements de COS induits par la gestion agraire ne dépassent pas les 2 t C ha⁻¹ an⁻¹ (Freibauer et al., 2004), l'évolution maximale du COS sur une période raisonnable (3-5 ans) se limite à environ 5t C ha⁻¹. Une étude sur la variabilité du taux de carbone dans les terres arables en Ardenne et dans la région jurassique a montré qu'il faudrait analyser entre 7 et 129 échantillons par parcelle d'environ 1 hectare pour détecter un changement de 5t C ha⁻¹ (Stevens et al., 2006). Les techniques d'analyse classiques ne permettent pas de traiter ce grand nombre d'échantillons à un coût raisonnable. » (Van Wesemael, 2006 : p17)

◆ Effets du changement climatique

Tout ceci se complique encore quand on tente de tenir compte des effets potentiels du changement climatique et de la composition de l'atmosphère sur le cycle du carbone. On sait que l'augmentation de la température favorise la minéralisation de la MOS. Si cette tendance devait prendre le pas sur l'accroissement de la production végétale, le bilan de ces deux effets contraires pourrait entraîner une variation des stocks de C comprise entre +2% et -2% pour les 20 années à venir. (Arrouays et al., 2002)

De plus, l'évolution des conditions climatiques pourrait remettre en cause certaines pratiques adoptées : « *une augmentation de la fréquence des sécheresses pourrait, par exemple, conduire à l'abandon de l'enherbement de cultures pérennes dans le sud de la France ou à une baisse de la productivité des prairies permanentes favorisant le passage à des cultures annuelles récoltées en été.* » (Arrouays et al., 2002 : p17)

6.1.5. Une stratégie « no regrets »

Bien que la mise en œuvre d'une politique de piégeage du CO₂ dans les sols agricoles présente certaines limites et difficultés, faut-il pour autant y renoncer ?

Nous avons vu plus haut que les pratiques agricoles qui conduisent à la diminution des teneurs en matières organiques étaient dommageables non seulement pour la fertilité des sols mais également pour le fonctionnement de l'entière de l'agro-écosystème.

Les rapports de l'ECCP et de L'INRA rappellent que toute stratégie qui vise à augmenter la quantité de MO dans les sols devrait être encouragée pour les avantages agronomiques et environnementaux qu'elle présente. De la même manière, P.Smith parle de stratégies « sans regret » ou de stratégies qui portent leurs fruits dès aujourd'hui mais dont les bénéfices pourraient être encore plus importants pour le futur : « *Since improved agricultural management often has a range of other environmental and economic benefits in addition to climate mitigation potential, strategies to improve soil carbon storage are attractive as part of integrated sustainability policies... Given that many soil characteristics or indicators benefit from improved soil organic matter management, a "no regrets policy" for organic matter management is attractive.* » (Smith, 2004 : p234).

6.2. Protocole de Kyoto : l'article 3.4

L'autorisation de recourir aux puits de carbone dans le cadre du protocole de Kyoto est consacrée lors de la conférence des parties qui a lieu à Bonn en 2001³³. Il est prévu que le stockage de carbone dans la biosphère pourra être comptabilisé comme émission négative à condition qu'il soit le résultat 1) d'une activité intentionnelle, c'est-à-dire résultant d'une action volontaire et non d'une évolution spontanée et 2) d'une activité engagée après 1990. Ces principes sont définis dans les articles 3.3 et 3.4 du protocole³⁴ :

- **L'article 3.3** prévoit la comptabilisation des surfaces boisées, les activités de boisement, et de reboisement étant considérées comme des puits et celles de déboisement, comme des sources. Le tout doit être comptabilisé, avec des contingents stricts attribués à chaque pays (0,03 Mt C par an pour la Belgique), pour la première échéance de 2008 – 2012.
- **l'article 3.4** inclut les activités anthropiques supplémentaires, c'est-à-dire autres que celles prévues dans l'article 3.3, d'utilisation et de gestion des terres et des forêts qui pourraient induire une séquestration de carbone de manière vérifiable. Dans ce cas, les quantités déductibles ne sont pas plafonnées a priori ; elles sont fixées par chaque pays à condition qu'il puisse prouver les flux revendiqués.

Les accords de Marrakech en novembre 2001, entérinés par les accords de Montréal en décembre 2005, définissent les conditions d'application et les règles comptables à utiliser.

³³ Depuis la rédaction du protocole, les négociations se poursuivent dans le cadre des Conférences des parties annuelles, qui sont alimentées par les travaux scientifiques du GIEC.

³⁴ Texte complet voir annexe 3

En ce qui concerne les sols agricoles, visés par l'article 3.4, il est précisé que « *On entend par « gestion des terres cultivées » l'ensemble des opérations effectuées sur les terres où l'on pratique l'agriculture et sur les terres qui font l'objet d'un gel ou ne sont temporairement pas utilisées pour la production de culture* » (FCCC/KP/CMP/2005/8 : p6).

Voici les principes généraux à prendre en compte :

- ◆ **Les activités sont reprises dans les inventaires nationaux** : les parties qui souhaitent comptabiliser des activités dans le cadre de l'article 3.4 doivent soumettre un rapport qui reprend le quota d'émissions auxquelles elles ont droit et les activités qu'elles souhaitent prendre en compte pour la première période d'engagement. Les inventaires nationaux doivent en outre permettre d'identifier les parcelles affectées à ces activités.
- ◆ **Engagement à long terme** : « *lorsque le choix est fait, la décision de la Partie considérée vaut jusqu'à la fin de la première période d'engagement* ». Mais aussi, une fois qu'une parcelle a été prise en compte, « *toutes les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits sur ces parcelles doivent être comptabilisées au cours des périodes d'engagement successives suivantes* »
- ◆ **Comptabilisation de tous les flux nets de GES** : lorsque le résultat des évaluations fait apparaître un puits net de GES, la valeur correspondante est ajoutée au quota d'émissions attribué alors que cette valeur est soustraite au quota d'émissions de GES autorisé si l'évaluation fait apparaître une source nette d'émissions.
- ◆ **Vérification** : l'obligation de prouver le stockage de carbone rend les conditions de cette vérification cruciale. Elle recouvre à la fois l'effet « stockant » de carbone de l'activité et les surfaces soumises à cette activité et doit être double. En d'autres termes l'effet « puits » de cette activité précise, à cet endroit précis, doit être démontré par deux méthodes indépendantes. Toutefois, les modalités d'application de ces principes sont encore en débat : selon le niveau d'exigence qui sera retenu, les moyens à mettre en oeuvre et leur coût pourraient s'avérer rédhibitoires.

6.2.1. Position de l'Union Européenne

Au sein de l'Europe des 15, les bénéfices escomptés par l'application conjointe des articles 3.3 et 3.4 s'élèvent à 32,7 méga tonnes de CO₂ équivalent par an (EEA, 2006). Cette contribution est relativement modeste (près de 10%) en comparaison avec les objectifs à atteindre (342 Mt CO₂ équivalent par an). Plus modeste encore est la contribution des sols

agricoles puisque seul le Portugal a fourni une estimation quantifiée pour les sols sous culture et sous prairie. Estimation qui se limite à 0,5 Mt de CO₂ par an, les autres 32,2 Mt étant liés soit aux activités classifiées sous l'article 3.3 (13 Mt / an) ou sous l'article 3.4 mais limités à la gestion des forêts (14,2 Mt / an).

On est loin des 60 Mt de CO₂ par an annoncées par le rapport du groupe de travail sur les sols.

6.2.2. Position de la Belgique

En ratifiant le protocole de Kyoto, et en adhérant à l'accord européen sur la répartition de la charge, la Belgique s'est engagée à diminuer ses émissions de GES de 7,5% par rapport à l'année de référence 1990. Bien que cet objectif ait lui même fait l'objet d'un accord sur le partage de l'effort entre les trois régions (-7,5% pour la Région wallonne, -5,2% pour la Flandre et +3,47% pour la région de Bruxelles capitale³⁵), l'inventaire des émissions et la vérification du respect des engagements doivent être réalisés au niveau national.

Comme indiqué plus haut, le pays devait pour fin 2006 communiquer au secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) son « rapport initial », comprenant données chiffrées pour l'établissement de la « quantité attribuée » et son choix de recourir ou non au mécanisme de puits de carbone.

Sur base de l'estimation des émissions de 1990 (146,89 Mt CO₂ équivalent) le quota pour la première période d'engagement est fixé à 679,37 Mt CO₂ équivalent. Le rapport précise que ces estimations ne tiennent pas compte des puits comptabilisés en 1990 : « *In 1990 the LULUCF sector in Belgium was a net sink of 1431.14 Gg CO₂.y-1. Consequently, according to the Article 3.7 of the Kyoto Protocol, Belgium does not take into account the LULUCF sector to calculate the Assigned Amount.* »³⁶

Il confirme en outre que la Belgique n'aura pas recours à l'article 3.4 : « *Belgium does not elect grassland and cropland management under Article 3.4 for inclusion in its accounting for the first commitment period.*

Belgium does not elect any activities under Article 3.4. for inclusion in its accounting for the first commitment period. »³⁷

³⁵ Le solde est compensé par le recours à des mécanismes de flexibilité financés par le pouvoir fédéral

³⁶ Report by Belgium for the calculation of the assigned amount pursuant to Decision 13/CMP.1, December 2006

³⁷ Ibid

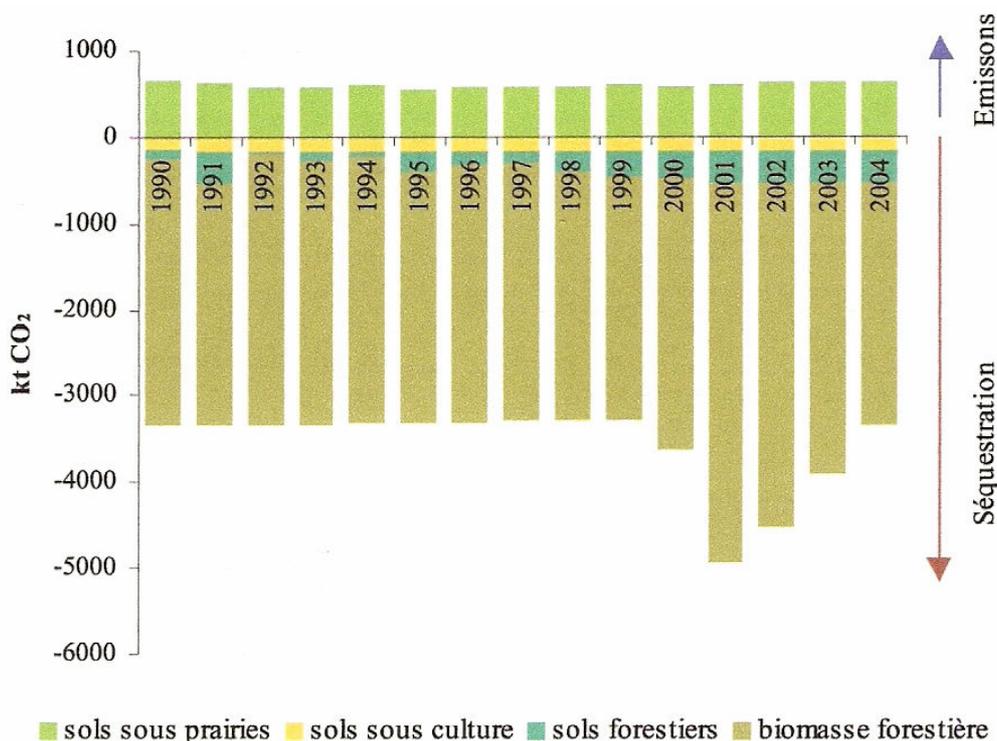
Le potentiel extrêmement modeste de ces activités pour notre pays³⁸, le taux d'incertitude élevée des projections (proche de 50%) et l'estimation des coûts supplémentaires générés par le suivi de ces activités justifie cette décision.

