



gembloux
faculté universitaire
des sciences agronomiques

Filières de valorisation agricole des matières organiques

Document réalisé à la demande du Cabinet du Ministre Benoît Lutgen

Juin 2005

Pr Marc CULOT

FUSAGx

Laboratoire d'Ecologie microbienne et d'Épuration des Eaux (LEMEE)

Avenue maréchal Juin, 27, Bâtiment 52

5030 GEMBLoux

TABLE DES MATIERES

<u>1</u>	<u>Enjeux en perspective</u>	6
<u>1.1</u>	<u>Généralités sur la société et ses déchets</u>	6
<u>1.2</u>	<u>Problématique générale de la dégradation des sols</u>	7
<u>2</u>	<u>Présentation des flux de matières organiques et des qualités correspondantes</u>	8
<u>2.1</u>	<u>Introduction</u>	8
<u>2.2</u>	<u>Analyse des gisements des matières organiques en Région wallonne</u>	8
<u>2.3</u>	<u>Description des matières organiques faisant l'objet d'une valorisation agricole en Région wallonne.</u>	10
<u>2.3.1</u>	<u>Les effluents d'élevages</u>	10
<u>2.3.2</u>	<u>Les digestats</u>	10
<u>2.3.3</u>	<u>Les boues des stations d'épuration d'eaux usées urbaines</u>	11
<u>2.3.4</u>	<u>Les composts</u>	12
<u>2.3.5</u>	<u>Conclusion</u>	12
<u>2.4</u>	<u>Risques sanitaires et autres nuisances liées aux boues</u>	13
<u>2.4.1</u>	<u>Position prise par les acteurs en France.</u>	13
<u>3</u>	<u>Intérêt de la valorisation des MO sur les sols.</u>	14
<u>3.1</u>	<u>La matière organique du sol</u>	14
<u>3.2</u>	<u>Effets de la matière organique sur la structure et sur les autres qualités du sol</u>	14
<u>3.3</u>	<u>Effets de la matière organique sur l'activité biologique du sol</u>	15
<u>3.4</u>	<u>Composition chimique de l'humus</u>	15
<u>3.5</u>	<u>La décomposition de l'humus</u>	17
<u>3.6</u>	<u>Décomposition de la matière organique.</u>	17
<u>3.7</u>	<u>La libération de l'azote.</u>	18
<u>3.8</u>	<u>Les besoins en matières organiques des sols</u>	19
<u>3.8.1</u>	<u>Plébiscite pour la matière organique et pour les composts :</u>	20
<u>3.8.2</u>	<u>Taux de liaison au sol de l'élevage.</u>	22
<u>3.8.3</u>	<u>Gestion des effluents d'élevage</u>	22
<u>3.8.4</u>	<u>Zones géographiques où la valorisation des composts sera limitée</u>	22
<u>3.9</u>	<u>Potentiel de valorisation hors agriculture</u>	24
<u>3.10</u>	<u>Rôle des apports des matières organiques dans le stockage de carbone dans le cadre des accords de Kyoto</u>	25
<u>4</u>	<u>Techniques de traitement : qualité et sécurité actuelle des filières</u>	27
<u>4.1</u>	<u>Compostage</u>	27
<u>4.1.1</u>	<u>L'aération</u>	27
<u>4.1.2</u>	<u>Porosité</u>	28
<u>4.1.3</u>	<u>Humidité</u>	28
<u>4.1.4</u>	<u>Température</u>	29
<u>4.1.5</u>	<u>Les paramètres physico-chimiques des matières à traiter</u>	29
<u>4.1.6</u>	<u>Les caractéristiques physiques des matières.</u>	29

4.1.7	Le rapport carbone/azote (C/N)	30
4.1.8	Résumé de la recherche d'informations sur les installations	30
4.1.9	Principes généraux du traitement par compostage	30
4.1.10	Description des mécanismes de contrôle des qualités de composts : proposition d'un label WALCO	33
4.1.11	Qualité des composts	34
4.1.12	Entreposage du compost	35
4.2	Biométhanisation	36
4.2.1	Généralités	36
4.2.2	Biométhanisation des ordures ménagères	37
4.2.3	La co-méthanisation centralisée	37
4.2.4	La méthanisation à la ferme	38
4.3	Installations de traitement des matières organiques en RW	39
4.4	Couverture des risques	41
4.5	Diagramme de choix de filières	42
5	Position des agriculteurs et des autres parties prenantes sur la valorisation agricole des déchets organiques	43
5.1	Protection des sols	43
5.1.1	Point de vue français sur la valorisation des boues des stations d'épuration 43	
5.1.2	Déchets des industries agroalimentaires	44
5.1.3	Gisements issus des dossiers de demande de certificats d'autorisation de valorisation de matières en agriculture (DGRNE, 2002)	45
5.2	Protection des eaux souterraines	46
5.2.1	Risques liés à l'azote excédentaire et facilement lessivable	46
5.2.2	Autres constats	47
6	Proposition d'améliorations des techniques de transformation des matières organiques	49
6.1	Nécessité d'une bonne connaissance des matières	49
6.2	Le compostage	49
6.3	Biométhanisation	51
6.3.1	Matières premières et relation producteur-traiteur	51
6.3.2	Absence d'air et prédisposition de la matière à une méthode de valorisation 52	
6.3.3	Besoin en énergie	52
6.3.4	Techniques de biométhanisation	53
7	Rôle potentiel des agriculteurs	55
8	Description des conditions impératives de qualité pour le futur et proposition de moyens pour les garantir	57
9	Conclusions	61
10	Recommandations	65
10.1	Distribution parcellaire des intrants	65

<u>10.2 Utilisation maximale des matières organiques</u>	65
<u>10.3 Au-delà de la directive "Nitrates"</u>	69
<u>10.4 Perception du monde agricole par la société civile</u>	70
<u>11 BIBLIOGRAPHIE</u>	72
<u>12 REMERCIEMENTS</u>	73

LISTE DES ABREVIATIONS

- C = carbone de la matière organique ou du CO₂
- CET = centre d'enfouissement technique
- C/N = rapport entre le carbone total et l'azote total ; ce rapport conditionne notamment la dégradation des matières et la vie biologique qui en dépend
- DPS = Division de la pollution de sols
- ETM = élément(s)-trace métallique(s)
- FEVIA = Fédération des entreprises de l'Industrie agro-alimentaire
- FFOM = fraction fermentescible des ordures ménagères
- LS = taux de liaison au sol
- MB = matière(s) brute(s), matières avec leur humidité habituelle
- MO = matière(s) organique(s)
- MPO = micro-polluant(s) organique(s)
- MS = matière sèche, matière débarrassée de son eau par dessiccation au four à 103 °C
- NDR = note du rédacteur, en incise dans un texte cité
- OMS = Organisation mondiale de la Santé
- OWD = Office Wallon des Déchets
- PAC = Parc à conteneur
- STEP = Station d'épuration
- SUBEL = Association des Sucriers belges
- UE = Union Européenne

1 Enjeux en perspective

Dans la problématique générale des déchets organiques, deux approches principales de la relation sol – matière organique doivent être considérées:

- la gestion responsable des ressources et déchets pour le long terme,
- la protection durable des sols pour le très long terme.

1.1 Généralités sur la société et ses déchets

La nature transforme les matières naturelles et ses « déchets » ne sont en fait que des intermédiaires dans le cycle de ces matières. L'homme est en principe intégré dans les processus naturels mais le rassemblement des humains, les besoins toujours croissants, facilités par le « progrès technique », ont engendré un flux concentré de déchets que l'homme, dans son point de vue habituellement anthropocentrique, a préféré mettre à distance de lui et de ses préoccupations quotidiennes.

Il a donc souhaité s'en débarrasser et pour cela, les a traités pour qu'ils ne lui apparaissent plus, soit en les jetant loin de lui, soit en les enterrant ou encore en les détruisant. Cette façon de procéder ne prend guère en compte les flux consommés de nos ressources et n'envisage donc pas les risques liés ni à l'épuisement de ces ressources, ni à ceux générés par les « solutions » de remplacement pour compenser ces pertes. La problématique s'est complexifiée avec l'apparition de déchets dangereux.

Mais vu globalement, combien d'années, de décennies, de siècles ... pourra-t-on poursuivre une exploitation de ressources limitées d'une part et, d'autre part, une accumulation de déchets non valorisés qui contiennent cependant des ressources utiles et non renouvelables?

Face à ces défis, trois objectifs doivent être envisagés:

- **Recycler au maximum les éléments minéraux provenant de nos sols et se retrouvant dans nos déchets éventuellement en limitant les échanges avec les pays limitrophes ou plus lointains, pour des raisons économiques mais aussi pour réduire le recours futur éventuel à des matières qui risquent d'être plus contaminées que les déchets actuels.**
- **Récupérer, au mieux, l'énergie et les matières de nos déchets en minimisant les effets sur l'environnement.**
- **Dans le futur, il semblerait judicieux d'adapter nos activités de manière à n'avoir principalement que des déchets gérables à long terme, c'est-à-dire en veillant à ce que les ressources précieuses utilisées soient récupérables dans les déchets d'une part, et que les matières contaminantes pour le long terme soient évitées.**

Les matières organiques recyclables devraient s'intégrer dans les principes généraux cités ci-dessus.

1.2 Problématique générale de la dégradation des sols

En France, le Cemagref (Centre d'Etude du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts) principal centre d'études et de recherche sur la problématique des boues et déchets annonce :

« Les activités agricoles en lien avec les techniques de travail du sol, l'usage des fertilisants et des produits phytosanitaires, peuvent conduire en cas d'excès à la dégradation des sols et à l'entraînement des nitrates, phosphates et phytosanitaires vers les milieux aquatiques. L'eau, l'air et les produits alimentaires peuvent être contaminés. A côté des préjudices possibles en matière d'usage de l'eau, on souligne les incidences sur la qualité environnementale des milieux. Dans ce contexte, où l'opinion publique exerce par ailleurs une pression croissante, le monde agricole est confronté à de nouvelles contraintes. Elles l'incitent à poser les bases d'une agriculture durable et à proposer de nouveaux modes d'intervention sur les agrosystèmes. »

L'extrait suivant provient d'un doctorat français récent (Abiven, 2004) qui intègre implicitement les résultats et conclusions de dizaines de travaux internationaux de ces dernières années sur ce sujet, ce qui donne du poids à ces idées.

« La dégradation de la qualité physique des sols est un problème couramment rencontré dans les agrosystèmes, comme par exemple dans le cas des systèmes de culture légumiers de plein champ en Bretagne. L'altération de la structure du sol pose à la fois des problèmes d'ordre agronomique (circulation de l'eau et des gaz, levée des plantules, propagation des agents pathogènes) et environnementaux (érosion et ruissellement de surface). **Une méthode possible de remédiation et d'amélioration des situations dégradées est d'utiliser des produits organiques comme amendements.** »

« ...L'ensemble de ces éléments de modélisation valide l'hypothèse générale de cette étude dans son domaine de définition et à l'échelle de l'année culturale : « **L'effet de l'apport de produits organiques sur la stabilité structurale est d'autant plus important que les propriétés initiales du produit favorisent l'activité biologique** ». »

« En revanche, nous avons observé que les produits présentant une activité biologique importante amélioreraient aussi d'autres propriétés physiques, biologiques et chimiques du sol. »

On peut sortir de cet extrait 3 idées fondamentales pour la suite :

- La dégradation de la qualité des sols est très répandue, et risque de s'accroître en gravité et de s'étendre.
- Les apports de matières organiques peuvent y remédier.
- Les activités biologiques sont très importantes pour la qualité des sols.

De nombreuses autres références scientifiques internationales fiables viennent corroborer ces arguments assez récents. Tous les scientifiques et acteurs n'ont pas encore rejoint ces positions qui rassemblent cependant de plus en plus de convaincus. **On peut croire qu'une connaissance meilleure des phénomènes fondamentaux, de la complexité globale des mécanismes biologiques, chimiques, physico-chimiques et physiques interdépendants, rassemblera les points de vue opposés dans un large consensus.**

2 Présentation des flux de matières organiques et des qualités correspondantes

2.1 Introduction

Les résultats présentés ici sont ceux d'une prospection en 2001 dans le cadre de l'étude DGRNE (DGRNE, 2002). Les principaux objectifs de cette phase de l'étude consistaient, d'une part, à quantifier, caractériser et cartographier les gisements de matières organiques biodégradables en Région wallonne ainsi que d'évaluer leur évolution à l'horizon 2010. D'autre part, les filières actuelles de gestion de la matière organique, en ce inclus la collecte, le pré-traitement et le traitement par compostage ou biométhanisation ont été inventoriées, localisées et caractérisées. Les principales conclusions inhérentes à cette partie de l'étude sont synthétisées ci-dessous.

2.2 Analyse des gisements des matières organiques en Région wallonne

Les données du tableau 1 sont essentiellement des estimations généralement basées sur des hypothèses faute de précision des sources d'informations exploitées.

L'état des lieux en matière de gisements des matières organiques biodégradables en Région wallonne a été basé sur l'année 2000 et relève d'informations collectées auprès des intercommunales, de communes, d'ASBL, de bureaux d'études, de fédérations d'industries et de l'Administration wallonne.

L'inventaire a ainsi principalement porté sur un ensemble de quatre groupes de matières organiques biodégradables :

- la fraction organique, *disponible séparément (FFOM)*, des déchets issus des ménages, des commerces et des collectivités, quand cette collecte séparée est réalisée ;
- les déchets verts issus des activités des ménages, des communes et des entreprises de gestion des parcs et jardins ;
- les boues de stations d'épuration urbaines ;
- les déchets organiques industriels tels que ceux provenant des industries agroalimentaires, textiles, du bois, etc.

Filières de valorisation agricole des matières organiques

Tableau 1 : Synthèse des gisements de matières organiques en RW (DGRNE, 2002)

	Quantité (t de MB)	Quantité (t de MS)	%MS estimé	Quantité (ts de MB) Prévision 2010	Quantité MS Prévision 2010
Année de référence	2000	2000			
FFOM collecte sélective	3 722	986	26	100 000	26 480
FFOM triée	37 200	9 850	26		0
Déchets verts des PAC	162 138	87 311	54	215 000	115 777
Déchets verts (comm. et privés)	31 846	17 267	54	33 444	18 133
Boues de STEP urbaines	91 000	18 228	20	232 000	46 471
Sous-produits forestiers	1 000 000	402 786	40	1 000 000	402 786
Déchets des industries agro-alimentaires	773 518	352 010	46	773 518	352 010
Abattoirs fumiers	1 772	354	20	1 772	354
Abattoirs matières stercoraires	2 260	339	15	2 260	339
Ecorces	148 800	74 400	50	148 800	74 400
Total sans effluents élevages	2 252 256	965.531		2 506 794	1 036 752
Effluents d'élevages	9 861 873	1 479 281	15	9 861 873	1 479 281
TOTAL DES MO	12 114 129	2 444 812		12 368 667	2 516 033

Il ressort de ce tableau que les effluents d'élevages représentent la grande majorité, soit 80 % des déchets bruts et 59 % des matières sèches des déchets totaux dans les prévisions de 2010.