Par contre, l'article 3.3 sera bien utilisé. La foresterie est en effet évaluée chaque année depuis les années 1990 dans le cadre de la convention cadre et représente un puit net de 1,3 Mt de CO₂ par an.

6.3. La Région wallonne : état des lieux

Dans *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007*, Van Wesemael indique que les écosystèmes terrestres wallons ont piégé entre 2 656 et 4 308 kilo tonnes de CO₂ par an pour la période 1990-2004 (Van Wesemael, 2006 p9). Comme le montre la figure 18 (*Ibidem*), cette séquestration est essentiellement le fait des sols et de la biomasse forestière :

Figure 18 : Evolution des flux de CO₂ provenant des écosystèmes terrestres en Wallonie



Sources : rapport national des inventaires d'émissions de gaz à effet de serre (1990-2004) ; UCL-GEOG ; FUSAGx

³⁸ Selon l'estimation de Smith et al cité par van Wesemael (Van Wesemael, 2006, p16), on peut s'attendre pour la Belgique à une séquestration nette de 0,22 t CO₂ par an en 2010 si on applique les pratiques favorisant le stockage du carbone sur des surfaces réalistes et en respectant la législation et la politique environnementale.

Nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les stocks de carbone dans les sols cultivés wallons sont en forte diminution par rapport à 1960. Ceci représente donc un certain potentiel d'amélioration.

A ce jour les mesures qui concernent les terres agricoles qui ont un effet sur les flux de CO₂ sont reprises de manière indirecte dans d'autres politiques comme la gestion des effluents d'élevage, le code de bonnes pratiques agricoles, le code forestier, les circulaires sur les aménagements en forêt, l'agriculture biologique et les mesures agri-environnementales.

D'après Smith *et al.*, les mesures de gestion agricole et agri-environnementales prévues pour 2010 pourraient mener à une séquestration supplémentaire de 90,3 kt de CO₂ par an dans les terres cultivées de la Région wallonne. (Van Wesemael, 2006 : p17)

Même si le recours aux sols agricoles comme puits de carbone n'est pas prévu en tant que tel en Région wallonne, l'administration, en finançant des projets de recherche qui visent à quantifier l'évolution de la teneur en carbone dans les sols agricoles, permet le rassemblement de données qui seront très utiles pour évaluer les évolutions futures.

Au niveau fédéral, les projets de recherches METAGE³⁹ et CASTEC⁴⁰ ont quant à eux produit les chiffres nécessaires à l'établissement des inventaires nationaux de GES.

³⁹ Modeling Ecosystem Trace Gas Emissions

⁴⁰ Carbon sequestration Potential in different Belgian Terrestrial Ecosystems

7. Pour une meilleure gestion des MOS

Les sols de Wallonie dans les zones de grandes cultures présentent un taux de plus en plus faible en matière organique. Nous avons vu plus haut que cette situation était dommageable à terme, non seulement pour la fertilité de ces sols, mais aussi pour les autres fonctions environnementales qu'ils opèrent (lutte contre l'érosion). Il convient donc de s'atteler à une gestion plus durable des MOS. Ceci revient à faire en sorte que les stocks de carbone dans les sols cultivés soient plus importants. Certaines pistes ont déjà été évoquées dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Elles se résument en deux grands types de solutions :

1. d'une part, réduire les pertes de matière organique par minéralisation et provoquer une augmentation relative en surface en réduisant la fréquence et la profondeur du travail du sol (travail superficiel, non labour, semi direct) et,
2. d'autre part, augmenter les apports en gérant au mieux les rotations et les résidus de récolte et/ou en recourant à des apports exogènes de matière organique susceptibles d'augmenter les teneurs en matière organique des sols et d'agir sur leurs propriétés telles que la stabilité culturale

7.1. Les apports de MO exogènes

La question du labour réduit fait l'objet de nombreux articles. Si elle présente d'indéniables avantages dans certaines régions, il a été établi qu'elle convenait moins à certains types de sols (les sols humides par exemple) (Baker *et al.*, 2006).

Les apports exogènes de matière organique, ne présentent quant à eux que des avantages. Sleutel *et al.* (2006) qui ont comparé les évolutions de stocks de carbone entre 1990 et 2003 sur 116 sites ouest-flandriens montrent que les pertes récentes de carbone observées (-0,19 tC par hectare par an) sont essentiellement liées à la gestion des apports de MO. Au cours de cette période, les profondeurs de labour n'ont pas évolué et il n'y a eu que peu de conversions ou de changements d'utilisation des sols. Leurs conclusions sont les suivantes : « *A good linear relationship between shifts in input of OM and OC stock changes at the community scale suggests a predominant influence of management on the SOC stocks.* » et « *a substantial part of SOC is prone to further losses if agricultural management is not adapted towards a sustainable SOM balance.* » (Sleutel *et al.*, 2006: p195)

Carter définit bien comment ce mécanisme fonctionne :

Within any one soil type, increasing carbon inputs via agricultural management is the key to increasing soil organic matter quantity. Were the initial concentration of organic

matter is low, i.e. below the capacity of a specific soil to store organic matter, it has been observed that soil organic matter concentrations increase linearly with increasing input levels, although the slope of the line depends on climate, soil type and soil management. The latter variable influences carbon inputs mainly in the following three ways:

- increasing primary production
- increasing the proportion of primary production returned to, or retained by the soil
- influencing both microbe- and plant-induced changes in soil structure that can suppress the rate of decomposition through enhancing soil aggregation. (Carter, 2001 : p16)

En dehors de l'amélioration du bilan de matière organique des sols, ces apports permettent également de donner une « seconde vie » à la masse sans cesse croissante de déchets et de sous-produits que notre société génère (Gobat *et al.*, 1998).

Cependant, ces bénéfices ne peuvent être réels qu'à condition qu'un certain nombre de règles soient observées. Il s'agit essentiellement de s'assurer que :

1. l'apport soit de nature approprié à l'usage pour lequel on le destine (utilité agronomique) ;
2. que l'on puisse évaluer ses propriétés et son devenir dans les sols (caractérisation) ;
3. et surtout qu'il soit sans danger pour l'environnement et la santé humaine et animale (sécurité).

Il faut enfin limiter au maximum les nuisances sociales qui leurs sont associées (nuisances olfactives).

7.1.1. Quels types d'apports : engrais ou amendement ?

On envisage encore souvent ces apports selon deux objectifs distincts, voire opposés, qui sont soit la fertilisation (les fameux apports en N,P,K) au sens strict soit l'amendement supposé agir uniquement sur la structure : « *Protein-condensed tannin complexes appear to provide a direct route to C sequestration and SOM build up, but the slow initial N release from lignin- and tannin- rich residues is not compensated by an increased N supply later.* ». (Gaddish et Giller, 2001: p97)

Jean Duthil (1973) décrit ainsi les deux options qui s'offrent à l'agriculteur :

- soit on se contente d'un niveau d'humus stable relativement modeste et l'on exerce régulièrement des effets de stabilisation par des apports de matériaux frais et fermentescibles (engrais verts, résidus de cultures annuelles) ;

- soit on constitue un stock important de matières organiques stables grâce à des apports abondants de fumier ou à un repos du sol sous prairie temporaire. (Duthil, 1973)

Face à ce type de raisonnement, une remarque s'impose. Nous avons vu que la fertilité devait être envisagée sous un angle plus large et que, loin de se contenter d'apports réguliers en substances nutritives, elle dépendait aussi de la qualité des sols. Un sol riche en matière organique ne permet pas uniquement le maintien d'une bonne structure. S'il est vrai que les micro-organismes qui la composent captent une partie de l'azote qui devrait être disponible pour les plantes, cet élément minéral sera à nouveau disponible pour celles-ci de manière progressive grâce à la décomposition de la microfaune. L'humus joue également ce rôle libérant les éléments nutritifs lentement, assurant ainsi la capacité fertilisante du sol à long terme. Il n'est donc pas pertinent de considérer que les amendements qui assurent l'entretien des MOS n'ont qu'un impact réduit sur la fertilité.

Par contre, la situation actuelle nous montre bien que l'unique fertilisation même régulière des terres cultivées ne permet pas d'empêcher une baisse importante de leur teneur en matière organique. Les sources de matières organiques telles que les lisiers, fientes, engrais verts sont des matières trop labiles qui n'ont qu'un effet fugace : les matériaux incorporés, trop vite décomposés, sont perdus par lessivage et ne reconstituent pas la fraction d'humus qui continue quant à elle de se minéraliser à un taux de 2% par an. Si l'on souhaite agir à long terme sur les stocks stables de matière organique, il faut dès lors favoriser les apports de matières organiques plus stables qui sont les seules capables de relever de façon pérenne les taux de matières organique des sols (Le Villio *et al.*, 2001).

7.1.2. La caractérisation des matières organiques

L'apport exogène de matière organique se fait par épandage et parfois enfouissement sur les sols cultivés. Il est primordial de connaître les caractéristiques de ces produits et de prévoir l'évolution qu'ils vont subir dans le sol pour connaître les avantages agronomiques qu'ils apportent.

Les propriétés des matières organiques d'origines agricoles sont connues ne serait-ce que de façon empirique. Ce n'est pas le cas des autres amendements organiques qui sont d'origine et de nature beaucoup plus diverses.

Les indicateurs qui suivent sont régulièrement utilisés pour caractériser les différentes matières organiques.

◆ Le rapport C/N

Une manière de caractériser les matières organiques consiste à indiquer le rapport entre le carbone total et l'azote total qu'elles contiennent. Ce rapport est considéré comme essentiel pour prévoir la minéralisation nette de l'azote dans le sol (disponibilité de l'azote). C'est la raison pour laquelle la fameuse directive nitrate (91/676/CEE), dont l'objectif est de limiter la présence de quantités excessives de nitrates d'origine agricole dans les eaux de surface et souterraines, utilise cet indicateur pour réglementer les épandages des effluents d'élevage (distinction entre produits avec C/N inférieur ou supérieur à 8).

Le rapport C/N caractérise la proportion entre le carbone et l'azote d'un produit. On sait que les micro-organismes consommant des produits carbonés ont besoin d'azote pour synthétiser leurs propres protéines. Si le produit organique disponible n'est pas suffisamment riche en azote, les colonies microbiennes feront appel à l'azote qui est présent sous forme minérale dans le sol pour se développer. En revanche, si le produit organique attaqué est exagérément riche en azote, une partie de celui-ci sera libérée à l'état d'azote *minéral* et rejeté dans le sol. On considère en général qu'un équilibre approximatif est atteint quand ce rapport oscille entre 15 et 30 (bilan de l'azote suite à minéralisation équilibré). En dessous de 15 (par exemple le foin de luzerne), il y a un risque de perte et de lessivage de l'azote minéral, au-delà de 30 (par exemple la paille a un C/N > 30) la décomposition des produits provoque le blocage de l'azote rendu non disponible pour la croissance de la plante (Duthil, 1973).