Il sera montré plus loin que non seulement ces matières ne se font pas concurrence, mais qu'au contraire, elles sont judicieusement complémentaires et, toutes ensemble, ne sont pas suffisantes pour combler les pertes annuelles en matières organiques en Région Wallonne. Du point de vue de l'azote, il y a aussi place globalement pour l'ensemble de ces matières.

2.3 Description des matières organiques faisant l'objet d'une valorisation agricole en Région wallonne.

2.3.1 Les effluents d'élevages

Il s'avère que les effluents d'élevages représentent les matières les plus abondantes. Ils sont généralement épandus tels quels, sous forme de fumier, lisier ou purin. Néanmoins, suite aux concentrations importantes en azote uréique et ammoniacal (formes de l'azote facilement oxydées en nitrites puis en nitrates, très lessivables), il apparaît des risques de pollutions des nappes par les nitrates et de dégagements de mauvaises odeurs. Ces derniers peuvent être réduits par un traitement de compostage surtout car l'azote minéral sera majoritairement utilisé par les micro-organismes qui se développent sur les matières. Il faut noter que le compostage peut utilement être réalisé en combinaison avec des déchets ligneux afin d'améliorer la structure, la tenue et l'aération des tas ainsi que le rapport carbone/azote des matières à composter. Au niveau environnemental, l'azote présent dans un compost mûr sera alors moins disponible, ce qui limite les pertes par percolation, ruissellement et volatilisation. Dans le sol, la libération de l'azote aura lieu progressivement suivant la vitesse de minéralisation de la matière organique. La minéralisation de l'azote à partir de la matière organique nécessite un processus biologique tandis que le lessivage d'azote nitrique n'est dépendant que de la quantité d'eau qui percole.

Les aspects sanitaires ne sont pas à négliger. En effet, de nombreux pathogènes peuvent subsister longtemps dans les matières fécales animales. Même si les accidents sont rares, les risques ne sont pas négligeables et il est très probable que, sous la pression de l'Union Européenne dans le futur, une hygiénisation de ces matières sera exigée. Le compostage bien mené peut parfaitement convenir à cet effet.

2.3.2 Les digestats

Les deux effets principaux de la biométhanisation sont d'une part, de réduire la teneur en matière organique en produisant du méthane et d'autre part, en conséquence, de transformer une fraction plus ou moins importante de l'azote provenant de cette matière organique en azote minéral. Le processus de méthanisation produit un résidu appelé « digestat » dont la qualité est influencée fortement par la matière première mais aussi par le procédé utilisé. Une proportion importante de matières fortement biodégradables dans la matière initiale, une longue période de rétention dans le digesteur et une digestion thermophile peuvent conduire à d'importantes modifications de la teneur en éléments nutritifs du digestat. Les ETM et de nombreux MPO ne seront pas éliminés par ce procédé.

Digestats issus de la biométhanisation des déchets ménagers :

Le risque le plus important est en matière de métaux lourds. Les teneurs dans ce type de résidus ont été considérablement réduites ces dernières années suite au développement des stratégies de collecte préconisant la séparation à la source des déchets, surtout les plus polluants. De plus, la contamination par des matières inertes (plastiques, métaux, verres, cailloux,...) devrait être minimisée par une sensibilisation du public et par une stratégie de contrôle qualitatif des collectes. Les digestats devront présenter une bonne stabilité, signe d'un traitement efficace ainsi qu'une qualité hygiénique acceptable, sachant que la biométhanisation mésophile (30 à 40 °C) est bien moins efficace pour la destruction des pathogènes que le procédé en thermophilie (>55 °C).

Biométhanisation des effluents d'élevages :

Seulement quelques installations de biométhanisation de ces déchets existent en Région Wallonne, mais il y a un engouement latent pour de nombreux acteurs à se lancer dans cette voie. Le frein semble être le manque de rentabilité globale sauf si une aide via les certificats verts est garantie, ce qui représenterait en fait un appui du public à une filière naturellement peu rentable.

Les déchets animaux ont déjà subi un processus de méthanisation plus ou moins important dans le système digestif. Une bonne partie du carbone initial des aliments a été utilisé mais moins que l'azote qu'ils contenaient. Les matières fécales sont donc plus riches en azote que les aliments de départ et la nature du carbone est plus difficile à dégrader que dans les aliments. Le processus de biométhanisation affecte essentiellement la forme et donc la disponibilité de l'azote contenu dans l'effluent, mais n'influence apparemment pas la disponibilité des autres substances nutritives.

Au terme de la méthanisation bien menée, l'effluent est stabilisé, donc désodorisé et plus homogène. Cependant des risques de pollution non négligeables subsistent suite à la grande disponibilité de l'azote et aux contaminants éventuels de la matière. Il est donc recommandé de s'assurer de la qualité du digestat final et de prendre toutes les précautions lors de l'épandage sur les sols. Un compostage des digestats est en principe recommandé pour mieux stabiliser le produit et rééquilibrer le rapport C/N pour réduire les pertes en azote par volatilisation et percolation.

2.3.3 Les boues des stations d'épuration d'eaux usées urbaines

Ces boues proviennent des décanteurs primaires et des clarificateurs des stations d'épuration. Leur niveau de déshydratation varie fortement, une fourchette indicative de 2 à 10 % de matière sèche pour les boues liquides et 15 à 40 % pour les boues déshydratées peut être citée. Ces boues sont souvent chaulées avant d'être appliquées à l'aide d'un épandeur à lisier ou d'un épandeur à plateau, en fonction de leur état, respectivement liquide ou solide. Le chaulage, en augmentant le pH, stabilise les boues en les hygiénisant (si pH > 11), réduit **temporairement** la mobilité des ETM (car les micro-organismes du sol peuvent les redispensibiliser facilement), et apporte un amendement calcaire aux sols intéressants pour de nombreux agriculteurs.

Les matières produites font l'objet d'un suivi qualitatif intensif. La situation en 2000 permettait déjà de mettre en évidence la bonne qualité d'une grande majorité des boues (DPS, DGRNE) et une certaine corrélation entre la taille de la station et la concentration en polluants. Il semble que les stations importantes aient la capacité de mieux résister à une introduction accidentelle de polluants. Le choix des filières de traitement et de valorisation reste associé aux plans stratégiques d'investissement des intercommunales. Il serait pourtant regrettable que des matières organiques fortement contrôlées et respectant les normes strictes du projet d'arrêté se voient encore souvent finalement destinées à l'incinération.

2.3.4 Les composts

2.3.4.1 Les composts urbains issus du tri des ordures brutes :

La production de ce type de compost est actuellement en voie d'extinction étant donné les contaminations qui se produisent par contact avec les autres déchets. Les centres de tri de Tenneville et Habay de l'intercommunale IDELux terminent en fin 2005 la production de ces composts pour une conversion complète vers les composts issus de la collecte sélective des déchets ménagers. Le centre de compostage de Havré, de l'Intercommunale ITRADEC restera le seul à fournir encore ce type de produit obtenu après aération du digestat de biométhanisation.

2.3.4.2 Compost urbain issu des collectes sélectives :

Lorsque les matières organiques sont collectées sélectivement, la contamination avec des matières étrangères est beaucoup plus limitée et le compost est de qualité supérieure. Le cas d'Idelux illustre bien ce qu'il est possible d'obtenir en qualité, puisque leur compost de FFOM répond globalement aux critères qualitatifs des composts.

2.3.4.3 Compost de déchets verts :

Ils sont issus des déchets végétaux apportés par les particuliers dans les parcs à conteneurs. Si globalement ce gisement est de bonne qualité, celle-ci peut varier en fonction de la manière dont les parcs sont gérés, certains étant plus performants que d'autres, ce qui se ressent dans la propreté des matières récoltées.

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. Néanmoins, des cas particuliers posent des problèmes de contamination par des ETM, le plus souvent dus à des contaminations « naturelles » provenant du fond géopédologique particulier, lui-même naturel ou résultant d'activités humaines anciennes perturbantes pour la région visée.

2.3.5 Conclusion

On peut donc trouver des matières de belle qualité parmi toutes celles citées dans le tableau 1, d'autres mériteraient une réflexion sur la continuité de leur gestion ; mais de toutes façons une procédure de maîtrise des risques doit être mise en place pour chaque type de déchets et des analyses doivent assurer que les bonnes stratégies sont appliquées, afin que seules les matières de qualité soient effectivement valorisées sur les sols.

2.4 Risques sanitaires et autres nuisances liées aux boues

2.4.1 Position prise par les acteurs en France.

« Depuis trente ans, il n'a jamais été observé d'accidents liés à l'utilisation raisonnée des matières fertilisantes recyclées (NDR : sont visées ici essentiellement les boues d'épuration). L'Ademe et l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon animent une cellule de veille sanitaire vétérinaire qui recense les accidents éventuels et éditent un rapport annuel à ce sujet.

Un audit environnemental des filières d'élimination des matières fertilisantes issues des stations d'épuration urbaines, commandité par les Agences de l'Eau, a permis de comparer le recyclage agricole avec l'incinération et l'enfouissement.

Ce travail a mis en évidence que, dans la plupart des cas, le recyclage agricole constitue la meilleure solution, tant du point de vue environnemental que du point de vue économique. Par ailleurs, les normes draconiennes fixées par la réglementation en vigueur, permettent de garantir l'innocuité des épandages.

Les matières fertilisantes recyclées sont riches en matières organiques, dont la fermentation anaérobie est à l'origine d'odeurs. Ces dégagements d'odeurs peuvent être limités par le biais d'une stabilisation biologique, d'un compostage, d'un séchage thermique ou d'une stabilisation chimique (chaulage). Un enfouissement rapide, après les épandages, permet également de réduire sensiblement les nuisances olfactives.

De nombreuses expérimentations démontrent que le transfert d'éléments traces des sols vers les végétaux est quasi inexistant. Afin d'éviter tout risque lié au phénomène d'accumulation, les flux d'éléments traces susceptibles d'être épandus, de même que leur teneur dans les sols agricoles, ont été réglementés. »

La position française est très globalement rassurante comme dans de très nombreux autres pays du monde, ce qui ne veut pas dire qu'il n'y a pas de risque, et pour le futur, une hygiénisation des boues et des déchets d'élevages est recommandée.

La Suisse se veut pionnière dans le principe de précaution en interdisant la valorisation agricole des boues de stations d'épuration et pas les autres déchets organiques, essentiellement à cause des ETM mais aussi des MPO. Les arguments habituellement cités sont la peur de la pollution irréversible et l'opinion publique très sensible. Ces arguments envisagent en principe l'aspect durable dans la protection de l'environnement, mais ne donnent pas de solutions sur la gestion future des ressources si l'on n'utilise pas les boues en agriculture, et ne tiennent pas compte des apports de polluants par les substituts nécessaires (autres matières fertilisantes).

3 Intérêt de la valorisation des MO sur les sols

Les passages du texte en petits caractères des § 3.1 à 3.7 sont tirés d'un ouvrage américain qui présente une synthèse du sujet (TROEH F.R. & THOMPSON L.M., 1993).

3.1 La matière organique du sol

« Il y a une grande variabilité dans la nature des matières organiques animales et/ou végétales incorporées dans le sol alors que l'humus est étonnement semblable dans les différents sols.

Les composés organiques facilement dégradés sont rapidement utilisés par les microorganismes ou les plantes et disparaissent s'ils ne sont pas renouvelés de temps en temps. Les composés plus résistants sont transformés par les microorganismes mais ils persistent plus longtemps en tant qu'élément de l'humus du sol. »

3.2 Effets de la matière organique sur la structure et sur les autres qualités du sol

1) Amélioration de la structure des sols par augmentation des agrégats et des espaces vides, avec pour conséquences directes :

Réduction importante du glaçage et de l'érosion ;

Meilleure porosité à l'air et à l'eau ;

Effet isolant de la matière organique si les sols sont bien drainés ;

Meilleure rétention de l'eau en limitant les remontées capillaires ce qui réduit les problèmes de sécheresse, tout en favorisant une meilleure percolation (rôle d'éponge) ;

2) Effets sur les caractéristiques chimiques et physico-chimiques :

Augmentation du pouvoir tampon autour de la neutralité ;

Augmentation de la capacité d'échange entraînant donc une meilleure régulation du stockage et de la fourniture des éléments nutritifs ;

Effet isolant de la matière organique si les sols sont bien drainés.

Limitation des blocages et des rétrogradations des éléments nutritifs ;

Meilleure rétention de l'eau qui réduit les problèmes de sécheresse, tout en favorisant une meilleure percolation (rôle d'éponge).

3) Effets sur la biologie des sols :

Augmentation de l'activité des microorganismes ;

Augmentation de l'activité de la rhizosphère et de ses effets positifs sur la nutrition des racines ;

Meilleur développement racinaire.

Inhibition de nombreux phytopathogènes (= effets supprimeurs) ;

Destruction plus rapide des molécules polluantes comme les pesticides, hydrocarbures et des molécules considérées comme très stables (PCB, HAP...) ;

4) Augmentation de la MS des plantes :

Meilleur développement racinaire et, par conséquent, des plantes entières.

3.3 Effets de la matière organique sur l'activité biologique du sol

« La matière organique du sol sert de source d'énergie aux microorganismes du sol qui, en la transformant (c'est-à-dire en la décomposant), libèrent des éléments nutritifs et du CO₂ nécessaires à la croissance des plantes. Celles-ci retournent au sol la matière organique sous forme de résidus culturaux, de feuilles, de racines mortes et le cycle est bouclé.

Le sol contient 2-3 kg/m² de biomasse. L'activité biologique de cette biomasse participe à des phénomènes tels que la structure du sol et sa porosité, la perméabilité du sol, la lutte contre le lessivage des éléments nutritifs ou l'érosion voire encore la disponibilité de certains éléments nutritifs comme le P ou le K.

Le facteur limitant le plus souvent l'activité microbienne est la source d'énergie qui est la plupart du temps constituée de résidus animaux ou végétaux.

Les autres facteurs sont : l'aération, la disponibilité de l'eau du sol (1/2 à 2/3 des pores du sol remplis d'eau), la température (activité augmente quand température augmente jusqu'à un certain point (dessiccation)), le pH (plutôt neutre à légèrement alcalin avec une bonne disponibilité de calcium). »

Un rôle fondamental, connu depuis 30 ans mais mal exploré encore chez nous, est celui de l'inhibition des organismes phytopathogènes par une foule de mécanismes induits par la matière organique complexe et notamment par les composts (sols supprimeurs) qui favorisent des micro-organismes inhibiteurs de pathogènes et inducteurs de la croissance végétale.

3.4 Composition chimique de l'humus

L'humus est constitué d'un réseau complexe de molécules linéaires ou cycliques réassociées sans structure répétitive. Il ne s'agit donc pas d'un vrai polymère qui par définition est un assemblage de monomères identiques. Cette complexité de l'humus explique bien pourquoi sa dégradation par les micro-organismes est difficile et très lente.

La lignine n'étant pas non plus un polymère, possédant des noyaux aromatiques et autres structures complexes, résiste mieux aux attaques microbiennes et les résidus s'incorporent facilement et abondamment à l'humus en reconstitution.

Par contre, la cellulose, souvent considérée à tort comme une bonne source d'humus, est un vrai polymère de molécules de cellobiose, qui lui-même est une double molécule de glucose. De nombreux organismes sont donc capables de dégrader rapidement cette cellulose. Les glucoses résiduels étant assimilables par tous les organismes du sol, ils ne contribuent pas ou seulement faiblement à la reconstitution de l'humus du sol.

Donc la lignine, contrairement à la cellulose, est un constituant fondamental de l'humus. C'est la raison pour laquelle il est important de ramener des déchets ligneux dans les sols.

« En conditions aérobies, le carbone organique est utilisé comme source d'énergie pendant la décomposition de la matière organique avec production d'eau et de CO₂ ce qui conduit à une diminution du rapport C/N puisque l'azote n'est guère éliminé mais principalement nitrifié.

On peut estimer la quantité de matière organique d'un sol au moyen de facteurs de multiplication des teneurs mesurées en carbone organique ou en azote :

Horizon A d'une pâture : % de carbone organique x 1,9 = % M.O.

La plupart des horizons B : % de carbone organique x 2,5 = % M.O.

Horizons A ou B : % Azote x 20 = % M.O.

On voit donc que le facteur habituellement utilisé de 1,724 x % carbone organique = % M.O., basé sur le postulat que la matière organique est composée à 58% de carbone, est remis en cause. La variabilité est tellement grande qu'on ne peut justifier un chiffre aussi précis. L'estimation à partir du pourcentage d'azote conduit également à des erreurs dues au fait que ce paramètre est encore plus variable que le carbone organique. »

Tableau 2. Relations entre le carbone et l'azote de différentes matières organiques (par rapport au poids sec)

Types de matière organique	% C	% N	Rapport C/N
Tissus végétaux :			
Foin de luzerne	40	3,0	13/1
Tiges de maïs	40	0,7	60/1
Paille d'avoine	37	0,5	80/1
Microorganismes :			
Bactéries	50	10,0	5/1
Actinomycètes	50	8,5	6/1
Champignons	50	5,0	10/1
Moyenne	50	6,2	8/1
Matière organique du sol :			
Horizon A forestier	50	2,5	20/1
Horizon A pâture	52	5,0	10,4/1
Horizon B (moyenne)	40	5,0	8/1

Quand le rapport C/N est élevé (> 25), l'azote risque de manquer aux cultures si le sol est pauvre en matières organiques. Si le rapport est faible (<15), beaucoup d'azote est disponible pour les cultures.

Les C/N des différentes matières illustrent les phénomènes généralement observés, c'est-à-dire une insuffisance d'azote si on applique des pailles (C/N très élevé) et un enrichissement du sol en azote si l'on enfouit du foin de luzerne (C/N faible).

Les micro-organismes sont gros consommateurs d'azote, plus que les plantes par unité de biomasse, et il est donc important de les favoriser dans les sols pour mieux gérer l'azote.

La fertilisation par la matière organique ne prend habituellement pas en compte la biodégradabilité du carbone, ni la disponibilité **potentielle** (existante sous forme organique et non encore disponible) de l'azote dans le sol.

3.5 La décomposition de l'humus

« L'humus comprend des molécules complexes qui se décomposent très lentement. Cela permet d'obtenir un effet « slow release » de libération lente des éléments nutritifs nécessaires aux plantes. Ceci traduit donc la capacité fertilisante à long terme d'un sol bien pourvu en matière organique.

La décomposition et le renouvellement de l'humus sont globalement équivalents (sauf modifications importantes du climat ou du type de végétation) et ils représentent environ 2 à 4 tonnes par hectare et par an dans la plupart des sols. La quantité décomposée peut représenter de 1 à 25 % de l'humus présent dans le sol suivant les conditions climatiques respectivement très froides et tropicales. En régions tempérées, ce chiffre est de +/- 3 % par an.

Un exemple permet de mieux appréhender la décomposition de l'humus et son impact sur la fertilité des sols. On implante sur un sol préalablement non cultivé une culture de maïs en régions tempérées. On ne considère que l'aspect fertilisant azoté par simplicité.

Si le sol contient 5% de matière organique (soit +/- 100 t/ha), 3 % (soit 3 t) se décompose normalement chaque année.

La première année, la décomposition est plus rapide suite aux changements d'occupation des sols et atteint 4 t/ha soit un relargage de 200 kg d'azote (5 % de 4 t). Cette quantité représente environ 4 % de tout l'azote présent et doit permettre d'obtenir un rendement de 60 q/ha de maïs sans fertilisation supplémentaire si les autres conditions sont favorables.

Une partie de l'azote va retourner au sol avec les résidus mais environ la moitié est évacuée avec la récolte du maïs.

Tout se passe comme si le sol devait encaisser une perte nette de 2 t/ha d'humus après cette première année de culture.

Si la culture est poursuivie pendant 30 ou 40 ans, pendant lesquels la teneur en matière organique du sol va chuter à 3 % (soit 60 t/ha). Parallèlement, le taux de dégradation de l'humus va passer de 4 % à 2 % par an parce que l'humus restant est essentiellement constitué de matériaux qui se décomposent très lentement.

Sur les 3 t d'azote total (5 % de 60 t), seulement 60 kg seront disponibles pour les plantes soit de quoi obtenir un rendement sans fertilisation externe de 18 q/ha. »

3.6 Décomposition de la matière organique.

« La différence importante entre les rapports C/N de la matière organique brute et ceux des microorganismes du sol s'explique surtout par l'utilisation du carbone comme source d'énergie et qui est converti en CO₂ alors que l'azote s'intègre essentiellement dans les tissus microbiens.

Beaucoup de matières végétales ont un rapport C/N si grand que de l'azote est puisé dans le sol et utilisé avec le carbone de la plante pour former une biomasse microbienne. L'azote est le facteur limitant la rapidité de la décomposition de telles matières organiques dans le sol. »

NDR : On décrit habituellement cette situation comme une indisponibilité d'azote dans le sol. Et pourtant lorsqu'on essaye de reconstituer le stock de matières organiques, il est souhaitable de ralentir la dégradation de la matière organique apportée et la carence éventuelle en azote provoquée par le rapport C/N élevé s'atténue d'année en année si les apports de matières organiques sont réguliers. Peu de travaux s'intéressent réellement à l'impact à long terme d'apports divers dans des situations de sols en équilibre et déjà riches en matières organiques.

Après une récolte de maïs grain, les tiges de maïs sont restituées au sol soit +/- 6 tonnes de matières par hectare. Ces 6 tonnes de matières organiques contiennent :

2,4 tonnes de carbone (40 % du total)

40 kg d'azote (puisque rapport C/N de 60/1)

Si l'azote est disponible dans le sol et si $\frac{3}{4}$ du carbone est utilisé comme énergie et $\frac{1}{4}$ pour la biomasse microbienne, celle-ci contiendra :

600 kg de carbone (25 % du carbone de la plante)

75 kg d'azote (puisque rapport C/N de 8/1)

Ceci requiert donc l'immobilisation de 35 kg d'azote (75-40) en provenance du sol. S'il n'y a pas d'azote disponible dans le sol, la décomposition est limitée et ne peut mener qu'à la formation de biomasse microbienne contenant :

40 kg d'azote (azote total disponible)

320 kg de carbone (rapport C/N de 8/1)

960 kg de carbone seront utilisés comme énergie pour produire cette biomasse soit une consommation totale de 1280 kg de carbone. Le reste de carbone soit $2400 - 1280 = 1120$ kg devra attendre un prochain cycle de décomposition qui surviendra quand les microorganismes meurent et que leurs cadavres se décomposent. Le carbone additionnel issu des résidus de culture non décomposés est utilisé pour couvrir une partie des besoins des générations futures de microorganismes jusqu'à ce que la source soit épuisée.

La simplification de l'exemple porte notamment sur l'échelle de temps. La décomposition est un processus qui prend du temps. On ne tient pas compte non plus des modifications au cours du temps des populations microbiennes. Les champignons sont surtout présents au début quand la source de carbone pour l'énergie est maximale et quand il y a surtout des matières facilement dégradables. La prédominance des champignons dans la décomposition se traduit par un rapport C/N de 10/1. Alors que la décomposition bactérienne qui intervient après les champignons se caractérise par un C/N de 5/1. »

Les phénomènes sont en réalité beaucoup plus nombreux et plus complexes.

La plupart des raisonnements sur les rapports C/N se basent sur des apports uniques ou peu répétés et sur des sols qui sont en transition et dont l'effet tampon de la matière organique est insuffisant pour absorber les perturbations apportées. Peu de travaux étudient l'impact à long terme d'apports divers dans des situations de sols en équilibre et riches en matières organiques.

3.7 La libération de l'azote.

« La décomposition de la matière organique relâche de l'azote si son rapport C/N est suffisamment bas.

Le seuil d'équilibre est fixé à 32/1 pour ne pas y avoir de carence en azote mais lorsque le carbone est difficilement assimilable, il peut descendre à 8/1 si la conversion du carbone se fait avec une efficacité de 25 % et celle de l'azote à 100 %. Les matières organiques avec les C/N les plus bas se décomposent presque 50 % plus vite que celles déficientes en azote. Des jeunes plantes incorporées au sol se décomposent plus rapidement et relarguent plus tôt de l'azote disponible que les résidus de cultures plus secs et plus riches en cellulose (= principe des "engrais verts"). »

3.8 Les besoins en matières organiques des sols

Sur base des statistiques agricoles de l'Institut National de Statistiques (année 2000), des analyses REQUASUD et d'une estimation des quantités de carbone organique total sur les prairies, une méthodologie a été développée afin d'évaluer les quantités de matière organique nécessaires pour compenser les pertes d'humus annuelles par minéralisation, pour les cultures et les prairies et ce sur l'ensemble de la Région wallonne. Deux simulations ont été réalisées. Elles supposent toutes deux un coefficient d'humification de 25 % (c'est-à-dire un taux de reconstitution de l'humus à partir des apports. L'une considère un coefficient de minéralisation secondaire de l'humus (c'est-à-dire le taux de dégradation de l'humus ancien du sol = K2) d'1 % (ce qui équivaut à une disparition totale en 100 ans) et un autre plus rapide de 2 % (disparition totale en 50 ans). Ces deux simulations sont optimistes car le taux réel d'humification est souvent beaucoup plus faible que 25 % et les processus de dégradation sont fréquemment plus rapides (3 % dans le § 3.7, extrait d'un document américain) et tous ces phénomènes sont d'ailleurs encore très mal connus et très variables en fonction du contexte et du climat.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Quantité de matière organique nécessaire pour compenser les pertes d'humus annuelles par minéralisation pour les cultures pour l'ensemble de la Région wallonne. En utilisant un taux communément admis de dégradation annuelle de la matière organique K1 = 25 % et deux taux K2 de minéralisation secondaire (taux de dégradation de l'humus) habituellement utilisés de 1 et 2 %.

Cultures (t MS/an)		Prairies (t MS/an)		TOTAL cultures + prairies	
K2=1	K2=2	K2=1	K2=2	K2=1	K2=2
1.650.792	3.301.584	4.034.247	8.068.494	5.685.039	11.370.078

On peut comparer à partir du tableau 1 qui donne l'estimation des quantités de matières organiques disponibles, les matières nécessaires pour compenser les pertes d'humus annuelles par minéralisation dans le tableau 2, pour les cultures et les prairies, et on peut ainsi évaluer le taux d'auto-alimentation global de la Région wallonne en matière organique.

Il s'avère alors que le gisement annuel wallon en matière organique (tableau 1) serait de 965. 531 tonnes de matière organique (MS) hors effluents d'élevages et de 2. 444. 812 t de MS organique totale. Dès lors, **ce gisement (sans effluents d'élevages) pourra combler en 2010 de 31 à 63 % sur les cultures seulement (en fonction du coefficient considéré de minéralisation secondaire : de 2 ou 1% par an) des besoins des sols en matières organiques nécessaires pour maintenir le stock d'humus actuel. Si l'on envisage tous les déchets réunis (y compris donc les effluents d'élevage) avec les taux de récoltes les plus optimistes, le comblement des besoins globaux (donc cultures et prairies) de la RW va de 22 % à 45 %.**

Les déchets d'élevages ayant en outre un taux de dégradation annuel élevé de l'ordre de 50 % par an ne seront certainement pas suffisants pour satisfaire les besoins en matière organique. La situation de l'azote n'est guère différente mais moins cruciale c'est-à-dire que les besoins en azote sont loin d'être satisfaits par la matière organique potentiellement valorisable.

On peut donc conclure que toute la Région wallonne est confrontée à un manque global en matière organique. La valorisation de l'ensemble des matières organiques considérées dans la présente étude ne permet pas de couvrir l'ensemble des besoins des sols aussi bien en ce qui concerne l'azote organique que le carbone. Il ne devrait donc pas y avoir de concurrence globale entre ces différents types d'amendements organiques les effluents d'élevage, les matières organiques d'origine végétale et les boues qui, d'ailleurs, devraient être plus complémentaires que concurrentes, puisque pour réduire le lessivage d'azote, il serait souhaitable de relever le rapport C/N en amenant des composts en même temps que les effluents d'élevages ou mieux en intégrant ces effluents dans les processus de gestion globale et notamment dans les processus de compostage pour afin de les hygiéniser.

Les besoins de base urgents en matières organiques sont évidemment à nuancer en fonction des types de sols. Brièvement, on peut dire que les sols plus calcareux et pauvres en argile ont davantage encore besoin de matières organiques pour mieux protéger leur structure, leur fertilité et les nappes d'eaux sous-jacentes.

Une étude française récente (Roussel *et al.*, 2001) propose un apport de 0,7 t de matières organiques humifiées par hectare et par an pour redresser le taux d'humus en 10 ans de 10 % quand elle est sous le seuil critique de 2 %. Ceci correspond à 17 t d'amendement organique par ha tous les 3 ans (K1 = 50 % et MO/MB = 25 %). Pour la France, le besoin en matières organiques est 30 à 40 fois supérieur aux disponibilités actuelles.

Néanmoins, un débat doit naître sur la destination à donner au carbone disponible en Région wallonne. Etant donné son insuffisance globale, doit-on l'orienter principalement vers les sols pour rehausser le taux de matières organiques et pour augmenter le rapport C/N des apports azotés ou doit-on favoriser la production d'énergie verte pour réduire le taux de CO₂ d'origine fossile.

Il semble que les deux soient partiellement compatibles selon le schéma suivant :

- Pour la matière organique de bonne qualité, riche en matières ligneuses, la priorité doit être donnée à la valorisation agricole directe étant donné l'urgence impérieuse d'arrêter la dégradation des sols.
- Cependant, pour les matières très aqueuses et pauvres en lignine, ou difficiles à composter pour des raisons de structure (herbes, déchets alimentaires cuits,...) on peut préconiser un traitement essentiellement à des fins énergétiques, via la biométhanisation, qui permettra d'en récupérer l'énergie et les éléments minéraux fertilisants utiles, surtout dans les régions forestières ou de prairies où les besoins des sols en matières organiques ne sont pas aussi importants.

3.8.1 Plébiscite pour la matière organique et pour les composts :

Le rôle de la matière organique dans les sols est fondamental même si tous les acteurs concernés n'en sont pas encore convaincus.

Il est clair que de nombreux acteurs ne font plus le rapport entre les faibles teneurs en matière organique et la dégradation de la structure des sols, l'érosion, le tassement, la sensibilité à la sécheresse, la plus lente pénétration de l'eau, les besoins plus grands en engrais et pesticides, la sensibilité des cultures aux maladies sans insister sur la pollution des nappes souterraines par les nitrates, pesticides...