Par conséquent, plus le rapport C/N est faible, plus les MOS agissent comme un engrais organique et ont un coefficient de transformation en humus très faible ou nul. A l'opposé, les matériaux avec un rapport C/N élevé, en particulier quand ils contiennent de la lignine, agissent comme un amendement et se transforment progressivement en humus.

Il semble cependant que l'indicateur C/N présente certaines limites et qu'il soit un facteur explicatif insuffisant dans le cas de certaines matières exogènes : « *C'est le cas par exemple d'une boue et d'un compost étudiés par Ambus et al ayant des rapports C/N comparables mais induisant des cinétiques de minéralisation différentes* » (Parnaudeau, 2005 : p34).

On reproche aussi au rapport C/N de ne donner une indication que sur les parts totales de carbone et d'azote. Or, l'influence sur le processus de minéralisation des différentes fractions qui les composent est très variable.

◆ **L'indice de stabilité biologique (ISB) et la Caractérisation Biochimique de la Matière organique (CBM)⁴¹**

⁴¹ Approches proposées par M. Linière et J.L. Djakovitch (1993) pour l'ISB et par D. Robin (1997) pour le CBM

Ces deux méthodes assez voisines ont été développées en France. Dans leur principe, elles consistent à identifier les différentes fractions de la matière organique par séparation biochimique et en déduire la résistance à la dégradation. Leur but est de déterminer si un produit organique se comportera plutôt comme un engrais ou plutôt comme un amendement organique.

L'ISB, calculé en fonction des différentes fractions biochimiques (matière organique soluble, hémicellulose, cellulose brute et lignine plus cutines), permet de distinguer les produits relativement labiles dans le sol des produits plus stables qui participeront à la reconstitution du stock humique du sol.

La méthode CBM permet de regrouper les différents produits organiques en 4 classes (Chaussod, 1999) :

- les produits riches en fractions solubles et azote total, facilement minéralisables (engrais organiques) ;
- les produits riches en fractions solubles et hémicelluloses (>45% de la matière organique), considérés comme produits à faible rendement en humus ;
- les produits riches en cellulose et lignine (>65% de la matière organique), considérés comme des amendements organiques « vrais » ;
- les produits à faible teneur en matière organique (matières minérales > 40% de la matière sèche), sans grande valeur organique mais pouvant avoir une valeur fertilisante.

◆ Cellulose et lignine

D'après Culot, la cellulose est souvent considérée, à tort, comme une bonne source d'humus. Celle-ci est en effet un vrai polymère de molécules de cellobiose, qui lui-même est une double molécule de glucose. De nombreux micro-organismes sont donc capables de la dégrader rapidement. Les glucoses résiduels qui sont assimilables par tous les organismes du sol ne contribuent que faiblement à la reconstitution de l'humus du sol.

En revanche, la lignine n'est pas un polymère. Elle possède des noyaux aromatiques et des structures complexes qui lui permettent de mieux résister aux attaques microbiennes. Ses résidus s'incorporent donc plus facilement à l'humus en reconstitution.

Les amendements à base de paille seraient donc moins efficaces que ceux à base de déchets ligneux.

◆ Indices K_1 et K_2

Ces coefficients d'humification et de destruction de la matière organique ont déjà été présentés dans le chapitre 3. Ils découlent d'observations expérimentales et permettent d'estimer la proportion qui résistera à la dégradation (définie par le coefficient K1) et la quantité de MO qu'il faudra ajouter pour maintenir le taux d'humus (en partant de l'hypothèse qu'il se dégrade à une vitesse qui correspond à K2). Par exemple, le coefficient isohumique (K1) du fumier de ferme est de 0,34 alors que celui des composts urbains est généralement proche de 0,25 (Le Villio *et al.*, 2001).

Ces coefficients, considérés comme constants, sont utiles mais doivent être utilisés avec précaution. Les observations menées *in situ* sont parfois fort différentes des prévisions en raison de tous les autres facteurs (voir chapitre 3) qui jouent sur la minéralisation des matières organiques.

7.1.3. L'innocuité pour l'environnement et la santé

L'épandage de matières organiques exogènes n'est pas dépourvu de risque. S'il est mal géré, il peut entraîner :

- la pollution des nappes phréatiques par des substances nutritives en surplus (nitrates et phosphates)
- la pollution des sols et des eaux, avec un risque pour la santé humaine et animale (par accumulation alimentaire), par certains éléments contenus dans les matières organiques apportées :
 - o substances pathogènes
 - o éléments-traces métalliques (ETM) contenus dans certaines matières organiques (phytotoxicité en cas de trop grande concentration (aluminium) ou éléments toxiques même en faible dose comme le mercure, l'arsenic et le cadmium)
 - o micropolluants organiques (MPO) tels que les pesticides, solvants, résidus médicamenteux.

Bien qu'elles présentent un grand potentiel de valorisation, les matières organiques exogènes nécessitent donc une attention particulière au niveau de leur **traitement** et de leur **utilisation** (OWD, 1999).

En ce qui concerne l'utilisation sur ou dans les sols des matières organiques, aucune réglementation spécifique n'existe actuellement. Cependant, leur épandage doit tenir compte des réglementations suivantes.

Nous avons mentionné plus haut la **directive nitrate**. Au niveau de la Région wallonne, cette directive a été transcrite dans un arrêté du Gouvernement wallon du 05 mai 1994 revu en février 2007 qui s'intègre dans le Code de l'Eau (livre II du Code de l'Environnement). Cette réglementation fixe aussi bien les quantités maximum d'azote qui peuvent être apportées (notion de liaison au sol) que les conditions d'épandage (périodes d'épandage, critères liés au type de sol, au climat et à la proximité de cours d'eau) (Dewez, 2002).

L'arrêté du Gouvernement wallon du 12 janvier 1995 régleme quant à lui l'utilisation sur ou dans les sols de boues d'épuration ou de boues issues des centres de traitement de gadoues de fosses sceptiques (OWD, 1999)

De plus, toute collectivité ou entreprise souhaitant valoriser un sous-produit en agriculture doit introduire un dossier de demande auprès de l'Office Wallon des Déchets. Ce dossier contient des informations concernant la quantité et la qualité des déchets.

En ce qui concerne le **prétraitement** des produits nous verrons dans la partie consacrée aux sources de MO qu'il varie en fonction des types de produit et de leur origine. Les progrès effectués dans ce domaine sont déjà importants et doivent être poursuivis. Deux stratégies peuvent être développées conjointement pour garantir des apports en MO dépourvus de tout polluant nuisible. La première consiste à procéder à des analyses répétées de plusieurs lots. La faiblesse de cette stratégie réside dans le fait que ces nombreuses analyses, dont le coût est non négligeable, ne garantissent pas que tous les produits épandus soient « propres ».

La seconde stratégie consiste plutôt à contrôler l'ensemble de la filière et non plus les produits seuls. Cette manière de procéder est déjà appliquée à l'industrie alimentaire où le **système d'analyse des dangers et de maîtrise des points critiques**, en abrégé système HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point), est devenu la norme (Wikipédia). Il s'agit ici d'identifier, pour la chaîne complète que suivent les MO (collecte, stockage, traitement, transport), tous les risques existant et de mettre en place les mesures qui s'imposent pour les maîtriser.

7.1.4. Des apports pour quels sols ?

Il est important de gérer les apports exogènes de matières organiques en fonction des caractéristiques des sols. Leur texture peut être particulièrement filtrante ce qui accroît le risque de pollution des nappes phréatiques. D'autre part, ils peuvent présenter des teneurs en métaux lourds spécialement élevées que ce soit à cause de leur proximité avec des activités industrielles polluantes ou tout simplement à cause de leur fond géochimique naturel.

La réglementation prévoit déjà que les terres situées à proximité de zones de captage fassent l'objet d'une attention toute particulière. L'adaptation des apports au type de sol passe en outre par une meilleure connaissance des caractéristiques des produits.

7.1.5. Question de la rentabilité

Nous n'aborderons pas dans ce travail la question de la rentabilité économique du recours aux matières organiques exogènes, ni celle des coûts liés à leur traitement (collecte, transport, stockage, transformation, contrôle) et à leur transport jusqu'à la zone d'épandage et d'enfouissement. La disponibilité à proximité de l'exploitation de matières organiques exogènes à un coût raisonnable est pourtant une variable essentielle. C'est en effet de celle-ci que dépendra en grande partie le fait qu'une source soit plus ou moins mobilisable et mobilisée.

7.2. Les sources de matières organiques biodégradables

Les sources de matières organiques biodégradables peuvent être classées en deux grandes catégories : celles qui sont issues du secteur agricole et celles qui ne le sont pas. Si les résidus d'origine agricole sont relativement bien connus et largement mobilisés, ce n'est pas encore le cas de ceux issus des sources extérieures à l'agriculture.

7.2.1. Les résidus d'origine agricole : source déjà exploitée

Les **apports par les végétaux** constituent la source la plus facilement mobilisable dans la mesure où elle est directement disponible sur le champ et ne nécessite pas ou peu de travail de transformation préalable avant son enfouissement. Ces apports proviennent des :

- résidus de culture perdus au cours de la végétation (feuilles)
- résidus de récolte (chaumes, pailles, verts)
- système racinaire des plantes
- plantes entières non récoltées et enfouies dans le sol (adventices, engrais verts, cultures pièges à nitrates)

Cependant, en termes de carbone, l'apport annuel est très variable et dépend des espèces considérées et des exportations réalisées (enlèvement des pailles). En moyenne pour les cultures annuelles, 1 à 2 t de C /ha sont ainsi restituées, les quantités pouvant atteindre plusieurs tonnes dans le cas de cultures pérennes et des prairies. Il faut en outre tenir compte de l'apport non négligeable des exsudats racinaires (5 à 15% du carbone photosynthétisé par les plantes). (Nicolardot, 1993)

Si la composition des résidus végétaux varie en fonction des espèces, la nature du carbone organique de ces résidus est par contre relativement bien connue. Les principaux composés rencontrés dans les végétaux sont (Nicolardot, 1993) :

- les produits solubles (sucres, polysaccharides, acides aminés, amino-sucres, acides organiques...) = généralement moins de 10% de la matière sèche des résidus
- les hémicelluloses (10 à 30%)
- les celluloses (15 à 60%)
- les lignines (5 à 30%)
- les protéines (2 à 15%)
- autres composés en quantités plus ou moins importantes (lipides, acides nucléiques, tannins, résines, polyphénols,...)

L'efficacité de ces apports végétaux à reconstituer la réserve de carbone organique dans le sol est donc assez variable.

Les **résidus d'origine animale** proviennent principalement des fumiers, lisiers et purins. Leur composition varie en fonction des espèces animales considérées, du type de litière ainsi que des conditions et de la durée de stockage (fumier frais ou composté). Dans les fumiers, on retrouve des composés organiques comparables à ceux rencontrés dans les matériaux de litières (cellulose, hémicellulose, lignine), des éléments minéraux ainsi que des composés plus ou moins évolués qui s'apparentent aux substances humiques. En revanche, la fraction organique est nettement inférieure pour les lisiers et les purins pour lesquels la fraction azotée se trouve essentiellement sous la forme ammoniacale.

Sans traitement préalable, l'épandage de ces derniers effluents ne présente pas non plus de grand avantage pour la reconstitution dans le sol d'une fraction organique stable. Il comporte en outre un certain risque environnemental lié aux fortes teneurs en azote uréique et ammoniacal (pollution des nappes phréatiques et émission de N_2O et de NH_4). Cette situation peut être améliorée en recourant soit au compostage de ces effluents, soit à leur biométhanisation.

Dans le cas du **compostage**, l'azote minéral en surplus est consommé par les micro-organismes. Des apports additionnels de déchets ligneux peuvent améliorer non seulement la structure et l'aération du compost, mais aussi la proportion de carbone / azote des matières compostées. Ce procédé permet en outre de supprimer une série de pathogènes (hygiénisation) qui peuvent subsister dans les matières fécales animales.

La **biométhanisation** est un procédé par lequel les effluents sont décomposés par des bactéries en condition anaérobie produisant d'une part du gaz naturel (méthane) et d'autre

part un résidu appelé digestat. La qualité de ce digestat dépend de la qualité des matériaux dont il provient mais aussi des techniques de biométhanisation. Les procédés thermophiles (> 55°C) sont plus efficaces pour atteindre le niveau d'hygiénisation requis. Au terme de la méthanisation bien menée, l'effluent est stabilisé, désodorisé et plus homogène. S'il reste trop riche en azote et en contaminants éventuels, il peut subir un dernier traitement par compostage avant épandage.

7.2.2. Les matériaux d'origine non agricole : source à mobiliser davantage

Les sources de matières organiques d'origine non agricoles sont constituées par (OWD, 1999) :

- les **résidus urbains** : fraction organique des déchets issus des ménages, des commerces et des collectivités faisant l'objet d'une collecte sélective ; déchets verts issus des activités des ménages, des communes et des entreprises de gestion de parcs et jardins et boues de stations d'épurations urbaines ;
- les **résidus des industries agroalimentaires**, qui sont composés de terres, écumes, mélasses, boues, levures, marcs, pulpes, déchets d'abattoirs, ainsi que ceux provenant du **secteur du papier et de l'exploitation forestière** (écorces, sciures,...).

Compte tenu des productions diverses, il est difficile d'établir une composition-type de ces matières organiques. La plupart du temps, il est nécessaire de conduire des études au cas par cas pour tenter de les caractériser et prévoir ainsi leur évolution après incorporation dans le sol. De façon générale, elles se composent de matière hydrocarbonée, d'eau, d'azote, de phosphore, de potassium mais elles peuvent également contenir des ETM et des MPO. Ce sont les matériaux à l'origine et aussi les traitements subis au cours des procédés de transformation qui déterminent la qualité de ces matières organiques. Si les déchets forestiers et de l'industrie du bois sont souvent très riche en lignine, la composition des résidus urbains est quant à elle fortement influencée par les traitements technologiques que subissent les déchets.

En ce qui concerne les résidus d'origine urbaine, de nombreuses études sont menées pour améliorer les connaissances sur le parti agronomique que l'on pourrait en tirer et sur les risques qu'ils représentent pour l'environnement et la santé humaine (Parnaudeau, 2005).

En France, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) encourage via son site les agriculteurs à recourir à l'épandage de **boues provenant des stations d'épuration d'eaux usées urbaines**. En Région wallonne, ce procédé rencontre encore certaines résistances. « *Depuis 1999, l'application sévère du principe de précaution*

exacerbé par la « crise de la dioxine » a eu pour effet de restreindre fortement les possibilités de valorisation agricole des déchets organiques, alors même que les quantités de ces déchets augmentent. Ainsi le taux de valorisation des boues de stations d'épuration est passé de 89% en 1997 à 42% en 2004. » (CEEW, 2007 : p 242). Pourtant les matières produites font l'objet d'un suivi qualitatif important qui garantit normalement leur innocuité pour la santé humaine et pour l'environnement.

Les boues sont chaulées avant leur épandage ce qui augmente leur pH et les stabilise en réduisant temporairement la mobilité des éléments traces métalliques. Ce traitement permet par ailleurs un apport en amendement calcaire qui est intéressant pour de nombreux agriculteurs.

La fraction fermentescible des déchets ménagers est traitée soit par compostage (environ un tiers des déchets organiques fermentescibles collectés en Région wallonne) soit par biométhanisation (11% de ces déchets) avec les mêmes avantages que ceux décrits pour les effluents d'élevages. La qualité des matériaux obtenus dépendra essentiellement de la qualité du tri et de celle du contrôle opéré lors des collectes, lesquels permettront de limiter la présence de métaux lourds et de matières inertes (plastiques, verres, cailloux) (CEEW, 2007).

Les composts de déchets verts. Les déchets verts des ménages, des entreprises de jardinage et des collectivités sont collectés principalement via le réseau de parcs à conteneurs ou via des collectes sélectives dans certaines communes. Parmi les différents types de composts, ceux issus de déchets verts présentent en principe la meilleure qualité, c'est pour cette raison qu'ils sont les seuls à être acceptés par les fabricants de terreau, en remplacement de la tourbe.

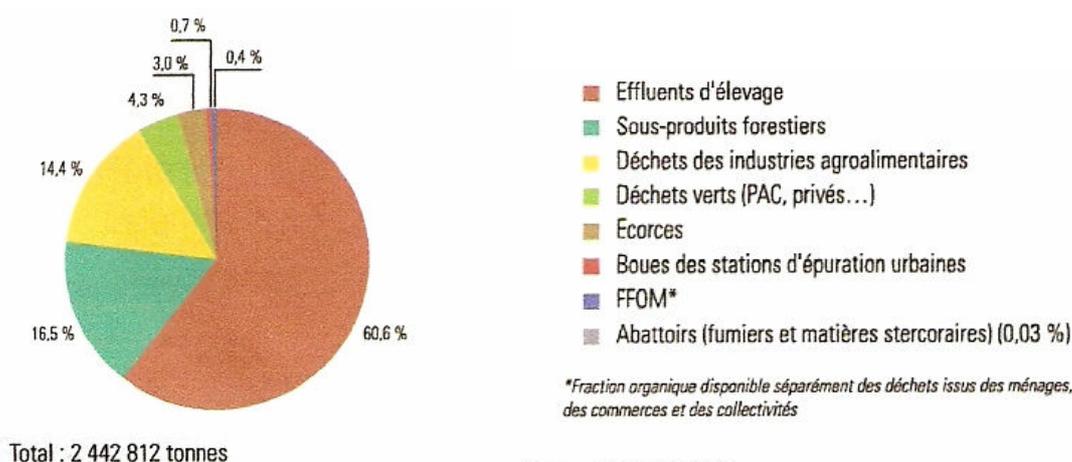
Le cas **des résidus de l'industrie agroalimentaire** est un peu particulier. Dans le cadre du respect des principes de gestion de déchets, le principe prioritaire est la prévention. Les industries tentent donc de réduire la part de ces résidus au maximum et ce, par le biais de « techniques plus propres » de production ou de recyclage interne. Les industriels préfèrent d'ailleurs parler de sous-produits plutôt que de déchets. Et nombre d'entre eux sont déjà réutilisés dans d'autres filières. Par exemple, les mélasses et les pulpes de sucreries, les drèches et les levures de brasseries et les résidus de pommes de terre sont utilisés comme aliments pour le bétail (OWD, 1999). La valorisation en agriculture représente cependant un débouché intéressant qui sera amené à se développer au fur et à mesure que leur élimination sera plus coûteuse et leur mise en décharge interdite (CEEW, 2007).

Le recours à ces sources non agricoles de matières organiques exogènes est encore sous-exploité en Région wallonne. Les résistances qui persistent au nom de la sécurité devraient peu à peu s'atténuer au fur et à mesure que les normes de qualité et de contrôle seront renforcées. Il s'agit également de responsabiliser les « producteurs » de MO et de lutter contre l'idée reçue selon laquelle les sous-produits d'origine agricole, d'origine industrielle et d'origine urbaine se feraient concurrence. En effet, la réalité des chiffres nous montre que cette inquiétude n'a pas lieu d'être.

7.2.3. Ressources limitées par rapport aux besoins

Le *Rapport analytique de l'environnement 2006-2007* mentionne une étude réalisée en 2005 qui montre que la production totale de matières organiques biodégradables est insuffisante pour couvrir les pertes de matières organiques des sols agricoles et des prairies en Région wallonne (CEEW, 2007). L'estimation des gisements considérés dans cette étude inclut l'ensemble des effluents d'élevages, les sous-produits forestiers, les déchets des industries agroalimentaires, les déchets verts, les écorces, les boues de stations d'épuration urbaine et la fraction organique des déchets fermentescibles des ménages. En tout, les 2,5 millions de tonnes de matières sèches produites par an (figure 19, in Van Wesemael et Brahy, 2006) ne parviendraient à combler que 22% à 45% des pertes d'humus annuelles par minéralisation (estimées ici à 1% ou 2% par an).

Figure 19 : estimation des gisements de matières organiques biodégradables en Région wallonne (année 2000)



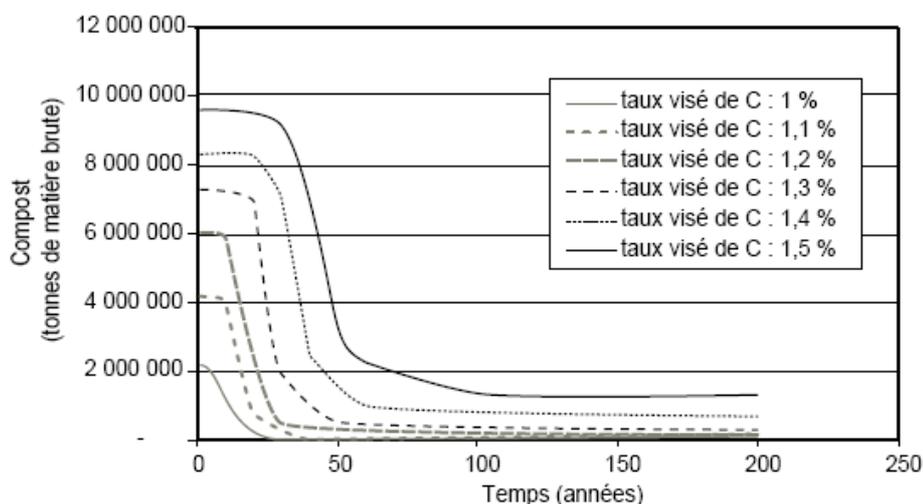
Source : FUSAGx-LEMEE

Dans le même ordre d'idées, Le Villio *et al.* publiaient en 2001 les résultats d'une étude menée sur le territoire français. L'objectif de celle-ci était de chiffrer la quantité de matière organique exogène qu'il serait nécessaire d'apporter pour relever puis entretenir les taux de matières organiques dans les sols qui étaient jugés les plus sensibles aux phénomènes de

battance (sols limoneux dont le taux de SOC est inférieur à 1.5, soit 17% des terres arables en France).