Tous ces inconvénients pourraient être réduits, voire neutralisés fortement par un réenrichissement des sols en matière organique à haut C/N. Cependant, la solution, même si elle est envisageable, ne produira pas d'effets avant longtemps. En effet, la situation actuelle est la conséquence de pratiques culturales intensives, sans guère d'apport de matière organique structurante et stable, depuis environ 1950. Certains estiment qu'il faudrait plus de 100 ans pour revenir à un statut en matière organique équivalent à celui des années 50. Il est donc urgent d'envisager l'arrêt de la dégradation et mieux, d'entamer une reconstitution (malheureusement lente) du stock d'humus des sols.

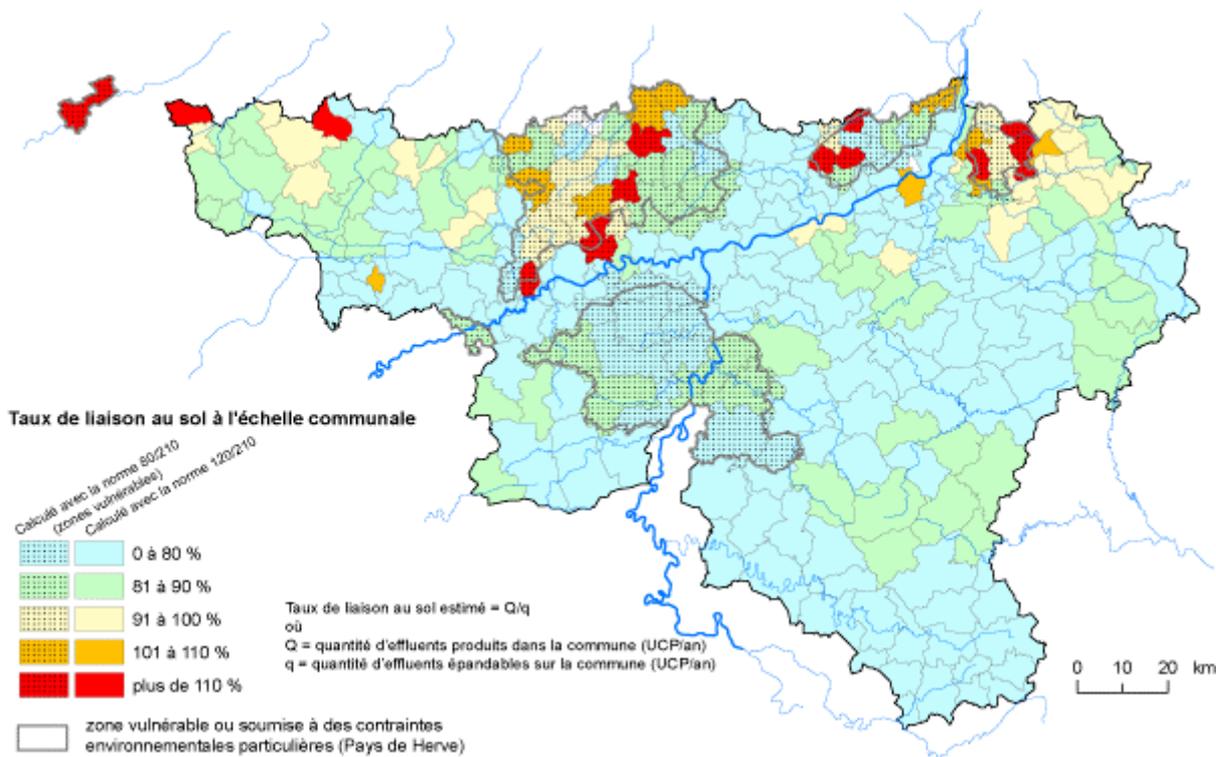
Dans cet objectif, il est nécessaire de mettre en place une politique de sensibilisation, d'information, de promotion auprès des gestionnaires des sols (agriculteurs, horticulteurs, jardiniers amateurs et professionnels) afin de les conscientiser à l'urgence d'une meilleure gestion de la matière organique, depuis la production jusqu'à son utilisation, en passant par les traitements possibles ou nécessaires.

Il est donc important de sensibiliser la population agricole à une nécessité de produire plus de matière organique stable et surtout ligneuse (les pailles, peu riches en lignine, ne peuvent remplacer valablement les déchets de bois pour la reconstitution de l'humus) sur les jachères par exemple (courtes rotations), mise en place de haies, de peuplements sur les talus, en bordure de rivière, etc., de ne pas gaspiller celles de qualité qui existent et que l'on galvaude trop souvent (abandon sur place, brûlage non justifié, mise en décharge plus ou moins sauvage, ...).

Une telle politique de sensibilisation ne s'improvise pas et doit faire l'objet d'une concertation de base en concertation avec les représentants des agriculteurs et d'autres acteurs ayant un rôle à jouer dans la production végétale, dans la transformation, le commerce et l'application de matières organiques ainsi que dans la préservation de l'environnement.

3.8.2 Taux de liaison au sol de l'élevage

Taux de liaison au sol de l'élevage, à l'échelle communale, en Région wallonne (estimation pour l'année 2000)(source DPS, DGRNE)



« La distribution des exploitations agricoles situées en Région wallonne en fonction de leur valeur de LS 3 montre que **80 % des exploitations ont des capacités internes d'épandage suffisantes ($LS\ 3 \leq 1$)**. A l'échelle européenne, la Région wallonne se situe néanmoins parmi les régions où la charge en azote organique moyenne par hectare de surface agricole est la plus élevée, notamment derrière la Flandre et les Pays-Bas. »

3.8.3 Gestion des effluents d'élevage

«Le calcul des valeurs de LS pour toutes les exploitations agricoles dont le siège social est situé en Région wallonne est réalisé par la Direction de la protection des sols (DPS) de la DGRNE. Une base de données spécifique (TALISOL) a été développée à cet effet. Les informations de base pour le calcul des LS proviennent de la DGA. Il s'agit des déclarations PAC (superficies agricoles) et SANITEL (cheptels).

Les exploitations dont le LS interne (LS 3) est trop élevé ont la possibilité d'établir des contrats d'épandage avec d'autres agriculteurs. Dans ce cas, Nitrawal est l'organisme conseil chargé d'organiser les échanges d'effluents, mais c'est la DPS qui gère les contrats d'épandage. Outre l'échange d'effluents, les agriculteurs ont la possibilité de s'engager en une "démarche qualité", centrée sur une amélioration de la gestion de l'azote à l'échelle de l'exploitation. Dans ce cas, un accès à des **normes d'épandage plus élevées est toléré moyennant un suivi des flux d'azote à l'échelle de la parcelle** agricole, et notamment la réalisation de profils de reliquats azotés dans les sols chaque automne. »

3.8.4 Zones géographiques où la valorisation des composts sera limitée

Quasi toute la région herbagère est caractérisée par un fond géopédochimique existant naturellement ou acquis autrefois, qui affecte la teneur en métaux lourds des végétaux. Ainsi, les déchets verts de cette région, dépassent souvent les objectifs des nouvelles normes potentielles surtout pour le zinc, et dans une moindre mesure, le cuivre et le chrome. Faut-il écarter pour autant ces matières de la valorisation sur les sols ? Une voie d'approche du problème serait d'isoler les origines précises responsables des contaminations tout en autorisant à la valorisation agricole les matières correctes.

Néanmoins, la question se pose déjà de savoir quelles matières organiques doivent être utilisées sur de tels sols. Il faudrait restreindre l'autorisation d'épandage aux seules matières organiques de très bonne qualité, très pauvres en ETM. Se pose dès lors le problème des quantités disponibles de ce type de matières.

Dans les cas des sols à forte concentration en métaux lourds, handicapant des cultures éventuelles, des possibilités de phytoextractions pourraient être explorées débouchant sur une valorisation énergétique à courte rotation dont l'exploitation devrait se faire à proximité de la zone de production. Cette technique permettrait de faire baisser les concentrations en métaux lourds sans demander un investissement en matériel pour l'agriculteur. Il s'agirait d'une véritable bioremédiation des sols par les plantes.

La discussion des valeurs limites en ETM devant être atteintes au niveau des sols en fonction de leurs usages est à étudier de près, en faisant référence également au fond géochimique naturel.

Par ailleurs, d'autres limitations devraient être envisagées pour les zones de captage d'eau dont les zones de protection devraient être étendues pour les produits à C/N bas compte tenu des risques plus élevés de lessivage d'azote (par exemple C/N<20). La prudence s'impose pour les versants de cours d'eau à forte pente. Par contre des composts ou broyats de végétaux à C/N>30 présentant moins de risques pourraient être utilisés pour stabiliser des berges ou des versants pentus et pour en augmenter la perméabilité du sol.

La prise en compte de ces considérations devrait s'intégrer dans les codes de bonnes pratiques agricoles et environnementales.

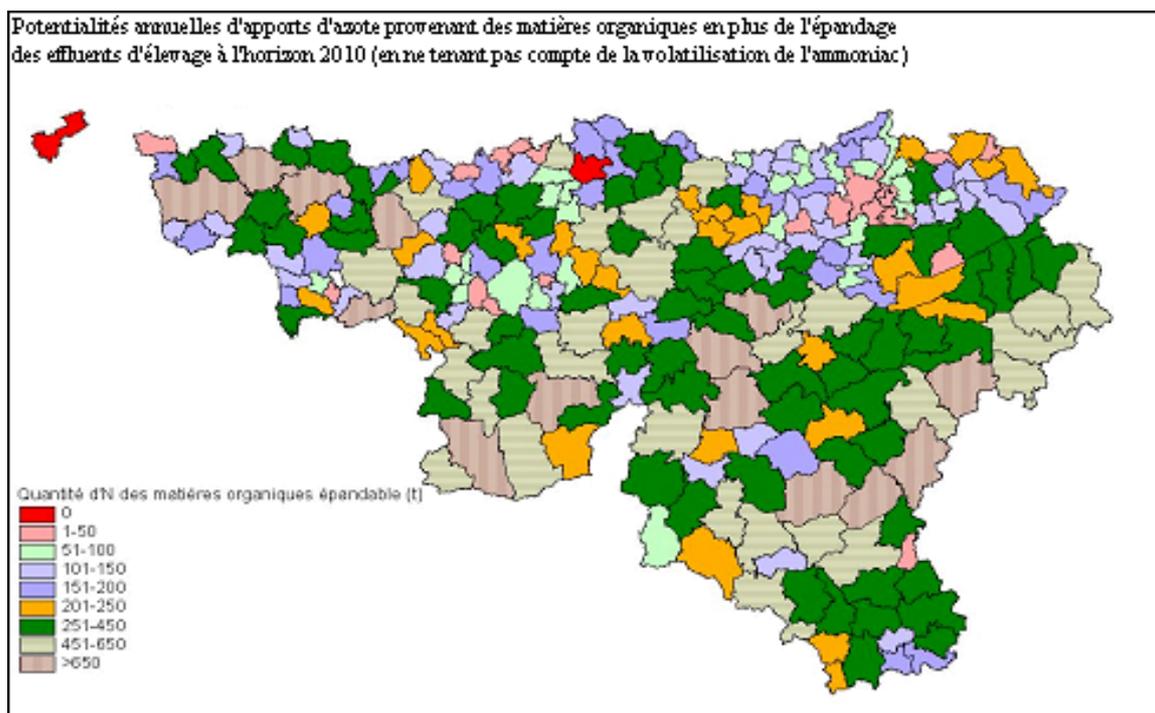
3.8.4.1 Codes de bonnes pratiques agricoles

La limitation actuelle des apports en fonction de plafonds en azote est un point positif mais bien insuffisant pour la protection des sols, des eaux et des consommateurs à long terme. D'une part, de nombreux polluants potentiels sont à prendre en compte comme les ETM, les micro-organismes pathogènes et les micropolluants organiques très peu biodégradables. D'autre part, les principes préconisés dans le code de bonnes pratiques, vont, peut-être, ralentir partiellement les migrations d'azote vers les eaux souterraines mais certainement pas les arrêter. Que faut-il de plus ?

Il est évident que, pour nourrir directement les plantes à partir d'apports azotés, il faut apporter l'azote de manière homogène sur la surface du sol. Or, en fonction de la densité de plantation, un volume de sol plus ou moins grand sera exploité par les racines, et dans les zones sans ou avec peu de racines, l'azote excédentaire sera lessivé après minéralisation éventuelle et oxydation en nitrites et nitrates.

En conséquence, vouloir nourrir directement les cultures en azote avec suffisance et sans pertes, relève de l'utopie. **La seule alternative envisageable pour réduire au mieux les pertes en azote est d'apporter ce dernier sous forme lentement minéralisable (azote organique) mais de manière régulière et avec suffisamment de carbone (rapport C/N > 15 ou 20) pour entraîner un développement de la microflore du sol qui captera la majorité de l'azote non utilisé par les plantes, tout en maintenant suffisamment d'azote disponible pour celles-ci.**

Carte 2 : Potentialités en 2010 d'apports d'azote en plus des effluents d'élevages.



En conclusion, il reste des possibilités importantes de valorisation d'azote sur les sols de la Région wallonne, laissant donc ainsi la place au développement d'une capacité d'élevages complémentaire, mais il est important que l'azote soit réparti correctement avec la précision des apports adaptée aux besoins réels de chaque parcelle.

3.9 Potentiel de valorisation hors agriculture

Hormis l'horticulture et la fabrication de terreau, les autres potentiels ne représentent que de faibles quantités réelles et ne sont que très marginales par rapport à l'agriculture. Une idée souvent citée serait néanmoins de trouver des sites déjà contaminés (friches industrielles...) pour mettre les matières de moins bonne qualité. En réalité, outre que cela ne représente qu'un faible débouché potentiel, est-il judicieux d'accroître la contamination existante ? Ceci ne serait acceptable que si l'on mène parallèlement une technique de décontamination, par exemple par phytoextraction.

Les besoins réels de certains sols ne se traduisent pas tous encore par une demande identifiée aujourd'hui. Il y aurait donc des possibilités complémentaires de valorisations de certaines matières organiques.

Ces besoins devront être durablement révélés, et satisfaits, à partir d'une offre de produits élaborés (et non pas de déchets) répondant, au moins, à 4 conditions : l'innocuité, l'efficacité, la qualité (odeur, aspect, texture, pureté...) et la traçabilité (origine, appellation locale...)

3.10 Rôle des apports des matières organiques dans le stockage de carbone dans le cadre des accords de Kyoto

Dans un document émanant d'un groupe de travail de l'Union Européenne sur le changement de climat (ECCP : European Climate Change Programme), on peut lire les observations suivantes :

« Il est évident qu'en fonction des pratiques culturales actuelles, de nombreux sols européens perdent de leur matière organique et donc constituent plus une source de CO₂ atmosphérique qu'un puits. »

« Le stockage de carbone dans les sols agricoles entre dans l'article 3.4 du Protocole de Kyoto. »

« La séquestration de carbone dans les sols agricoles est un mécanisme potentiel pour satisfaire les obligations de l'UE à limiter les gaz à effet de serre. »

« Selon les estimations des experts, le potentiel de séquestration est de 60 à 70 Mt CO₂ /an dans les sols agricoles des 15 Etats membres, ce qui représente 1,5 à 1,7 % des émissions de CO₂ anthropogénique, et 19 à 21 % de la réduction totale de 337 Mt de CO₂ à laquelle l'UE doit se soumettre pendant la première période de 5 ans. »

« Cet objectif peut-être atteint soit en augmentant le taux de C dans les sols ou en réduisant les pertes ou les deux à la fois. »

« Les émissions de N₂O et de CH₄, à effet de serre beaucoup plus puissants que le CO₂, doivent être particulièrement maîtrisées », ce qui implique un sévère contrôle des matières organiques stockées en absence d'aération et sans traitements des gaz produits. »

Une meilleure utilisation des multiples matières organiques, en les appliquant sur terres cultivées plutôt que sur prairies ou ailleurs comme c'est souvent le cas. Cette mesure requiert des transports notamment de zones à forte production animale vers les terres de culture. La généralisation de la production de matières compostées limite la distance entre la production et l'utilisation des composts et réduit les coûts de transport.

« Les réserves de carbone dans les sols agricoles ou non ont été épuisées avec le temps. Une large quantité du CO₂ présent dans l'atmosphère provient de la minéralisation de la matière organique des sols. Les facteurs responsables de cet état de fait sont notamment l'urbanisation, les changements d'affectation des terres, les pratiques agricoles classiques, les mines à ciel ouvert et d'autres activités qui dégradent les sols. **Il en résulte qu'il a été émis, dans l'atmosphère, plus de carbone d'origine du sol que de carbone provenant de l'utilisation des combustibles fossiles pour la période 1860-1970.** » (BROWN, S. and LEONARD, P., 2004)

« L'augmentation des réserves en carbone du sol (séquestration du carbone) ou la diminution des pertes de carbone par émission peuvent être atteintes de différentes manières : augmentation de la teneur en matière organique dans les sols agricoles et les pâturages extensifs (par l'application de boues d'épuration par exemple), restauration de la fertilité des sols dégradés, pratiques agricoles différentes (semis direct sans labour), mise en jachère de terres agricoles jusqu'à la restauration de l'écosystème primaire initial, reforestation, cultures de plantes énergétiques. » (BROWN, S. and LEONARD, P., 2004)

« L'utilisation de boues d'épuration pour augmenter les réserves en carbone du sol s'inscrit dans la logique des choses vu la teneur en carbone de ces produits. Cette dernière n'est pas le seul élément à prendre en compte pour estimer la quantité de carbone qui sera effectivement retenue dans le sol. D'autres facteurs interviennent comme l'utilisation finale du terrain et les pratiques associées de gestion du sol. » (BROWN, S. and LEONARD, P., 2004)

« Pour la réhabilitation de friches, l'utilisation de grandes quantités d'amendements tels que les boues d'épuration permet d'augmenter le stock de carbone dans le sol (souvent très appauvri par le décapage de la couche de surface du sol avant exploitation) en garantissant le développement d'un couvert végétal suffisant et en améliorant les propriétés fonctionnelles du sol. » (BROWN, S. and LEONARD, P., 2004)

« Stocks de carbone stable des sols (couche de 0-30 cm) :

Pelouse d'altitude	90 t de C/ha
Forêt ou prairie	70 t de C/ha
Terre arable	40 t de C/ha
Vigne ou Verger	30 t de C/ha

Le stock des terres arables varie selon les façons culturales appliquées (INRA-CEA-2000)

Le potentiel de stockage net supplémentaire de carbone des sols français d'ici 2010 est de l'ordre de 1 à 2 Mt de C/an.

Le potentiel d'évitement lié aux cultures non alimentaires d'ici 2010 est de 0,25 Mt de C/an supplémentaire.

De nouvelles plantations forestières peuvent stocker 2 à 3 t de C/ha.an.

La filière bois construction stocke, chaque année 3 Mt de C supplémentaires.

Le bois a un contenu énergétique global très faible comparé au béton et à l'acier qui nécessite une énergie importante de production et de transport des matières premières et finies. »

4 Techniques de traitement : qualité et sécurité actuelle des filières

Les traitements par voie biologique (compostage ou biométhanisation) engendrent des mécanismes de dégradation qui libèrent du carbone et de l'eau et réduisent la masse de la matière traitée ce qui a pour effet d'augmenter les concentrations en éléments non dégradés dont les éléments-trace métalliques (ETM). En effet, une partie du carbone de la matière traitée est consommée et perdue sous forme de CO₂ ou de CH₄. Malgré les efforts pour améliorer la qualité des matières brutes, comme la collecte sélective, une concentration de polluants métalliques plus ou moins forte, plus ou moins acceptable, sera toujours associée au produit final. Il n'en va pas de même pour les polluants organiques. En effet, l'activité des microorganismes permet de dégrader à des vitesses variables, quasi tous les polluants organiques connus qui seraient présents dans la matière brute (hydrocarbures aliphatiques, pesticides, solvants, certains hydrocarbures aromatiques,...). Certes pour certaines molécules (essentiellement les polychlorées), la dégradation complète nécessite beaucoup de temps et des conditions écologiques favorables.

Le choix entre la valorisation directe d'une matière organique ou de son intégration dans une filière de co-traitement doit être le fruit d'un compromis. La valorisation directe permet d'apporter au sol une matière stabilisée mais pas très éloignée de la composition initiale à un coût minimal. Deux inconvénients principaux sont, par contre, une qualité agronomique rarement optimale, la présence de pathogènes, et une habituelle absence de traçabilité, dans la mesure où l'application peut se faire à la dérochée. Le traitement biologique permettrait d'améliorer la qualité finale, sa stabilité, la réduction des nuisances, la traçabilité des matières, en obligeant à plus de visibilité, et la qualité agronomique de l'amendement produit. Malheureusement, il s'accompagne d'un surcoût et d'une perte globale de carbone d'environ 50 à 60 %, ce qui est important si l'on considère le déficit global de matières organiques dans les sols.

4.1 Compostage

Le compostage est défini comme un procédé biologique aéré contrôlé de conversion des substrats organiques menant à un produit stabilisé, hygiénisé, riche en composés humiques, et valorisable comme amendement des sols.

La bonne conduite du compostage est conditionnée par différents paramètres qu'il est important de maîtriser. Ces paramètres sont déterminants lors du choix d'une solution technique particulière.

4.1.1 L'aération

Le paramètre le plus important est l'aération. Si celle-ci est suffisante durant tout le processus, le produit final sera de présentation et d'odeur agréables et les étapes intermédiaires ne produiront pas de nuisances olfactives. Par contre, un déficit d'air, produira toujours des problèmes, au niveau olfactif pendant le compostage et sur la qualité finale du produit (odeur, couleur, toxicité...)

Le maintien des conditions aérobies est primordial, tant pour le bon déroulement du compostage que pour la gestion des odeurs. Non seulement l'oxygène est indispensable à la vie des micro-organismes aérobies actifs dans le processus de compostage, mais il est également nécessaire aux réactions physico-chimiques d'oxydation de la matière organique pour produire du gaz carbonique et de l'eau.

La teneur en oxygène de l'air présent à l'intérieur des tas de matières à composter détermine la vitesse de dégradation de ces matières. En début de compostage, la dégradation des matières facilement fermentescibles est rapide et, par conséquent, les besoins en oxygène sont plus élevés. L'apport d'oxygène est donc très important à ce moment. Par la suite (après 2 à 4 semaines), les matières en traitement étant de plus en plus difficiles à dégrader, la vitesse de dégradation et, en conséquence, les besoins en oxygène, diminuent.

Mis à part le compostage de déchets verts (sans herbes de tontes) qui peut se réaliser à l'extérieur par simple mise en andains et retournements réguliers avec peu de risque de mauvaises odeurs, les techniques industrielles de compostage de matières facilement fermentescibles incluent généralement une ventilation forcée des andains. Celle-ci est réalisée par insufflation ou aspiration d'air à l'aide de ventilateurs, via des goulottes ou des tuyaux disposés sous les andains, pour limiter les risques d'odeurs. L'efficacité de l'aération dans ces conditions va dépendre de la porosité de la matière.

4.1.2 Porosité

Le corollaire d'une bonne aération est une porosité suffisante des tas de matières en traitement, de manière à permettre l'accès de l'oxygène aux micro-organismes aérobies présents dans le substrat organique. Cette porosité est assurée par :

- la présence ou l'ajout d'éléments structurants de quelques cm de longueur (broyat de branches, écorces...);
- le retournement régulier et fréquent des andains permettant d'éviter la compaction des tas et la formation de zones en anaérobiose.

Il faut bien être conscient que l'air qui circule dans un tas assèche les canaux dans lesquels il passe et les élargit en conséquence, ce qui accentue les chemins préférentiels pour l'air. La matière ainsi partiellement déshydratée le long de ces canaux ne peut évoluer normalement puisque les processus biologiques y sont freinés ou bloqués.

4.1.3 Humidité

L'eau est indispensable à la vie des micro-organismes, elle assure également le lien entre la faune microbienne et les matières à dégrader. En cours de compostage, de l'eau, du CO₂ et de la chaleur sont produits lors des réactions de dégradation. Une partie de l'eau s'échappe des déchets par évaporation, induite par l'élévation de température et par le métabolisme propre des micro-organismes, mais également par percolation d'eau liquide sous les andains lorsque l'aération est insuffisante et que les premières phases de digestion anaérobie s'installent et produisent des lixiviats.

Si la vapeur d'eau est libérée dans l'atmosphère, l'eau liquide doit quant à elle être collectée dans des bassins, et sert parfois à l'arrosage des andains dont la teneur en eau doit être compatible avec le développement des micro-organismes. La teneur en eau, en début de compostage, doit en effet être proche de 65 voire 70 % de la matière brute. Cette valeur est un compromis assurant une humidité suffisante tout en permettant l'oxygénation des tas. En dessous de 50 %, la vie microbienne est très ralentie et les processus de transformations sont incomplets.

4.1.4 Température

Les réactions de dégradations se produisant au cours du compostage sont exothermiques et produisent de la chaleur. Il en résulte une élévation de la température des tas. Cette élévation de la température est un indicateur du bon déroulement du compostage et est souvent suivi par les gestionnaires de centres de compostage. La température à l'intérieur des tas peut atteindre 70 à 80°C. Du point de vue biologique, il n'est pas souhaitable d'atteindre des températures aussi élevées qui limitent la diversité microbienne active. La température idéale pour favoriser la vitesse de dégradation tout en garantissant une hygiénisation satisfaisante est de 55 à 60°C.

En pratique, la montée en température d'un tas de matières en compostage dépend de la composition des substrats et des échanges thermiques à l'intérieur et vers l'extérieur du tas, eux-mêmes conditionnés par la taille et la forme du tas.

Deux remarques sont cependant à prendre en considération. D'une part, on peut constater une température élevée à l'intérieur d'un tas résultant d'une activité antérieure à la mesure. Cela est dû à l'inertie thermique de la masse importante de matière. La température mesurée n'est donc pas un indicateur précis et instantané de l'activité microbienne. D'autre part, la température n'est pas homogène à l'intérieur d'un tas à un moment donné. Par conséquent, pour être représentative, la mesure de la température doit être réalisée fréquemment en plusieurs endroits du tas.

4.1.5 Les paramètres physico-chimiques des matières à traiter

Le pH ne pose généralement pas de problème. La fourchette théorique acceptable se situe entre 5,5 et 8, l'optimum pour l'activité microbiologique étant de 7. En réalité, le compostage neutralise les matières acides ou basiques et le produit fini se caractérise presque toujours par un pH légèrement supérieur à 7. Un pH nettement supérieur à 7 est habituellement dû à la présence d'ammoniac, en conséquence d'un manque d'aération qui limite la nitrification, c'est-à-dire la transformation de l'ammoniac en nitrites et en nitrates.

4.1.6 Les caractéristiques physiques des matières

La taille moyenne des particules est importante car elle conditionne fortement l'oxygénation du substrat. Cette taille est à nouveau un compromis entre une surface de contact maximale pour l'attaque microbienne, une bonne structure et une porosité suffisante, permettant à l'air de diffuser à l'intérieur des tas. Si l'aération par retournements est assez performante, des particules de 1 à 3 cm sont suffisantes, sinon des fragments plus gros sont nécessaires pour favoriser une aération naturelle complémentaire.

4.1.7 Le rapport carbone/azote (C/N)

Ce paramètre est essentiel dans la caractérisation d'une matière à composter. En effet, les micro-organismes sont sensibles à l'équilibre de leur alimentation et particulièrement à l'équilibre carbone/azote. Un rapport C/N de 25 à 35 est souvent cité comme valeur optimale. Cependant, il faut tenir compte du carbone réellement disponible pour les bactéries qui vont consommer de 20 à 40 % du carbone total. Par conséquent, ce rapport optimal est en fait souvent proche de 50 voire 80. Or en réalité, la plupart de nos composts wallons ont un C/N bien plus bas qui oscille entre 10 et 20, ce qui explique la propension aux mauvaises odeurs.

Le C/N du compost produit a également un impact sur les micro-organismes du sol. L'apport d'un compost dont le C/N est élevé est favorable pour un sol riche en matières organiques et à l'état d'équilibre. Si on applique à un sol pauvre en MO, un compost à C/N élevé, cet apport favorisera un développement biologique qui va nécessiter dès lors plus d'azote que celui apporté et créer ainsi ce que l'on appelle une « faim d'azote ». Pourquoi ce besoin différent d'azote dans les 2 situations ? Parce que, tout comme les animaux, les besoins en azote sont plus grands pour la croissance de la biomasse microbienne, tandis qu'un sol qui contient déjà une population importante, possède l'azote organique adéquat pour satisfaire la ration d'entretien de cette biomasse.

4.1.8 Résumé de la recherche d'informations sur les installations

4.1.8.1 Installations industrielles privées ou gérées par des Intercommunales

Après avoir identifié et localisé les centres de traitement industriel de déchets organiques gérés par des privés ou des intercommunales, un questionnaire leur a été envoyé. Ce questionnaire sollicite principalement des informations concernant la caractérisation des matières traitées (quantité, qualité, origine), le procédé de traitement et la filière de valorisation du produit fini. La caractérisation des installations de traitement est basée sur les réponses à cette enquête.

4.1.8.2 Installations communales

Les installations de traitement gérées par des communes ont été mises en évidence par une enquête exhaustive menée auprès des 262 communes de Wallonie.

4.1.8.3 Installations agricoles

Les installations de traitement présentes au niveau de l'exploitation agricole ont été mentionnées par les responsables d'organismes tels que Agra-Ost et Erbe. Les exploitations pratiquant le compostage des effluents d'élevages font appel à des entrepreneurs possédant une retourneuse d'andains.

Le compostage au niveau de l'exploitation agricole consiste généralement en un ou deux retournements du fumier en bordure de champ. Ce fumier est, dans certains cas, amélioré et structuré avec du broyat de déchets verts.

4.1.9 Principes généraux du traitement par compostage

La mise en œuvre du compostage peut être réalisée de multiples manières, il existe de nombreuses technologies différentes.