Les résultats montrent que la quantité de fumier actuellement disponible localement ne suffit pas à restaurer et entretenir les sols visés. Pour atteindre le seuil de teneur de 1,5% de COS, le recours aux matières organiques exogènes s'avère donc nécessaire. Et, selon leur estimation d'une production annuelle de composts d'origine urbaine d'un million de tonnes, il apparaît que ces apports seraient également insuffisants pour atteindre les objectifs de restauration. En revanche, ils seraient suffisants pour un entretien des sols après que leur taux de SOC se soit stabilisé à la hausse (figure 20, Le Villio et al., 2001 : p60).

Figure 20 : Estimation des quantités de compost nécessaires pour restaurer et entretenir les taux de matière organique des sols limoneux français sous aléa d'érosion important (en tonnes de matière brute) après épandage de tous les fumiers disponibles



Face à ce constat de ressources limitées, il convient d'établir des priorités notamment en concentrant les premiers traitements sur les sols carencés. Notons que, comme cela a été évoqué dans le chapitre précédent, ce sont également ces sols-là qui vont accumuler le carbone le plus vite. Il convient ensuite de veiller au maintien du taux existant dans les sols les moins dégradés.

Ce raisonnement qui relève du bon sens risque pourtant fort de souffrir de la concurrence d'une autre logique, qui consiste à valoriser ces sources de MO dans les différentes filières de production de bioénergie (énergie produite à base de biomasse). A ce sujet, la biométhanisation et l'élimination par incinération constituent deux manières de récupérer de l'énergie qui n'entrent pas vraiment en concurrence avec la volonté de rehausser les taux de matières organiques des sols :

- La **biométhanisation** est une option intéressante pour les résidus pauvres en cellulose et lignine qui se prêtent mal au compostage par leur manque de structure. De plus une

partie - certes moindre - de matière organique reste disponible pour l'épandage (digestats).

- L'**incinération** est une voie utile d'élimination des matières qui ne sont pas de qualité suffisante pour être valorisées par épandage.

La concurrence réelle provient de la volonté d'utiliser les produits et les sous-produits agricoles ainsi que les résidus organiques de qualité comme biocombustibles dans le but de réduire les émissions de CO₂ d'origine fossile. Il apparaît clairement, dans le chapitre consacré aux puits de carbone, que l'arbitrage entre pratiques agricoles conservatrices et production de biocarburants tourne souvent en la faveur de ce dernier.

7.2.4. Limites de l'agriculture non alimentaire ?

Depuis toujours, une part de la production agricole a été destinée à assurer d'autres besoins de la vie courante que l'alimentation (fibres textiles, lubrifiants, vernis et peintures, combustibles pour éclairage et chauffage, matériaux de construction,...). Mais ce n'est que depuis peu, que la valorisation de la biomasse pour la production d'énergie (biocarburants et biocombustibles) a bénéficié d'une attention toute particulière. Cette tendance est la suite logique de la prise de conscience écologique (changements climatiques) et des initiatives qui lui ont donné corps (Protocole de Kyoto), ainsi que de la volonté accrue de l'Europe de s'assurer une plus grande indépendance énergétique. La perspective de produire sur place de l'énergie, essentiellement alimentée par le soleil et l'eau, et offrant des débouchés nouveaux pour les produits agricoles est, en effet, bien séduisante (UN-Energy, 2007). A ce titre, la politique énergétique de l'Union européenne prévoit qu'au moins 10% de tous les carburants devront être des biocarburants pour l'année 2010. Dans le même ordre d'idées, la Région wallonne s'est fixé pour objectif de produire 0,9% de son électricité par des cultures énergétiques également pour l'horizon 2010 (Jossart, 1999).

Il faut toutefois rappeler que cette volonté de promouvoir la production de « bioénergie » s'inscrit dans un contexte bien particulier où l'on considère que les besoins alimentaires et fourragers sont largement satisfaits, en tout cas en Europe⁴². En effet depuis 1992, la politique agricole commune (PAC), a imposé un système de « jachère », justement pour lutter contre les problèmes de surproduction auxquelles l'Europe devait faire face (tensions sur le marché international, baisse des prix, coûts de stockage et de destruction des surplus). Depuis lors, 10% de la surface cultivable est « gelée » (aujourd'hui 3,8 millions d'hectares en Europe) ce qui signifie que cette partie ne peut pas être utilisée pour des productions à des fins alimentaires. (IP/07/1101, 2007) En revanche, pour éviter que ces terres non

⁴² Ce n'est évidemment pas le cas pour l'ensemble de la population mondiale.

utilisées restent nues et se dégradent, la culture de jachère énergétique (colza) y est autorisée.

L'actualité récente nous montre malheureusement que cette situation est en train de changer. En témoigne la multiplication par deux du prix des céréales au cours de ces 6 premiers mois de l'année. Cet évènement nous rappelle, premièrement, que la production agricole reste fortement tributaire des aléas climatiques et ce malgré les énormes progrès techniques accomplis, et, en second lieu, que le marché des matières premières agricoles, de par sa dimension mondiale subit un nombre important de pressions.

A ce sujet, Philippe Burny⁴³ explique la hausse du prix des céréales par une baisse de l'offre liée aux mauvaises conditions climatiques qui ont sévi dans des pays exportateurs (sécheresse en Australie). L'autre raison de cette hausse, et probablement la plus importante, est la pression accrue qui est exercée sur la demande.

D'après lui et d'après d'autres observateurs, la demande en céréales subit une évolution plutôt « structurelle », guidée essentiellement par deux phénomènes :

- la pression qu'exerce une politique européenne et mondiale de développement intensif des biocarburants (demande particulièrement forte aux États Unis de biocarburants fabriqués à base de blé ou de maïs) ;
- et par une croissance démographique qu'il faut combiner à une augmentation du niveau de vie dans certaines régions : « *la population mondiale augmente rapidement et connaît – ce qui est une bonne chose – une progression de son niveau de vie. Dans des pays comme la Chine, on se tourne aujourd'hui davantage vers la consommation de viande ou de lait. Or il faut des céréales pour nourrir ces animaux* »⁴⁴. Or, les stocks de céréales sont au plus bas depuis trente ans pour le maïs et douze ans pour le blé⁴⁵. Et les prévisions pour 2007-2008 sont aussi sombres : « *Sur le marché mondial, les stocks de clôture devraient tomber, en 2007/2008, à 111 millions tonnes, soit le niveau le plus bas observé depuis 28 ans* » (IP/07/1101, 2007)

Face à la flambée des cours, tous les outils de régulation du marché sont progressivement abandonnés. En effet, le 16 juillet 2007, Mariann Fischer Boel, Commissaire européenne à l'agriculture, annonçait, en Conseil européen des Ministres de l'agriculture, qu'elle souhaitait proposer la mise entre parenthèses de la jachère pour 2008 : « *Selon les estimations de la Commission, un taux de mise en jachère obligatoire de 0 % pourrait inciter les agriculteurs*

⁴³ Attaché scientifique au Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux.

⁴⁴ Interview de Philippe Burny dans la Libre Belgique, « Alimentation. Tension sur les prix. Un retour à la normale. » 9 août 2007, p2.

⁴⁵ T. Dromrad dans le Figaro, « Bruxelles va supprimer la jachère en 2008 », 18 juillet 2007

de l'Union européenne à produire une quantité supplémentaire de l'ordre de 10 à 17 millions de tonnes en 2008, ce qui permettrait de faire baisser la tension régnant sur le marché. » (IP/07/1101). A terme, la suppression définitive de la jachère est même envisagée et doit être étudiée dans le cadre du bilan de santé de la PAC, programmé pour 2008.

Quant aux stocks de beurre, ils ont également « fondu » et le lait n'échappe pas à la hausse des prix à un point tel que la suppression des quotas laitiers est évoquée : l'Europe ne produit plus assez de lait pour faire face à la demande⁴⁶. D'aucuns parlent d'une nouvelle révolution agricole avec un retour au devant de la scène d'une logique « productiviste »⁴⁷.

Si le recours à la bioénergie semble bien être un passage obligé dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques, il faudra tenir compte de cette nouvelle donne économique⁴⁸.

Les biocarburants de la seconde génération devraient en partie pallier à ces faiblesses : « *in the future, second generation technologies that rely on agricultural and forestry residues or other form of waste could significantly reduce land requirements for biofuel production.* » (UN-Energy, 2007, p44).

7.2.5. Pour une gestion intégrée des matières organiques exogènes

On voit bien que la valorisation des résidus organiques pour maintenir la santé des sols et l'utilisation de ces résidus pour la production d'énergie feront l'objet d'intenses débats. Plutôt que d'opposer ces deux projets, tout le défi réside dans la manière de les associer et de les rendre complémentaires.

Ceci passe par une gestion intégrée de l'entièreté de la filière déchets/sous-produits qui devrait favoriser les débouchés les plus avantageux sur le plan environnemental et sur le plan socio-économique. Cette gestion implique une concertation de l'ensemble des « producteurs » et des « utilisateurs » de MO. Elle nécessite aussi des connaissances plus étendues sur la qualité des différents matériaux et sur les traitements le plus appropriés pour les exploiter au mieux et en toute sécurité.

⁴⁶ T. Dromrad dans le Figaro, « L'Europe à la veille d'une révolution agricole », 18 juillet 2007

⁴⁷ *Ibid.*

⁴⁸ De plus, un rapport récent de l'Organisation des Nations Unies (ONU) rappelle qu'il convient de rester attentif aux problèmes aussi bien environnementaux que socio-économiques que pourraient engendrer la production de cette énergie : risque pour sécurité alimentaire mondiale, épuisement des ressources en eau causée par des plantes énergétiques très exigeantes, déséquilibre au sein du secteur agricole (disparition des petits exploitants), perte de biodiversité liée à l'exploitation de monocultures, érosion des sols, multiplication des intrants, déforestation et émissions nets de GES, lessivage des nutriments et polluants (UN-Energy, 2007).

7.2.6. Production de matières organiques exogènes, une piste pour l'avenir ?

Nous avons vu plus haut que les résidus riches en lignine présentaient un apport en matière organique stable particulièrement intéressant pour restaurer le bilan carbonique des sols. En même temps, la filière du bois est de plus en plus sollicitée pour la production d'énergie renouvelable. Ne pourrait-on pas profiter du développement nouveau de cette filière en exploitant ses sous-produits pour améliorer la teneur en MO des sols cultivés ?

A ce sujet, la culture de **taillis à très Courte Rotation (TtCR)** représente une piste intéressante à explorer.

Le TtCR est une culture d'arbres à croissance rapide dont on récolte les rejets de souche tous les 3-4 ans. Le but de cette culture est de produire des "chips" de bois qui seront soit brûlés soit gazéifiés pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité.

L'Unité d'écologie des prairies et des grandes cultures de l'Université Catholique de Louvain travaille actuellement sur deux projets de démonstration⁴⁹ de TtCR basés sur la culture du **saule** (Jossart, 1999). D'après les observations, le rendement de cette culture varie de 6 à 12 tonnes de matière sèche par hectare par an (selon l'âge de la plantation, la fertilité du sol, la conduite de la culture et le climat).