En fonction des législations en vigueur, des contraintes environnementales, des contraintes de voisinage..., les techniques proposées vont de la simple mise en andains pratiquée à l'extérieur avec des retournements pour assurer l'oxygénation, à des méthodes beaucoup plus sophistiquées. **Toutes les techniques peuvent garantir théoriquement une absence quasi totale de production d'odeurs, mais si elles sont mal appliquées, la production d'odeurs désagréables est quasi inévitable.**

Les méthodes existantes et les plus couramment rencontrées en Région wallonne sont présentées dans les pages qui suivent.

4.1.9.1 Le compostage à ciel ouvert avec aération par retournements

Cette technique est principalement applicable au traitement des déchets verts. En effet, ce type de compostage ne générant que peu d'odeurs, il est possible, moyennant un bon suivi, d'effectuer celui-ci à l'extérieur de façon efficace.

4.1.9.1.1 Réception et prétraitement des déchets

Les déchets arrivent sur une dalle de compostage bétonnée. Un stockage de courte durée est fréquent afin de rassembler une quantité de matières suffisante pour effectuer une opération de broyage. Ce stockage est aussi souvent mis à profit pour réaliser une séparation manuelle des indésirables : plastiques, métaux, souches d'arbres,...

Le broyage est réalisé à l'aide de machines spécifiques constituées d'un dispositif d'entraînement des matières vers un tambour muni de marteaux ou de râpes. Une évolution possible en théorie serait de réaliser le broyage des déchets verts au départ des parcs à conteneurs, de manière à réduire globalement les coûts de transports et à pouvoir faire des pré-mélanges avec des matières hautement fermentescibles (herbes,...).

4.1.9.1.2 Le compostage proprement dit

La formation des andains est consécutive au broyage. Différentes formes et tailles d'andains sont observées en pratique, mais la forme théorique la plus favorable est la forme conique car elle évite une accumulation de l'eau dans les andains sans toiture, et en période pluvieuse, et permet une circulation de l'air du bas vers la pointe du tas, par des mouvements de convections. Les dimensions des andains dépendent de la nature des matières à composter. Une matière bien structurée (broyat de déchets verts) permet de former des andains relativement hauts (jusqu'à 4 m). Il est néanmoins recommandé de ne guère dépasser 2 m de haut pour éviter les tassements trop importants susceptibles de limiter l'aération. De même, une limite de la largeur à 2 m à la base permet l'aération naturelle, nécessaire entre deux retournements.

La constitution de composts en forme de table est donc fortement déconseillée s'il n'y a pas d'abri contre les pluies, au moins dans la première moitié du compostage, car cette présentation capte toutes les eaux de pluie et ne permet pas l'aération naturelle.

La phase de compostage s'étale sur une période variable en fonction de la nature des matières à traiter et des conditions météorologiques. Pour des déchets verts, elle varie généralement de quatre à six mois. Durant cette période, plusieurs retournements sont effectués à l'aide de machines automotrices ou montées sur tracteur. Plus les andains sont hauts et larges, plus les retournements sont nécessaires et fréquents pour compenser la faiblesse de l'aération naturelle. De plus, cette compensation ne sera jamais suffisante et générera donc toujours des risques d'odeurs désagréables liées au manque d'air au cœur des andains.

Les retournements aident aussi à limiter la température de compostage qui ne devrait si possible pas dépasser 60°C, surtout pour ne pas trop réduire les populations microbiennes actives et aussi pour ne pas carboniser la matière organique, ce qui limite la dégradation ultérieure dans le sol et induit davantage de phytotoxicité, sans parler des risques accrus d'auto-inflammation.

4.1.9.1.3 La maturation

La maturation correspond à la phase finale du compostage qui se manifeste par une activité réduite du processus de compostage et qui n'est pas toujours bien distincte du compostage proprement dit. Durant cette phase, les retournements sont rares voire inexistantes étant donné les besoins théoriquement plus limités en oxygène. Malheureusement, le compostage n'est souvent pas totalement terminé lorsqu'on décide de stocker le compost pour la phase de maturation, ce qui induit des phénomènes d'anaérobiose qui engendrent encore des mauvaises odeurs, des produits phytotoxiques et de l'ammoniac. Durant cette phase, la matière est plus sèche ce qui entraîne un développement important d'organismes filamenteux qui poursuivent et complètent le processus de dégradation de molécules plus difficilement dégradables et notamment de nombreux composés phytotoxiques. C'est donc une étape importante dans la finition d'un bon compostage.

4.1.9.1.4 L'affinage

Cette étape consiste à cribler le compost afin de séparer les éléments grossiers et indésirables pour obtenir une fraction fine, à la granulométrie souhaitée, soit le produit fini ou compost. Différentes classes granulométriques peuvent être obtenues par l'utilisation de mailles de tamis différentes en fonction des utilisateurs du compost. Le compost fini est ensuite mis en tas avant évacuation.

Les refus de tamisage (partie retenue sur les tamis) sont soit remis en tête de la filière comme élément structurant, soit éliminés s'ils sont indésirables. Les refus sont intéressants pour augmenter la proportion de structurant lorsque les matières entrantes sont trop riches en éléments mous et de trop petites tailles. Ces refus se dégradent progressivement et finissent par être incorporés dans le compost final après plusieurs recyclages. Il faut cependant veiller à ce qu'il n'y ait pas d'accumulation progressive de ces refus. Le broyage initial devrait donc être réglé en conséquence et les refus peuvent y être broyés une seconde fois afin de bien s'intégrer dans le nouveau cycle.

Les refus posent également un problème si l'on veut mettre en place une traçabilité des matières puisqu'il y a, dans ce cas, mélange entre lots successifs. Il faudra dès lors les considérer comme d'autres matières premières.

4.1.9.2 Le compostage à ciel ouvert avec aération forcée

Dans ce cas-ci, l'aération est principalement assurée par un système constitué d'un ventilateur et de goulottes d'aération (ou de tuyaux amovibles) situées à la base des andains, permettant soit de souffler, soit d'aspirer dans les tas. Les retournements sont dès lors beaucoup plus rares mais ne devraient pas être absents, comme c'est le cas très souvent. En effet, même si l'aération fournie est théoriquement suffisante, sa distribution homogène est toujours problématique et il est toujours indispensable d'homogénéiser les tas de matières. S'il y a aspiration, l'air est traité par un bio-filtre spécifique ou par insufflation dans un tas de compost mûr, pour autant qu'il y en ait de disponibles, sans odeurs et ammoniac résiduels (ce qui est très difficile à trouver actuellement). Ces systèmes permettent alors de traiter les matières plus rapidement tout en contrôlant plus efficacement les émissions d'odeurs. Si l'air est insufflé dans les tas, la récupération et le traitement de l'air sortant est plus difficile à réaliser.

Etant donné l'oxygénation intense des tas, la dégradation des matières est plus rapide. Les durées d'aération forcée sont généralement de quatre à huit semaines, mais une période assez longue de maturation est nécessaire, si bien que la durée totale n'est que faiblement raccourcie si l'on veut obtenir un produit final de qualité.

4.1.9.3 Autres systèmes

Compostage en halls, en tunnels, en box, en réacteurs...ne seront pas détaillés ici, mais répondent aux mêmes critères généraux cités plus haut.

4.1.10 Description des mécanismes de contrôle des qualités de composts : proposition d'un label WALCO

Par comparaison avec le domaine alimentaire, il s'avère que la sécurité ne peut être réellement obtenue par l'analyse des produits finaux. Elle peut l'être, par contre, par la mise en place d'un système qui identifie les risques potentiels, propose une stratégie qui contrôle leur apparition et qui les prévient ou maîtrise leurs conséquences. Cette méthode préconisée pour limiter les consommations des produits alimentaires est appelée « Hazard Analysis and Control of Critical Points » (H.A.C.C.P.). Cette stratégie est transposable dans tous les domaines des activités humaines et, pour ce qui nous concerne, elle pourrait être rebaptisée P.A.C.C.P. (Process Analysis and Control of Critical Points), le « process » devant être pris au sens large, englobant toutes les filières entièrement depuis les matières premières jusqu'à la valorisation des matières sur les sols.

Il est néanmoins prématuré de vouloir décrire une stratégie précise adaptée aux filières de valorisation des matières recyclables parce que l'objet final, c'est-à-dire le sol, est également soumis à des sollicitations qui échappent à l'objet de ce travail mais dès que possible, elles devraient être intégrées dans une approche « qualité par la maîtrise des risques » des utilisations des sols.

De plus, l'approche systémique qui serait nécessaire pour maîtriser toute une filière, est elle-même dépendante d'une approche « globale » des déchets, des produits recyclables ou des produits utilisables sur les sols. Il faudrait donc définir des stratégies de valorisation des différents déchets et matières avant de préciser les filières recommandables pour y parvenir. Cependant, nos connaissances sur de nombreux déchets sont encore très partielles, tant du point de vue qualitatif que quantitatif et, si l'on sait que les matières organiques vont manquer pour reconstituer l'humus des sols wallons, qu'il y a encore de la place pour des matières azotées, qu'il existe des matières organiques difficiles à valoriser.... on ne peut encore clairement organiser les filières de meilleure valorisation des matières disponibles et les productions des matières complémentaires qui seraient nécessaires (ex. matières structurantes riches en carbone, comme les déchets végétaux).

La mise en place concrète est à adapter à chaque système et nécessite la constitution d'une « équipe qualité » interne à l'exploitation mais appuyée, guidée et contrôlée par des experts externes.

Les matières compostées qui ont été produites dans un système « qualité » mériteraient une reconnaissance, par exemple sous la forme d'un label que l'on pourrait baptiser "WALCO".

Ce label pourrait être calqué sur celui du VLACO pour la Flandre mais devrait être complété par la prise en compte des semences de plantes adventices, des germes pathogènes animaux et phytopathogènes par l'intermédiaire d'indicateurs restant à définir. Il devrait aussi cerner plus sévèrement la phytotoxicité du produit et les polluants acceptés. En outre, il est d'ores et déjà certain que la formalisation de ce label devra faire l'objet d'un consensus après concertation de tous les partenaires potentiels. De même, la réglementation devra favoriser la mise en place de systèmes d'assurance qualité couvrant progressivement l'ensemble des processus et basée, entre autres, sur l'analyse de risques.

4.1.11 Qualité des composts

Les déchets verts font l'objet d'un traitement à grande échelle en Wallonie et ailleurs, ainsi qu'une partie des effluents d'élevages. Par contre, la collecte et le traitement des matières organiques facilement fermentescibles des ordures n'en étant qu'à leurs débuts, il existe très peu d'installations pour traiter ces matières.

Les centres de compostage en Région wallonne sont, dans la grande majorité des cas, des centres de traitement à ciel ouvert avec retournements et/ou aération forcée, parfois avec traitement de l'air sur biofiltre.

Les composts produits en Wallonie font encore l'objet de reproches formulés par certains utilisateurs (pépiniéristes, horticulteurs...) concernant notamment le manque de maturité. Pour développer la valorisation des composts au travers des filières horticoles et des entreprises de jardins des efforts (cf. plus loin) devront donc encore être faits afin, entre autres, d'obtenir du compost mûr et une bonne hygiénisation.

Si la démarche visant à formuler les améliorations à effectuer au niveau de chacune des installations de traitement existantes semble délicate, il apparaît néanmoins indispensable, dans un premier temps, de modifier les sites de traitement existants pour tendre vers « des centres de compostage idéaux » soit des unités qui permettraient de traiter des matières organiques à grande échelle, qui tiendrait compte des critères économiques, techniques et environnementaux tout en produisant, à un coût raisonnable, un compost de qualité. Ces usines permettraient d'assurer plus facilement également une **bonne traçabilité des matières premières** et les coûts analytiques seraient plus largement amortis. Chacune des étapes de la filière « idéale » doit être décrite avec précision et faire l'objet **d'une maîtrise des risques** de façon détaillée. Elles visent principalement :

- _ le stockage des matières premières chez les fournisseurs ;
- _ le transport ;
- _ la réception de la matière sur le site de compostage ;
- _ la pesée ;
- _ le déchargement ;
- _ le broyage ;
- _ le mélange de matières complémentaires dans le processus de compostage ;
- _ la manière dont la matière est disposée pour la phase aérée ;
- _ le traitement aérobie intense, devant supprimer les odeurs désagréables ;
- _ le suivi de la matière jusqu'au destinataire (à définir) ;
- _ la tenue de registres et comptes.

Le nombre et la localisation de ces unités devraient encore faire l'objet d'une étude en fonction des choix stratégiques effectués.

4.1.12 Entreposage du compost

Lorsque les différentes conditions permettant d'obtenir un compost de bonne qualité sont suivies, son stockage en attente de la période d'épandage se révèle sans risque pour l'environnement et pour le compost lui-même.

En effet, contrairement aux matières brutes ou issues de la biométhanisation, le compostage bien réalisé génère un produit stabilisé qui peut subir des réhydratations sans dommages et être entreposé dans des conditions rustiques.

4.2 Biométhanisation

4.2.1 Généralités

Le processus doit se dérouler en quatre étapes (hydrolyse, acidogénèse, acétogénèse et méthanisation), toutes se déroulant en absence d'air. Les trois premières correspondent à une acidification préalable tandis que la dernière ne peut se passer en milieu acide mais exige un milieu à pH neutre. Ces différentes étapes, qui font appel à des familles de bactéries différentes et des conditions écologiques opposées devraient donc idéalement se dérouler dans des cuves distinctes, ce qui n'est que très rarement le cas pour des raisons d'économie d'installation surtout. La plupart des problèmes de fonctionnement sont dus à cette incompatibilité entre phases qui amène à une acidification qui bloque la méthanisation. La dissociation se justifie moins et serait d'ailleurs difficile à réaliser pour la biométhanisation en phase solide.

Un digesteur, ou méthaniseur, est une enceinte fermée dans laquelle les matières organiques sont soumises à l'action des bactéries différentes en absence d'oxygène permettant la succession des différentes phases. Cette application est très répandue en France en équipement des stations d'épuration urbaines.

La technologie la plus courante et la plus ancienne est celle du digesteur « infiniment mélangé » (solide dans une phase liquide) dans lequel le brassage est assuré par un moyen hydraulique ou, mieux, par recirculation du biogaz. Ce type de digesteur fonctionne généralement vers 35°C (mésophilie) mais est possible vers 55°C (thermophilie, plus rapide et avec de meilleurs rendements en méthane). Il a connu un certain nombre d'améliorations au cours de ces dernières années. On peut le faire précéder d'un « hydropulpeur », cuve métallique équipée d'une hélice centrale qui fait éclater les cellules végétales et met le déchet en suspension dans l'eau recyclée du process. Les déchets légers éventuels (plastiques, textile, ...) flottent à la surface et sont récupérés par un peigne hydraulique ; les éléments lourds minéraux (verre, cailloux, os, ...) décanent et sont extraits par le bas. La pulpe liquide ainsi produite passe ensuite dans un hydrocyclone qui enlève les particules fines sableuses et abrasives.