Ce rendement pourrait être qualifié de « modeste » en comparaison avec celui des cultures de céréales ou de maïs (froment : 10 tonnes de grain et 4 tonnes de paille par hectare, maïs : 14 à 16 tonnes de matière sèche par hectare). En revanche, il fournit un produit beaucoup plus riche en lignine.

Le bénéfice premier de cette culture du TtCR consiste bien entendu à procurer une source d'énergie renouvelable quasiment neutre en termes d'émissions de CO₂. On lui attribue en outre une série d'avantages environnementaux : le taillis agit comme une pompe à nitrates qui permet de diminuer sensiblement l'azote minéral dans le sol et ainsi le risque de lessivage d'azote en profondeur (protection des nappes phréatiques et des zones de captage d'eau souterraine) ; il permet de limiter l'érosion des sols ; il procure un biotope favorable à énormément d'animaux, dont les oiseaux (biodiversité) ; cultivé en bande, il forme une zone tampon entre les cultures traditionnelles annuelles et les zones d'intérêt biologique (cours d'eau, forêt,...) (Jossart, 1999).

⁴⁹ A Braine-l'Alleud (Brabant Wallon) et à Saint Bernard (Namur).

Un autre avantage mis en évidence par une étude menée au sein du département de biologie de l'Université d'Anvers est le fait que cette culture s'adapte bien dans des conditions de sols pauvres ou contaminés. Cette étude qui s'est étendue sur une période de 4 ans⁵⁰ (à partir de 1996) avait pour but d'observer les rendements de différentes espèces de **peupliers** plantés sur des terres qui étaient d'anciennes décharges (Laureysens *et al.*, 2003). Les espèces sélectionnées pour leurs meilleures performances⁵¹ ont permis d'atteindre un rendement de 11,4 à 14,3 tonnes de matière sèche par hectare et par an.

Des terres impropres à la culture alimentaire pourraient dès lors être exploitées pour fournir des matériaux riches en lignine dont la partie non valorisée pour la production d'énergie serait recyclée au sein de la filière des matières organiques réutilisées en agriculture.

⁵⁰ Dans la région de Boom (Province d'Anvers)

⁵¹ En particulier dans les conditions spécifiques de sol puisque ces arbres ont été plantés sur une ancienne décharge.

8. Conclusion

La présence de matières organiques en quantité et en qualité suffisante est indispensable au bon fonctionnement du sol. Grâce à leurs propriétés chimiques, physiques et biologiques, les MOS assurent la fertilité des terres agricoles. Les micro-organismes, les substances en décomposition et l'humus qui les composent structurent les sols et constituent la principale réserve en nutriments pour les plantes. Ces différentes fractions jouent également un rôle clef dans l'entretien de l'ensemble de l'agro-écosystème et de ses fonctions environnementales et socio-économiques.

Maintenir des stocks importants de matières organiques dans les sols agricoles est donc crucial si l'on souhaite qu'ils continuent à remplir ces différentes fonctions de manière durable. A ce titre les pratiques agricoles peuvent avoir une influence déterminante. L'exploitation intensive a bien souvent donné lieu à d'importantes dégradations des sols (érosions, tassements, pollutions) qui sont largement liées à la diminution de leur teneur en MOS.

A ce sujet, l'observation depuis quatre décennies des sols situés en Région wallonne révèle des pertes importantes de MOS surtout des les zones de grandes cultures (régions limoneuse et sablo-limoneuse). On considère en effet que la teneur en MO des sols cultivés a régressé de 16% entre 1960 et 2000. Et la majorité des sols situés au nord du sillon Sambre-et-Meuse présentent un risque important de voir leur teneur chuter en dessous du seuil de 2%.

La situation est encore plus inquiétante à l'échelle de l'Union Européenne (UE) où près de la moitié (environ 45%) des sols présente une teneur jugée faible, voire très faible, en carbone organique. Preuve que cette situation est spécialement préoccupante, la Commission Européenne a développé une « stratégie de protection de sols » pour lutter contre ce type de dégradation. L'avenir nous dira si cette stratégie portera ses fruits.

A l'inverse, on peut penser que cet état dégradé des stocks de MOS représente une opportunité dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques. En rétablissant ces stocks aux niveaux qui étaient les leurs avant que les terres soient cultivées, on pourrait piéger une quantité importante (selon les premières estimations de 60 à 70 méga tonnes par an pour l'UE) de dioxyde de carbone (CO₂). Pour ce faire, il faudrait adapter l'usage des sols et les pratiques agricoles afin de favoriser un meilleur bilan de MOS.

Mais cette idée-force de combiner gestion durable des sols cultivés et diminution de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère - grâce à des techniques inoffensives pour l'être

humain et l'environnement - se heurte à un certain nombre de limites et de difficultés dans la pratique. Il apparaît en effet que le recours aux sols cultivés comme puits de carbone n'offre qu'une solution limitée et temporaire. Les impacts environnementaux et économiques éventuels doivent également être mieux identifiés. Il semble en outre que la lourdeur de la procédure de vérification de l'efficacité de ces activités imposée dans le cadre du protocole de Kyoto ait découragé plus d'un pays à y recourir pour la comptabilisation de leurs flux nets de CO₂.

En réalité, il ressort de l'ensemble de la littérature scientifique et des différents rapports que les connaissances sur le sujet doivent encore être approfondies.

La dynamique des MOS est un processus complexe qui est encore mal connu et ce même si de nombreux chercheurs ont tenté de le modéliser. On sait que les caractéristiques biochimiques de matières organiques ont une influence prédominante sur les transformations qu'elles subissent dans le sol. Mais d'autres facteurs tels que le climat, la nature géologique du sol ou même le relief interviennent également. Pourtant prévoir l'évolution des MO est capital pour deux raisons. Il convient en effet de :

- Prévenir les dommages éventuels pour les autres écosystèmes que sont l'hydrosphère (problèmes d'eutrophisation et de pollutions diverses) et l'atmosphère (émissions de gaz à effet de serre) mais aussi pour le sol lui-même ainsi que pour les être humains (bioaccumulation).
- Assurer que les propriétés du sol soient maintenues à long terme.

Les apports en matières organiques exogènes constituent un bon outil pour lutter contre la dégradation des sols à partir du moment où ils répondent à ces deux exigences. Ils offrent en outre une voie de valorisation à la masse croissante de déchets que produit notre société. Mais, quelle que soit l'origine (agricole ou non) des engrais et amendements organiques, il est primordial que leur gestion et leur traitement fassent l'objet de contrôles qui garantissent leur innocuité. Pour ce faire, une politique intégrée doit prévoir des normes qui s'appliquent à l'ensemble des gisements (pas seulement les effluents d'élevage) en prévoyant l'ensemble des nuisances potentielles (pas seulement les nitrates).

Ceci devrait permettre de dépasser la méfiance qui existe encore à l'égard de certaines sources et ce, malgré le fait que les apports provenant de sources plus connues sont insuffisants pour combler les pertes de matières organiques des sols cultivés.

Or si, on ne cherche pas rapidement à remédier à ce problème, c'est, à terme, la fertilité même des sols qui sera menacée. On connaît mal aujourd'hui les conséquences d'une telle

situation, particulièrement dans un contexte où la pression sur la demande en produits agricoles connaît une forte croissance.

Les questions de la gestion raisonnée des matières organiques et de la séquestration du CO₂ dans les sols cultivés, celles du traitement et de l'utilisation des résidus organiques et de la production d'énergie verte doivent être envisagées conjointement. L'enjeu est de taille puisqu'il s'agit d'assurer durablement la sauvegarde de l'environnement et notre sécurité alimentaire.

Un nombre important d'aspects liés à ces problématiques n'ont pas pu être traités dans ce travail. Bon nombre d'entre eux mériteraient de faire l'objet de plus d'investigations, par exemples les aspects socio-économiques de la gestion des matières organiques exogènes.

Bibliographie

Livres

- DUTHIL J. (1973) *Elements d'écologie et d'agronomie*. Tome II, Editions J-B Baillière, Paris.
- GIRARD M-C., C. WALTER, J-C. REMY, J. BERTHELIN et J-L. MOREL (2005) *Sols et environnement*. Cours, exercices et études de cas. Dunod, Paris.
- GOBAT J.M. , M. ARAGNO, W. MATTHEY (1998) *Le Sol vivant. Bases de pédologie biologie des sols*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- LECLERC B. (2001) *Guide des Matières Organiques* Tome 1. Institut Technique des l'agriculture biologique, Paris.
- MAZOYER M et L, ROUDART (2002) *Histoire des agricultures du monde du néolithique à la crise contemporaine*, Editions du Seuil, Paris.
- MUSTIN M. (1987) *Le compost, gestion de la matière organique*. Editions François Dubusc, Paris.
- PIERZYNSKI G., J THOMAS SIMS et G. VANCE (2005) *Soils and Environmental Quality*. CRC Press, Boca Raton (USA).
- SOLTNER D. (1992) *Les bases de la production végétale*. Tome 1 : le sol. Collection Sciences et Techniques Agricoles, 19^e édition, Sainte Gemmes sur Loire.

Conventions

- PROTOCOLE DE KYOTO À LA CONVENTION-CADRE DES NATIONS UNIES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, FCCC/INFORMAL/83 . GE.05-61647 (F) 070605 090605. Nations Unies 1998
- CONFERENCE OF THE PARTIES (2002) Report of the Conference of the Parties on its seventh Session, held at Marrakesh from 29 october to 10 November 2001, FCCC/CP/2001/13/Add.1 21
- CONFERENCE DES PARTIES (2006) Rapport de la première session de la Conférence des Parties agissant comme réunion des parties au protocole de Kyoto tenue à Montréal du 28/11 au 10/12 2005, FCCC/KP/CMP/2005/8/add,3.

Rapports, plans d'action et communications

- ANDRE H. et E MAES (2006) "La fertilité et la biodiversité dans les sols (partie biodiversité)". In CEEW (2007) *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007*, Ministère de la Région wallonne, Direction Générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, Namur, pp 464-466.
- ARROUAYS D., J. BALESSENT, J.C. GERMON, P.A. JAYET, J.F. SOUSSANA et P. STENGEL (2002) *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* Expertise Scientifique Collective. Synthèse du rapport. INRA, 32p.
- BRAHY V. et S LOYEN (2006) "L'imperméabilisation et la compaction des sols". In CEEW (2007) *op.cit.*, pp 520-525.
- COLINET G., LAROCHE J., TOUSSAINT B. GOFFAUX M-J., MARTINEZ M., OGER R. (2005), *Base de données sols de REQUASUD*. 2^{ième} synthèse, 36p.
- GOOR F. (2006) "L'érosion hydrique des sols". In CEEW (2007) *op.cit.*, pp 476-485.
- GOOR F., B. PEREIRA et P. SONNET (2006) "La contamination diffuse des sols". In CEEW (2007) *op.cit.*, pp 486-499.

- CEEW (Cellule d'Etat de l'Environnement Wallon) (2005) "Stocks de carbone organique dans les sols". In *Tableau de bord de l'environnement wallon 2005*, Ministère de la Région wallonne (MRW), Direction Générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE). [Http://mrw.wallonie.be/dgrne/eew/](http://mrw.wallonie.be/dgrne/eew/)
- CEEW (2007) *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007*, MRW-DGRNE, Namur, 736p.
- COM (Commission des Communautés Européennes) (2006) *Stratégie thématique en faveur de la protection des sols*. Document accompagnant la communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions, Bruxelles. {COM(2006)231 final} {SEC(2006)620}, SEC(2006)1165
- COM (2006) *Stratégie thématique en faveur de la protection des sols* (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions, Bruxelles.
- EEA (European Environment Agency) (2006) *Greenhouse Gas Emission Trends and Projections in Europe 2006*.
- EEA (2007) *Annual European Community Greenhouse Gas Inventory 1990–2005 and inventory report 2007* Submission to the UNFCCC Secretariat Version 27 May 2007
- ECCP (European Climate Change Programme) (2001) *Mitigation Potential of Greenhouse Gases in the Agricultural Sector*. Working Group 7 – Agriculture - Final Report, 50p.
- ECCP (2001) Working Group Sinks Subgroup soils - Mandate (2001), 4p.
- ECCP (2003) Working Group on Sinks related to Agriculture Soils - Final Report, 76p.
- ECCP (2007) *Impacts and Adaptation - Agriculture and Forestry*. Working Group II Sectorial Report, 17p.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2000) *L'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie*. Rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Résumé à l'intention des décideurs, 30p.
- OWD (Office Wallon des Déchets) (1999) *Plan wallon des déchets* MRW-DGRNE, Namur. 612p. <http://environnement.wallonie.be/>
- Report by Belgium for the calculation of the assigned amount pursuant to Decision 13/CMP.1, December 2006
- ROBERT M. (2002) *La séquestration du carbone dans les sols pour une meilleure gestion des terres*. Rapport sur les ressources en sol du monde 96, FAO (Food and Agricultural Organization), 76p.
- SITEREM (2001) *Estimation des émissions dans l'air de CH₄, NH₃ et N₂O par le secteur agricole en région wallonne*. Rapport final demandé par le MRW-DGRNE, 59p.
- SOMBROEK W. (1997) *Changements du climat et production agricole*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome et Polytechnica, Paris, 1997.
- UN-Energy (2007) *Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Makers*. FAO (Food and Agricultural Organization) A1094/E, 61p. <http://www.fao.org/docrep/010/a1094e/a1094e00.htm>
- VAN WESEMAEL B. et V. BRAHY (2006) "La matière organique dans les sols." In CEEW (2007) *op.cit.*, pp 468-475.

Articles, dossiers scientifiques, comptes-rendus

- ARAH J. et J GAUNT (2001) "Questionable Assumptions in Current Soil Organic Matter Transformation Models", in REES R. B. BALL, C. CAMPBELL et C.WATSON (2001) *Sustainable Management of Soil Organic Matter*. CABI Publishing, Wallingford., pp 83-95.
- ARCA (Belgian Association in Research Application on Conservation Agriculture) (2002) Terres agricoles et matière organique. Compte-rendu de l'après-midi d'étude du mercredi 6 mars 2002. 18p.
- BAKER J.M., T.E. OSCHNER, R.T. VENTEREA et T.J. GRIFFIS (2006) *Tillage and soils carbon sequestration - what do we really know ?* Agriculture Ecosystems & Environment, pp 28-34.
- CARTER M. (2001) "Organic Matter Sustainability", in REES R. *et al.* (2001), *op. cit.*, pp 9-22.
- CHAUSSOD R. (1999) "Caractériser la Matière Organique : pourquoi et comment ? Commentaires sur I.S.B., C.B.M et K1". In *Echo MO* n°15, janvier février 1999, pp 3-4.
- CHENU C., M. ARIAS et E. BESNARD (2001) "The Influence of Cultivation on the Composition and Properties of Clay-Organic Matter Association in soils", in REES R. *et al.* (2001), *op. cit.*, pp 207-213.
- CHENU C. (2003) "Comment caractériser les matières organiques du sol ?" In *Les fertilités du sol et les systèmes de culture*. Edité par G Thevenet (COMIFER) et L. Faedy (GEMAS), 2003, pp 107-116.
- CRMOS (Comité de Recherche sur la Matière Organique du Sol) (1995) *Matière organiques dans le sol : conséquences agronomiques et environnementales*, I.R.S.I.A., Editeurs scientifiques: M. Geypens et J.P. Honnay, Editeur technique: L. Vanongeval, Bruxelles. 167p.
- DENDONCKER N., B. VAN WESEMAEL, M. D.A. ROUNSEVELL, C. ROELANDT et S. LETTENS (2003) "The potential for carbon sequestration through cropland management in Belgium." Société Belge de Science du sol – Comité National pour la Science du Sol, *Pedologie-Themata* 12, pp 17-20.
- GAUTRONNEAU Y (2003) "Comment observer le sol ? " In *Les fertilités du sol et les systèmes de culture*, *op.cit.*, pp 71-79.
- GENOT V. G. COLINET et L BOCK (2006) *La fertilité des sols agricoles et forestiers en Région wallonne*. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. Laboratoire de Géo pédologie, Unité sol-écologie-territoire, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, 73p.
- GOODLASS G., M. GREEN, B. HILTON et S. McDONOUGH (2007) "Nitrate leaching from short-rotation coppice". In *Soil Use and Management* 23 (2), pp 178-184.
- FALLOON P., P. SMITH, J. SZABO, L. PASZTOR, J. SMITH, K COLEMAN et S. MARSHALL (2001) "Soil Organic Matter Sustainability and Agricultural Management - Predictions at the Regional Level", in REES R. *et al.* (2001), *op. cit.*, pp 54-59.
- LAUREYSENS I., J. BOGAERT, R.BLUST et R.CEULEMENS (2003) "Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics". In *Forest Ecology and Management* 187 (2004), pp 295-309.
- LOVELAND P., J. WEBB et P. BELLAMY (2001) "Critical Levels of Soils Organic Matter: the Evidence for England and Wales", in REES R. *et al.* (2001), *op. cit.*, pp 23-33.
- LE VILLIO M., D. ARROUAYS, W. DESLAIS, J. DAROUSSIN, Y. LE BISSONNAIS et D. CLERGEOT (2001) "Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaire

- pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné" in *Etude et Gestion des Sols*, Volume 8, 1, 2001, pp 47-63.
- JONES S.K., R.M. REES, D. KOSMAS, B.C. BALL et U.M. SKIBA (2006) "Carbon sequestration in a temperate grassland; management and climatic controls." In *Soil Use and Management* 22, pp 132-142.
- JOSSART J.M. (1999), *Le Taillis à très Courte Rotation de saules (TtCR) Cultiver des saules, une alternative agricole*. Unité d'écologie des prairies et des grandes cultures. UCL/AGRO/BAPA/ECOP.
<http://www.ecop.ucl.ac.be/eco2/recherche/projets/biomasse/ttcr/index.htm>
- KRETZSCHMAR A. (1993) "Action sur la structure et le fonctionnement physique du sol". In *Mémento du producteur la matière organique*, Editions S.E.R.A.I.L. et l'Information Agricole du Rhône.
- KRULL E., J. SKJEMSTAD et J. BALDOCK (1999) "Functions of SOM and the Effect on Soil Properties". In *GRDC Project No CSO 00029: Residue Management, Soil Organic Carbon and Crop Performance*, 129p.
- LEMAIRE F. (1993) "Rôle de la matière organique dans l'alimentation minérale des plantes". In *Mémento du producteur la matière organique*, Editions S.E.R.A.I.L. et l'Information Agricole du Rhône.
- MESTDAGH I., S.SLEUTEL, P. LOOTENS, O. VAN CLEEMPUT et L. CARLIER (2005) "Soil organic carbon stocks in verges and urban areas of Flanders, Belgium". *Grass and Forage Science*, 60, pp 151-156.
- MESTDAGH I., P. LOOTENS, O. VAN CLEEMPUT et L. CARLIER (2004) "Soil organic carbon stocks in Flemish grasslands: how accurate are they ?". *Grass and Forage Science* 59, pp 310-317.
- MESTDAGH I., P. LOOTENS, L. CARLIER et O. VAN CLEEMPUT (2003) "The importance of grasslands for the realization of the Kyoto Protocol In Belgium". Société Belge de Science du sol – Comité National pour la Science du Sol, *Pedologie-Themata* 12, pp 11-15.
- MEYER-AURICH A., A. WEERSINK, K. JANOVICEK et B. DEEN (2006) "Cost efficient rotation and tillage options to sequester carbon and mitigate GHG emissions from agriculture in Eastern Canada". In *Agriculture and Environnement* 117, pp 119-127.
- MEYNARD J-M (2003) "Développement Durable et Agronomie. Les fertilités du sol et les systèmes de culture." Edité par G Thevenet (COMIFER) et L. Faedy (GEMAS), pp. 19-31
- NICOLARDOT B. (1993) "Les matières organiques et leur évolution dans le sol." In *Mémento du producteur la matière organique*, Editions S.E.R.A.I.L.et l'Information Agricole du Rhône.
- PAUSTIAN K. (2001) "Modelling Soil Organic Matter Dynamics - Global Challenges", in REES R. et al. (2001), *op. cit.*, pp 43-53.
- RAFFIN R. (1993) "Influence sur les propriétés et les fonctions du sol". In *Mémento du producteur la matière organique*, Editions S.E.R.A.I.L.et l'Information Agricole du Rhône.
- REES R., B. BALL, C. CAMPBELL et C.WATSON (2001) *Sustainable Management of Soil Organic Matter*. CABI Publishing, Wallingford.
- SCHWENKE G. (2007) "Organic Carbon and Farming Systems". In Coolah Grains Research Update. http://www.grdc.com.au/growers/res_upd/north/n07/schwenke.pdf
- SLEUTEL S., S. DE NEVE et G. HOFMAN (2003) "Carbon sequestration in Flemish cropland soils: potential of different management options." Société Belge de Science du sol – Comité National pour la Science du Sol, *Pedologie-Themata* 12, pp 5-9.

- SLEUTEL S., S. DE NEVE, B. SINGER et G. HOFMAN (2006) "Organic C levels in intensively managed arable soils – long-term regional trends and characterization of fractions". In *Soil Use and Management* 22, pp 188-196.
- SMITH P., R. MILNE, D.S. POWLSON, J.U. SMITH, P. FALLOON et K. COLEMAN (2000) "Revised estimates of the carbon mitigation potential of UK agricultural land." In *Soil Use and Management* 16, pp 293-295.
- SMITH P. (2004) "Carbon sequestration in croplands: potential in Europe and the global context." *European Journal of Agronomy* 20, pp 229-236.
- VANONGEVAL L., G. HENDRICKX et M. GEYPENS (1995) "Etat organique des terres agricoles en Belgique" in Comité de Recherche sur la Matière Organique du Sol (1995), op cit., pp 9-17.
- VAN WESEMAEL B. (2006) *La séquestration et les émissions de gaz à effet de serre provenant des écosystèmes terrestres en Région wallonne*. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. Département de Géographie, Faculté des Sciences, Université Catholique de Louvain, 18p.
- VERHAGEN J., R. SCHILS et P. KUIKMAN (2003) "Agricultural land and the Kyoto Protocol, with a focus on the Netherlands". Société Belge de Science du sol – Comité National pour la Science du Sol, *Pedologie-Themata* 12, pp 1-4.
- WARIN A., R. BERNAERDT, E. DELCARTE, P. MAESEN, J. NAUD, J.M. MARCOEN (2004) "Développement d'un système harmonisé de surveillance de la qualité des terres agricoles en Région wallonne anticipant la future directive européenne sur les sols. " In *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 8 (2), pp 69-82.