Ensuite sont arrivés les digesteurs dits de seconde génération qui utilisent la technique des cellules fixées (ou encore « Filtre anaérobie »). La vitesse de fermentation étant proportionnelle à la masse de bactéries présentes, elle est limitée dans la technique précédente par le fait que la majorité des bactéries sont éliminées avec le digestat, des bactéries ne peuvent se fixer que sur les parois du réacteur. D'où l'idée - venue de France et d'Irlande - d'augmenter la surface de vie des bactéries en introduisant un support de grande surface spécifique. Le support est constitué par exemple d'anneaux de plastique en vrac et l'arrosage s'effectue par le haut. On trouve aussi le procédé UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) dans lequel le support biologique est en suspension dans le flux ascendant. Les avantages sont, par rapport à l'ancienne technique : fermentation beaucoup plus rapide (quelques heures à quelques jours au lieu de deux semaines), possibilité d'accélérer encore le processus en adoptant la fermentation thermophile, productivité supérieure, multipliée par 4 à 10, biogaz plus riche en méthane (jusqu'à plus de 80%), taille réduite et donc investissement moindre.

Enfin, pour des matières solides, un procédé en phase solide a été développé depuis une vingtaine d'années qui réduit la production de liquides secondaires difficiles à gérer. Malgré une durée importante de méthanisation, la décomposition n'est pas aussi complète qu'en milieu liquide.

Les digestats de biométhanisation nécessitent un traitement complémentaire des matières par aération, si possible en rajoutant du carbone pour éviter un excès d'azote préjudiciable aux sols et aux eaux souterraines.

4.2.2 Biométhanisation des ordures ménagères.

Il existe désormais 5 ou 6 procédés industriels différents en course.

« Un procédé ancien et bien connu est en réalité une filière complète et intégrée de traitement des déchets ménagers, qui inclut (ou peut inclure suivant les cas) un tri des déchets à l'entrée, une méthanisation de la part fermentescible, un compostage du résidu de fermentation, une incinération des refus de tri combustibles et une mise à la décharge des résidus ultimes (refus de tri non combustibles, résidus d'incinération). Outre son caractère intégré, l'originalité du procédé repose sur le digesteur sans pièce mobile interne, qui assure l'hydrolyse et la méthanisation dans une seule enceinte et qui permet de traiter des déchets presque secs (digestion en milieu concentré), ce qui réduit l'encombrement, le coût et l'autoconsommation d'énergie des équipements. »

« Il est vrai que les résultats économiques ne sont pas à la hauteur des espoirs initiaux : part plus importante que prévu mise en décharge, valorisation moins intéressante du biogaz, et surtout valorisation nulle du compost qui contient encore des résidus divers ayant échappé au tri, ce qui le rend impropre à une bonne commercialisation. La solution serait de trier les déchets à la source de façon à n'introduire dans l'usine que des matières fermentescibles (déchets de cuisines et de jardin). Dans la première, le méthane produit est introduit dans le réseau de gaz de la ville ; dans la seconde, il est valorisé sous forme d'électricité (940 kWe). » Le digestat étant contaminé par les autres déchets, il est de qualité médiocre et les conditions de compostage ultérieur ne sont pas non plus idéales. »

On peut conclure que :

Pour obtenir un produit correct, la matière de départ doit être de très bonne qualité puisqu'il y a concentration des matières non dégradées, notamment les plastiques mais aussi métaux, certains MPO récalcitrants et certains pathogènes.

Le besoin en énergie doit être réel à proximité des installations afin de valoriser au mieux l'énergie et de dépendre le moins possible des producteurs d'électricité qui chercheront naturellement l'autonomie plutôt que l'aliénation à de petits producteurs ne présentant pas à leurs yeux une fiabilité suffisante.

Diverses expériences en Europe incitent à la prudence, étant donné qu'après un engouement passager, les difficultés apparues ont inversé les positions sur le sujet.

4.2.3 La co-méthanisation centralisée

« L'idée de la codigestion collective et centralisée de biomasses agricoles est née au Danemark et a été mise en application dès 1988 grâce au soutien du gouvernement. Elle consiste à collecter dans le voisinage des lisiers et fumiers agricoles ainsi que des déchets organiques industriels divers, éventuellement des boues de stations d'épuration et des ordures ménagères, et à les méthaniser ensemble. Les fermes qui fournissent la matière première récupèrent une partie du lisier digéré en tant qu'amendement organique, le reste étant vendu comme engrais à des cultures céréalières. Le biogaz produit est valorisé sous plusieurs formes (chaleur, électricité, gaz de réseau). »

NDR : L'alternance des saisons et des pratiques de l'élevage peuvent modifier la disponibilité des « effluents » d'élevages. Ceci implique de trouver des sources alternatives d'alimentation, ce qui n'est pas fréquemment réalisable et rarement prévu au départ. Le stockage des matières en attente n'est pas une solution car une fermentation naturelle inévitable se déroulera spontanément en dehors du réacteur avec son cortège de nuisances à gérer.

«Les dix premières unités construites ont fait l'objet, en 1995, d'une évaluation technico-économique de la part des ministères danois de l'Energie, de l'Agriculture et de l'Environnement. L'objet ultime de cette étude était de savoir si ces unités allaient pouvoir bientôt se passer de subventions. Ce n'est pas encore le cas, mais le taux d'aide a quand même été abaissé à 20% en 1997. Il convient néanmoins d'ajouter qu'au Danemark, les sources d'énergies renouvelables sont exemptées de taxes et que leurs producteurs perçoivent même une partie des taxes pesant sur les combustibles fossiles, ce qui confère au biogaz une valeur marchande de l'ordre de 0,25 Euro/m³ (à 65% de méthane). L'étude a montré que les performances des unités allaient croissant, que la production de méthane augmentait et que la productivité (production de méthane par m³ de réacteur et par jour) dépassait largement les chiffres prévus. Ces performances sont cependant liées à la présence des déchets industriels à forte teneur en matières organiques fermentescibles, ce qui pose le problème de la pérennité de leur fourniture. **Le gouvernement danois se repose donc la question du développement à donner au « biogaz à la ferme », qui éviterait en outre les transports de matières pénalisants pour l'économie des projets.** »

Cette installation est actuellement à l'arrêt, faute de soutien gouvernemental qui ne croit plus à cette filière de biométhanisation centralisée des déchets ménagers.

Le rapprochement, pour ne pas dire la réunion, des intérêts de la société pour la saine gestion de ses déchets de ceux des agriculteurs permettrait sans doute de mieux rentabiliser la filière, et peut-être même de la rendre financièrement autonome.

4.2.4 La méthanisation à la ferme

« Ce fut, en Europe du moins, un rêve des années 70 qui, comme beaucoup d'autres en matière d'énergies renouvelables, a abouti à un échec. En résumé, on a voulu aller trop vite, sans avoir acquis au préalable la culture nécessaire de la technicité. Sur la centaine d'installations construites en France, par exemple, une dizaine seulement ont survécu. La situation est la même dans les autres pays d'Europe; les programmes internationaux lancés en Afrique et en Amérique Latine n'ont pas eu le succès escompté, malgré un argument convaincant : la production de biogaz devait y ralentir la déforestation et la désertification.

Par contre, en Chine, en Inde, et au Népal, des milliers de digesteurs sont en fonctionnement. Il faut dire que la Chine et l'Inde possédaient une culture technique de la méthanisation depuis les années 30 et que les recherches sur ce thème n'y ont jamais été interrompues. Il faut ajouter que, dans ces trois pays, les gouvernements se sont impliqués en apportant des aides : subventions à l'investissement et prêts à taux préférentiels en Inde et au Népal, allocation de main d'œuvre gratuite en Chine (la « Time Tax »). Le développement de la méthanisation à la ferme s'est pourtant déroulé de façon très différente d'un pays à l'autre. »

Il est important d'envisager une utilisation rationnelle de l'énergie produite. Il n'est pas rare, en effet, de produire du biogaz qui est brûlé ensuite dans une torchère, ou qui est converti en électricité à un moment de la journée où la demande est faible... Donc, une infrastructure de production d'énergie doit être envisagée afin que chaque mètre cube de biogaz produit soit valorisé au mieux. Dans cet objectif, il est possible d'envisager trois destinations complémentaires du biogaz : stockage et utilisation dans l'installation, production et vente d'électricité lorsque le besoin en électricité se fait sentir (heures de pointe), enfin l'utilisation en tant que combustible sous forme de gaz comprimé pourrait être promue, ne fut-ce que pour les véhicules de l'exploitation.

Une étude technico-économique serait nécessaire pour évaluer l'intérêt et la faisabilité de la mise en bonbonnes du biogaz.

4.3 Installations de traitement des matières organiques en RW

Les installations des intercommunales, des privés, des communes et des agriculteurs ont été inventoriées, géoréférencées et caractérisées dans l'étude DGRNE.

Les centres de traitement qui ont été prospectés, décrits et caractérisés, sont repris dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Liste des centres de traitement prospectés et leur capacité (DGRNE, 2002)

Centre de compostage de Naninne	12.000 t
Centres de co-compostage de Habay et Tenneville	2 x 35.000 t
Centre de compostage d'Ittre	9.000 t
Centre de compostage Basse-Wavre	12.000 t
Centre de co-compostage RECYTERRE	8.000 t
Installation de broyage de l'ICDI	
Centre de compostage de Jeneffe	15.000 t
Centre de compostage de Soumagne	5.000 t
Centre de compostage de Thumaide	12.000 t
Centre de compostage de Lavaert	72.000 t
Centre de co-compostage d'Agri-compost	100.000 t
Centre de compostage de Valovert	20.000 t
Centre de compostage du groupe Shanks	16.500 t
Centre de compostage de Soneville	15.000 t
Centre de compostage de Sodecom	60.000 t
Centre de co-compostage de Sede	35.000 t
Centre de co-compostage de Gabco	pilote
CAPACITE TOTALE APPROXIMATIVE	460.000 t

La capacité totale installée en 2001 est donc bien inférieure à celle du gisement recensé aujourd'hui et à ce qui serait potentiellement nécessaire si tous les déchets organiques étaient compostés (2.500.000 t). **Il semble donc utile de promouvoir la construction d'installation de traitements des déchets organiques en Wallonie, même si toutes les matières ne nécessitent pas un compostage, mais le développement pourrait se faire en grande partie pour toutes les matières au niveau des fermes, à proximité de la naissance des matières premières et des utilisateurs des produits finis (matière organique stabilisée et énergie).**

Les installations de traitement communales ont été identifiées au terme d'une enquête exhaustive menée auprès des 262 communes de Wallonie en fin 2001. Parmi les 186 ayant donné suite au questionnaire, il s'est avéré que le compostage des déchets verts communaux est pratiqué dans près de 22 communes wallonnes :

Tableau 4 : Communes avec compostage communal des déchets verts (DGRNE, 2002)

Viroinval	Chastre	Waimes	Blégny	Liège	Pecq
Chaumont-Gistoux	Nivelles	Esneux	Eupen	Neupré	Peruwelz
Orp-Jauche	Aiseau-Presles	Flémalle	Fléron	Lincent	
Châtelet	Pont-à-Celles	Herve	Huy	Saint-Georges	

Au niveau communal, le procédé de compostage est généralement peu développé technologiquement et consiste en un broyage et une mise en tas des déchets verts, issus des services travaux des communes. Les retournements nécessaires et l'humidification préalable ne sont pas toujours réalisés ce qui engendre des temps de compostage relativement longs, et dès lors, les produits terminaux ne sont pas toujours de vrais composts.

Les installations relevant d'exploitations agricoles privées ont, elles, été renseignées par les responsables d'organismes tels que Agra-ost et Erbe. Il est apparu ainsi que si certains agriculteurs réalisent le compostage de leurs effluents d'élevages, il s'agit généralement de fumiers de bovins. Le compostage consiste en une mise en andains le long des champs, les retournements sont réalisés à l'aide d'une retourneuse tractée de type « Ménard », une à deux fois avant l'utilisation. L'inventaire des agriculteurs effectuant ce type de compostage a donc été réalisé sur base des listes des clients d'entrepreneurs possédant ce type de machine. Un total de 211 sites ont été répertoriés en 2002 et, parmi ceux-ci 138 ont pu faire l'objet d'une estimation quantitative qui s'élève à un total de 63.907 tonnes d'effluents compostés.

Pour ce type de pratiques rudimentaires de compostage, on peut se poser des questions sur la nature et la qualité des produits obtenus, mais un compostage partiel est préférable à une absence totale de traitement.

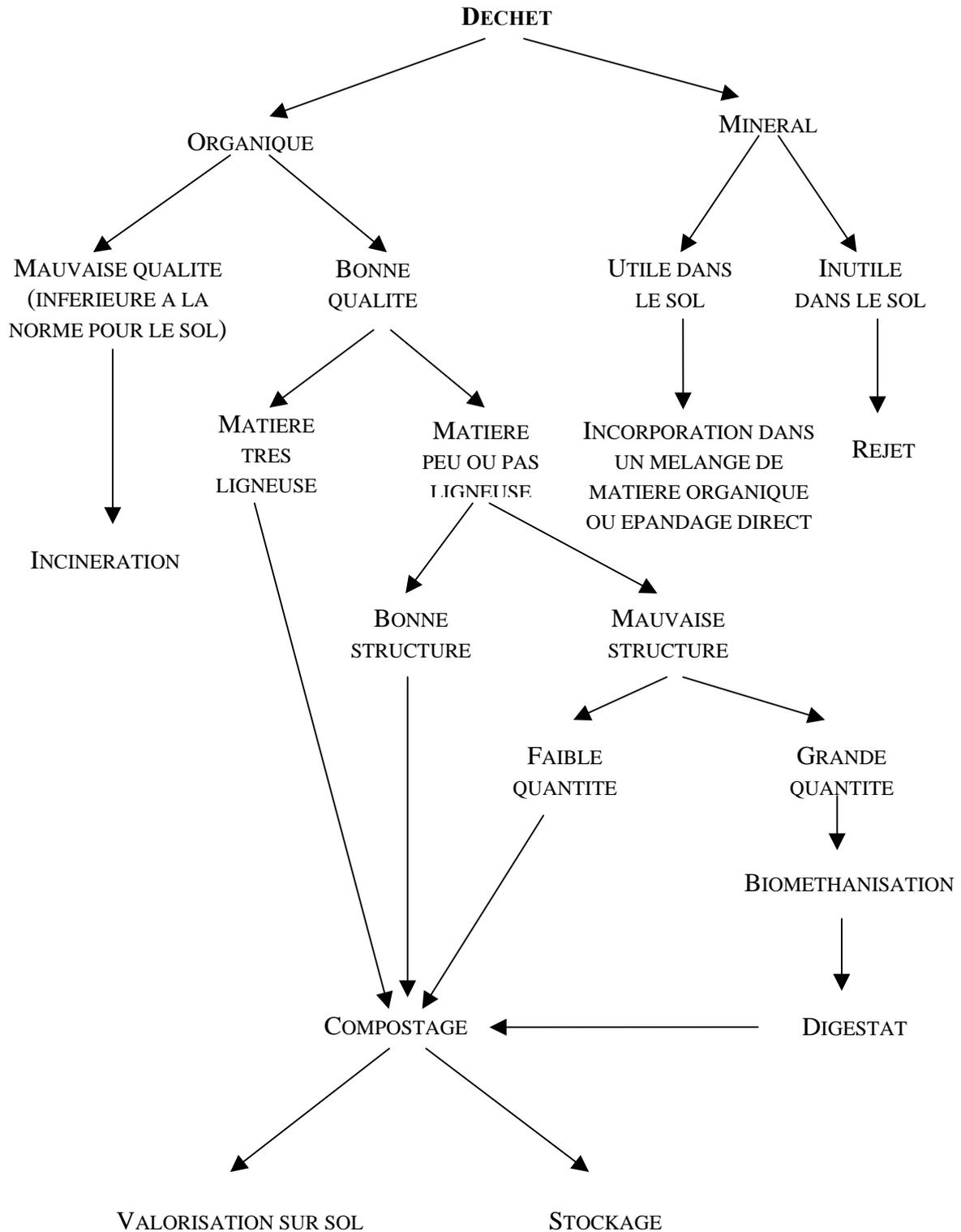
4.4 Couverture des risques

A l'heure de la prise de conscience des multiples risques liés à l'utilisation et à l'épandage sur les sols des matières diverses, de qualité non maîtrisée, faut-il encore envisager une telle protection par assurances ? Un système d'assurances ou de garantie a le mérite de susciter la réflexion sur les problèmes et d'obliger à déterminer les responsabilités des divers acteurs, ce qui permet déjà de baliser les filières et de limiter d'éventuels excès. Rien que de ce point de vue, un système d'assurances-garantie est justifié. Même si l'on arrive, dans le futur, par tout un système de techniques adéquates, à mettre en place des filières sécurisées et maîtrisées, on ne peut exclure un accident, rare, fortuit, mais possible et dont le gestionnaire du sol récepteur ne devrait pas supporter seul les conséquences.