Thèses

- PARNAUDEAU V. (2005) *Caractéristiques biochimiques de produits organiques résiduaire, prédiction et modélisation de leur minéralisation dans les sols*. Thèse de doctorat non publiée, AgroCampus Rennes, 85p.
- SLEUTEL S. (2005) *Carbon sequestration in cropland soils: recent evolution and potential of alternative management options*. Thèse de doctorat non publiée, Université de Gand, 195p.

Presse

- IP/07/1101 (2007) « Mariann Fischer Boel propose de fixer à zéro le taux de mise en jachère obligatoire pour les semis de l'automne 2007 et du printemps 2008 ». Communiqué de presse de la Commission Européenne, Luxembourg, le 17 juillet 2007.
- DROMRAD T. (2007) "L'Europe à la veille d'une révolution agricole". *Le Figaro*, Paris le 18 juillet 2007.
- TOUSSAINT G. (2007) "Alimentation. Tension sur les prix. Un retour à la normale". *La Libre Belgique*, Bruxelles le 9 août 2007.

Rencontre

- Rencontre avec Monsieur Francis Goreux, agriculteur à Baraine-l'Alleud (Brabant wallon), le 10 juin 2007.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Coefficient annuel de destruction de la matière organique	14
Tableau 2 : Appréciation de la teneur en carbone de parcelles agricoles en fonction de la classe texturale.....	41
Tableau 3 : Distribution de fréquence de la teneur en carbone de parcelles agricoles en sept classes d'appréciation.....	42

Liste des figures

Figure 1 : Triangle des textures minérales	4
Figure 2: Les différents horizons d'un profil de sol	6
Figure 3: Les matières organiques sont un ensemble complexe de différents constituants organiques, en perpétuel renouvellement par incorporation et biodégradation	10
Figure 4 : Taux de biodégradation des composantes de la biomasse végétale dans les sols et litières. 15	
Figure 5 : Quantité des principaux types de produits organiques résiduels et filières majeures de recyclages et d'élimination en France en 2000	25
Figure 6 : Evolution du carbone dans l'expérience de Rothamsted-Highfield pour la conversion prairie-terre arable.....	28
Figure 7 : Evolution de la teneur en carbone organique après déforestation et mise en culture de maïs	29
Figure 8 : Historique et projection future de l'évolution des stocks de COS en combinaison avec l'utilisation de fertilisants.....	29
Figure 9 : Effet du labour conventionnel et du non-labour sur la teneur en matière organique dans le sol	31
Figure 10 : Evolution de la teneur en carbone dans les sols entre 1928 et 1991 avec ou sans fumier (site expérimental de l'INRA, Versailles «quarante deux parcelles»)	31
Figure 11 : la relation entre la stabilité des agrégats et la contenance en MOS pour 519 échantillons de sol provenant de l'ouest des États-Unis et du Canada.....	34
Figure 12 : Variation des stocks de carbone organique dans les sols en Région wallonne (entre 1960 et 2000).....	44
Figure 13 : Stocks de matière organique dans les sols en Région wallonne (sur une profondeur de 0 à 1 mètre), selon le type d'occupation du sol.....	45
Figure 14 : Evolution de la teneur en matière organique dans les sols (sur une profondeur de 30 cm) en Région wallonne entre 1960 et 2000	47
Figure 15 : Cycle global du carbone : flux principaux au niveau global.....	51
Figure 16 : le cycle du carbone en terre cultivée.....	53
Figure 17 : Evolutions du stock de carbone dans le sol associées aux pratiques provoquant les stockages (0,5 t C/ha/an durant les 20 premières années) ou les déstockages (1 t C/ha/an) extrêmes. 57	
Figure 18 : Evolution des flux de CO ₂ provenant des écosystèmes terrestres en Wallonie.....	64
Figure 19 : estimation des gisements de matières organiques biodégradables en Région wallonne (année 2000).....	77
Figure 20 : Estimation des quantités de compost nécessaires pour restaurer et entretenir les taux de matière organique des sols limoneux français sous aléa d'érosion important (en tonnes de matière brute) après épandage de tous les fumiers disponibles.....	78

Liste des cartes

Carte 1 : Région wallonne: régions naturelles et reliefs	7
Carte 2 : Région wallonne : occupation du sol	9
Carte 3 : Stocks de carbone organique dans les sols en Région wallonne (année 2000)	43
Carte 4 : Teneurs en matière organique dans les sols en Région wallonne (année 2000)	43
Carte 5 : Evolution des teneurs en matière organique dans les sols entre 1960 et 2000 (%)	47
Carte 6 : Risque d'atteindre moins de 2% de matière organique dans les sols dans les sols (2000) ...	48

Annexe I : GIEC, estimation des stocks globaux de carbone dans les terres cultivées

Tableau 1 : Stocks globaux de carbone dans les bassins de carbone que représentent la végétation et le sol jusqu'à une profondeur de 1 m

Biome	Surface (10 ⁹ ha)	Stocks de carbone (Gt C)		
		Végétation	Sol	Total
Forêt tropicale	1,76	212	216	428
Forêt tempérée	1,04	59	100	159
Forêt boréale	1,37	88	471	559
Savane tropicale	2,25	66	264	330
Prairie tempérée	1,25	9	295	304
Déserts et semi-déserts	4,55	8	191	199
Toundra	0,95	6	121	127
Zones humides	0,35	15	225	240
Terres cultivées	1,60	3	128	131
Total	15,12	466	2011	2477

Note : Des incertitudes considérables pèsent sur les chiffres fournis, en raison notamment de l'ambiguïté relative à la définition des biomes. Le tableau donne cependant une idée de l'importance des stocks de carbone dans les écosystèmes terrestres.

Annexe II : Europe des 15, potentiels des mesures visant à capturer le CO₂ dans les sols agricoles

Table 1 Most promising technical measures

	Technical measure	Sequestration Potential per unit area [t CO ₂ ha ⁻¹ y ⁻¹]	Potential in EU-15 during first commitment period ¹ [Mt CO ₂ y ⁻¹]	Environmental side effects	Impact on farm income
1	Promote organic input on arable land (crop residues, cover crops, farm yard manure, compost, sewage sludge)	1-3	20	Chemical fertiliser can be partly replaced, leading to reduced N ₂ O emission and reduced nitrate leaching. Accounting of additional nitrogen input is required to avoid nitrogen overdose and nitrate losses. Erosion control and reduced nitrate leaching under cover crops. Danger of contamination by heavy metals and other pollutants, as well as biosafety issues, are controlled under Community and national legislation. Reduced pathogen risk from composted material.	Positive long-term tendency due to better soil fertility. Easy implementation, but potentially higher costs due to transport and purchase of organic material and compost production. On-farm composting can provide an additional source of income. Capital and operational costs incurred by setting up a composting facility at farm level may be offset by (1) a fee for taking organic waste (2) income from selling compost (3) savings in fertiliser, water consumption, disease suppression.
2	Permanent revegetation of arable set-aside land (e.g. afforestation or extensive permanent pasture) or extensification of arable production by introduction of perennial components	2-7	15	Benefits for wildlife, biodiversity, amenity provided revegetation goes beyond Good Farming Practice	Regionally specific, positive only if linked to compensation payment for nature protection.
3	Biofuel production with short-rotation coppice plantations and perennial grasses	2-7	15	The benefit from substitution of fossil fuels by bioenergy is much greater than the effect from carbon sequestration.	Regionally specific, potentially positive if linked to subsidies or emerging markets
4	Promote organic farming	>0-2	14	Benefits for wildlife, biodiversity, landscape, but unclear whether there is a risk of higher N ₂ O emission from incorporation of legume residues. More research is needed here.	Potentially positive due to higher prices for organic products, and support under national RDPs for conversion to organic farming, and to some extent, organic production. Market share is growing.

					However, lower yields per ha, compared to conventional farming.
5	Promote permanently shallow water table in farmed peatland	5-15	15	Benefits for wildlife, biodiversity, amenity, water retention, reduced N ₂ O	Regionally specific, positive only if linked to compensation payment for nature protection. Some peatlands form the most productive agricultural areas in England.
6	Zero tillage or reduced tillage	>0-3	<9	In some regions a suitable instrument for erosion control and soil conservation. Soil structure improves under most conditions, but increased bulk density may lead to reduced rootability and infiltration in some cases. Zero and reduced tillage can lead to higher N ₂ O emission and more pesticide use, especially under wet soil conditions. Very small carbon sink in reduced tillage systems.	Site and region specific, possible increased production risks for farmer. Positive only if linked to good erosion control and better soil fertility. Lower labour requirements and operating costs (e.g. lower fuel consumption) have led to an adoption of conservation tillage in a number of large farms. Capital costs involved in investment in equipment for conversion from conventional tillage.

Annexe III : Protocole de Koto, article 3.3 et 3.4

Article 3.3

3. Les variations nettes des émissions de gaz à effet de serre par les sources et de l'absorption par les puits résultant d'activités humaines directement liées au changement d'affectation des terres et à la foresterie et limitées au boisement, au reboisement et au déboisement depuis 1990, variations qui correspondent à des variations vérifiables des stocks de carbone au cours de chaque période d'engagement, sont utilisées par les Parties visées à l'annexe I pour remplir leurs engagements prévus au présent article. Les émissions des gaz à effet de serre par les sources et l'absorption par les puits associées à ces activités sont notifiées de manière transparente et vérifiable et examinées conformément aux articles 7 et 8.

Article 3.4

4. Avant la première session de la Conférence des Parties agissant comme réunion des Parties au présent Protocole, chacune des Parties visées à l'annexe I fournit à l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique, pour examen, des données permettant de déterminer le niveau de ses stocks de carbone en 1990 et de procéder à une estimation des variations de ses stocks de carbone au cours des années suivantes. A sa première session, ou dès que possible par la suite, la Conférence des Parties agissant comme réunion des Parties au présent Protocole arrête les modalités, règles et lignes directrices à appliquer pour décider quelles activités anthropiques supplémentaires ayant un rapport avec les variations des émissions par les sources et de l'absorption par les puits des gaz à effet de serre dans les catégories constituées par les terres agricoles et le changement d'affectation des terres et la foresterie doivent être ajoutées aux quantités attribuées aux Parties visées à l'annexe I ou retranchées de ces quantités et pour savoir comment procéder à cet égard, compte tenu des incertitudes, de la nécessité de communiquer des données transparentes et vérifiables, du travail méthodologique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, des conseils fournis par l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique conformément à l'article 5 et des décisions de la Conférence des Parties. Cette décision vaut pour la deuxième période d'engagement et pour les périodes suivantes. Une Partie peut l'appliquer à ces activités anthropiques supplémentaires lors de la première période d'engagement pour autant que ces activités aient eu lieu depuis 1990.