Dès lors, il paraît recommandable de mettre en place un système d'assurance privée prise par le producteur et le fournisseur du produit à appliquer sur le sol, à compléter par un cautionnement en fonction de l'entreprise productrice du déchet, qui obligerait tous les acteurs à maîtriser leurs interventions dans le cadre des responsabilités clairement définies et qui disponibiliserait les moyens de remédier, autant que possible, à une dégradation du sol ou de l'environnement consécutive à un apport donné ou à une série de pratiques dommageables. Cette assurance devrait être une condition pour obtenir l'agrément en tant que producteur reconnu de déchets valorisables sur les sols.

4.5 Diagramme de choix de filières

Diagramme de choix de filières de valorisation des déchets



5 Position des agriculteurs et des autres parties prenantes sur la valorisation agricole des déchets organiques

Outre les agriculteurs, les autres parties prenantes sont principalement les producteurs d'eau et les industriels agro-alimentaires (FEVIA, SUBEL).

5.1 Protection des sols

La protection des sols est évidemment fondamentale puisque le sol est le support principal de l'activité agricole et du paysage naturel. Il constitue, de plus, la matrice nourricière de nos aliments et joue le rôle de filtre actif principal dans la protection des eaux souterraines. La matière organique assure une fonction structurante et amplifie les activités biologiques qui captent les matières qui migrent dans le sol

5.1.1 Point de vue français sur la valorisation des boues des stations d'épuration

« Dans une étude récente, la méthodologie retenue visait à comparer dix filières d'élimination des boues urbaines communément rencontrées en France.

Sur la base des comparaisons des filières développées dans ce rapport, on peut tirer les enseignements suivants:

La mise en décharge est une voie d'élimination appelée à se réduire fortement, du fait de la réglementation. Cette solution présente plutôt des inconvénients par rapport aux autres voies d'élimination, notamment en termes environnementaux (effet de serre, dispersion de substances toxiques dans l'air, acidification) et économiques (la plus chère des quatre solutions étudiées pour les stations > à 50.000 EH).

La connaissance des risques sanitaires liés aux éléments-trace (organiques et métalliques) présente encore des lacunes, surtout pour l'incinération et la mise en décharge. Parallèlement, quelle que soit la filière, le risque nul n'existe pas.

Il faut donc rappeler la **nécessité de mettre en œuvre les moyens nécessaires à la réduction des pollutions à la source** (réduction de la teneur en éléments-traces métalliques et organiques) et à l'amélioration de la performance des filières (modernisation des équipements de traitement et professionnalisation des pratiques). Ces moyens sont notamment le renforcement de la police des réseaux et le développement de technologies et de produits propres (approche préventive de maîtrise des rejets dans le réseau), ainsi que le contrôle du respect de la réglementation. »

NDR : Plutôt que renforcer les contrôles de police, il serait souhaitable d'identifier les sources contaminantes et de proposer des moyens de les réduire.

L'appui technique et financier aux responsables de ces pollutions souvent involontaires, serait un atout majeur dans la réussite de cette politique de prévention des pollutions des eaux.

De plus, afin de garantir la meilleure protection des sols et des apports aux plantes compatibles avec leurs besoins réels, il faut, outre la sécurisation des matières épandables ciblées plus haut, une totale maîtrise, quantitativement et qualitativement, des épandages sur les sols.

Dans cet objectif, il pourrait être proposé aux agriculteurs de **gérer informatiquement leurs prévisions d'épandages**. Ce « **plan d'épandages** » serait basé sur un logiciel prenant en compte, au niveau de chaque parcelle, les apports des années précédentes en MO, en azote, en les divers ETM, en calcium, etc. .,. Toutes ces données seraient enregistrées dans un « **registre d'épandages** » mis à jour chaque année après les épandages concrètement réalisés de l'année. Donc, le « plan d'épandage » serait réalisé avec l'appui d'un conseiller agronome, qui pourrait gérer les logiciels adéquats, et donner automatiquement les conseils sur les limites à ne pas dépasser pour les éléments à risques, dont l'azote et les ETM. Bien que cela puisse être pris comme une perte d'autonomie, cette façon de faire représente un gain immense pour le petit agriculteur, ce qui lui garantit une gestion optimale à long terme de la qualité pour ses sols et ses cultures qu'il ne pourra pas éviter dans le futur de toute façon.

Le registre, mis à jour chaque année, pourrait alimenter le « cadastre des épandages », utilisé au niveau de l'Administration de la Région wallonne qui permettrait de gérer et contrôler les flux des matières recyclables et de connaître à tout moment et en tout lieu le statut de sols en MO, en azote, en ETM, en phosphore...etc. de tous les sols cultivés de Wallonie.

Il serait opportun de profiter de cette gestion informatique des données sur les apports sur les sols pour unifier et simplifier toutes les déclarations obligatoires actuelles des agriculteurs qui ne feraient plus l'objet que d'une seule déclaration informatisée et réalisée par voie informatique avec l'aide d'un technicien spécialisé.

Enfin, les multiples aspects de la gestion des déchets et de l'épandage des matières recyclables nécessitent une vigilance et une adaptation continue des mesures et paramètres de contrôles, tant au niveau des sols qu'au niveau des déchets en amont.

Dans cet objectif, il est souhaitable de mettre en place une structure constituée de responsables de l'Administration de la Région wallonne, de scientifiques, de gestionnaires de l'environnement et d'hommes de terrain, que l'on pourrait appeler « Observatoire des sols et des MO. ».

Ce dernier aurait pour mission, outre la vigilance sur les productions de matières organiques diverses et la protection des sols, de suivre ce qui se fait dans les autres pays, de diffuser les connaissances nouvelles et de proposer des modifications adéquates dans le but de réduire les déchets et ses contaminants et de mieux protéger les sols pour le très long terme.

Il est utile ici de signaler que l'UE prépare une directive cadre sur les sols pour la fin 2005.

5.1.2 Déchets des industries agroalimentaires

La FEVIA (Fédération de l'Industrie Alimentaire) regroupe environ 200 membres et 26 groupements d'industries. Ces groupements rassemblent les entreprises spécifiques d'un secteur particulier. Le nombre total d'entreprises chapeautées par la FEVIA est estimé à plus ou moins 800. Si la FEVIA dispose d'informations concernant les producteurs de la Belgique entière, des données spécifiques à la Région wallonne ne sont pas disponibles.

En Belgique, les flux connexes de l'industrie agroalimentaire, c'est-à-dire ceux qui ne sont pas éliminés en incinérateur ou en CET, sont majoritairement recyclés dans des procédures de fabrication telles que les nourritures animales (73 %).

Les groupements membres de la FEVIA et rassemblant des industries susceptibles de produire des déchets organiques ont été contactés afin d'obtenir de plus amples renseignements. La situation pour les différents groupements contactés, affiliés à la FEVIA, peut être résumée dans le tableau 5.

Ces résultats indiquent qu'au niveau des industries alimentaires et agroalimentaires, les productions de déchets organiques sont inconnues sauf dans le cas de l'industrie sucrière où la fédération SUBEL dispose de beaucoup d'informations. Dans les autres cas, les informations doivent être collectées au cas par cas avec un taux de réponse relativement faible. Il serait souhaitable que les fédérations assurent elles-mêmes cette collecte de données.

5.1.3 Gisements issus des dossiers de demande de certificats d'autorisation de valorisation de matières en agriculture (DGRNE, 2002)

Les entreprises souhaitant valoriser un sous-produit en agriculture doivent introduire un dossier de demande auprès de l'OWD. Ce dossier contient des informations concernant la quantité et la qualité de la matière.

Ces dossiers de demande de certification ont fait l'objet d'une analyse particulière et les matières ont été quantifiées et caractérisées. Les données sont agrégées par type d'industries dans le tableau 5 qui suit.

Tableau 5 : Quantités de déchets organiques provenant des industries

Secteur d'activité	Quantité (t MB)	Quantité (t MS)
Amendements organiques	111.480	44.762
Industries agroalimentaires :		
Alimentation	62.693	4.275
Boissons	16.389	4.249
Brasseries	15.821	4.477
Fructoseries	28.500	17.100
Produits laitiers	14.660	1.179
Sucreries	284.500	170.700
Papeteries	78.000	40.221
Sous-produits calcaires	95.845	38.061
Divers	65.630	26.985
Total	773.518	352.009

Tous les membres de la FEVIA étant producteurs d'un grand volume de déchets organiques de bonne qualité, il est clair que cette organisation défend la valorisation agricole de ses déchets.

Par contre, en partie pour des craintes de concurrence, et en partie pour des raisons de préservation d'images de marque dans l'agro-alimentaire, la FEVIA exerce une pression sur les agriculteurs afin de ne pas utiliser des déchets supposés à risque dont principalement les boues d'épuration.

Suite à de nombreuses confrontations d'idées, notamment dans le contexte de la plateforme de discussions sous l'égide d'Aquawal en 2002, il est apparu que la FEVIA et SUBEL, sont disposées à revoir leurs exigences vis-à-vis des agriculteurs, si les matières appliquées aux sols sont issues d'une filière dont la traçabilité est garantie et dont les risques ont été maîtrisés. La SUBEL applique déjà avec succès depuis quelques années cette stratégie sécurisante pour toute la filière sucrière depuis la production jusqu'à l'utilisation des matières sur les sols.

5.2 Protection des eaux souterraines

5.2.1 Risques liés à l'azote excédentaire et facilement lessivable

Le rôle important de la matière organique a déjà été souligné plus haut. Celle-ci stimule la croissance des micro-organismes qui cherchent de l'azote pour leur développement et captent quasi tout l'azote qui passe à proximité pour autant qu'il y aie suffisamment de matières organiques comme source d'énergie.

Point de vue français sur la pollution des nappes souterraines :

« Le Réseau de suivi de la qualité des Eaux Souterraines du bassin Seine-Normandie (AESN) existe depuis 1997. Le réseau met en évidence deux facteurs majeurs de préoccupation pour les nappes : leurs teneurs en nitrates et en micro-polluants - particulièrement en pesticides. Ces contaminations sont essentiellement liées à la pollution diffuse agricole.

Dans certaines zones sensibles (calcaires), le constat effectué (cf. nitrates et pesticides) sur l'évolution de la qualité des eaux souterraines est très préoccupant. Rien ne permet d'espérer une inversion généralisée de tendance à court ou moyen terme compte tenu :

- des flux en cours de migration dans le milieu non-saturé,
- de la lenteur du transit vers les nappes,
- des faibles superficies concernées par la fertilisation raisonnée,
- des reliquats mobilisables importants qu'induisent les systèmes de cultures actuels (Sources: Bilan VIIe programme AESN). »

« Si localement des infiltrations directes d'eaux usées (industrielles ou domestiques), et de ruissellement en zone agricole, par des points de communication préférentiels entre la surface et les nappes sont apparus responsables des pollutions ponctuelles en nitrates sur le Bassin Seine-Normandie, l'enrichissement des eaux en nitrates résulte le plus souvent de pollutions diffuses liées à la percolation des eaux de pluie à travers les sols cultivés. Les nitrates du Bassin Seine-Normandie sont alors principalement d'origine agricole. On constate depuis de nombreuses années une augmentation des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Or l'élimination naturelle de ces molécules est relativement faible. De fait, cette pollution diffuse peut atteindre des concentrations élevées et constitue un phénomène récurrent (pollution de fond).

En 2001, sur 414 captages, un tiers des captages du réseau montrent une eau de composition naturelle ou proche de l'état naturel (< 20 mg/l), un tiers montre une dégradation significative (20 à 40 mg/l) et l'autre tiers montre une dégradation importante ou très importante de l'eau (> 40 mg/l NO₃).

On note donc une dégradation progressive de la qualité des eaux vis-à-vis des nitrates. Les niveaux inférieurs à 20 mg/l diminuent d'année en année, alors que le niveau supérieur à 40 mg/l progresse. »

5.2.2 Autres constats.

Ce constat sur les régions calcaires de France est assez bien applicable globalement à la région wallonne, où l'on voit progressivement monter le taux de nitrates et pas uniquement en zones calcaires.

Un étude américaine récente a montré une progression parallèle des nitrates et d'un pesticide (atrazine) sur une profondeur de 60 mètres en 40 ans pour les nitrates et 30 m en 20 ans pour l'atrazine soit à la vitesse commune d'environ 1,5 m/an.

D'autres études montrent aussi la descente vers les nappes d'autres pesticides comme le glyphosate. Sa progression est facile et rapide dans les sols pauvres en matières organiques et donc avec des activités biologiques faibles. Il n'en est probablement pas de même dans les sols biologiquement actifs, mais on ne dispose pas de données concrètes actuellement, faute de moyens de recherches sur ces sujets.

Il s'avère donc que les meilleurs sols ne sont pas des filtres éternels et ne peuvent fournir éternellement une barrière contre la percolation de polluants.

Il est donc fondamental pour le futur de mieux connaître les limites protectrices du sol dans le long terme et de définir ses capacités à gérer les pollutions superficielles.

Avant de conclure, une dernière précision doit être apportée quant aux recommandations de la "Directive Nitrates". En effet, celles-ci ne recouvrent qu'une partie des pratiques recommandables pour l'utilisation de matières recyclables dans les sols. La limitation des apports en fonction de plafonds en azote est un point positif mais bien insuffisant.

D'une part, de nombreux polluants potentiels sont à prendre en compte comme les ETM, les micro-organismes pathogènes et les micropolluants organiques très peu biodégradables.

D'autre part, les principes préconisés dans le code de bonnes pratiques, vont, peut-être, limiter partiellement les migrations d'azote vers les eaux souterraines mais certainement pas les arrêter. Que peut-on proposer de plus?

On peut dire que les zones de protection rapprochée des captages sont parfois trop limitées et une révision mériterait l'attention.

Il est évident que pour nourrir directement les plantes à partir d'apports azotés, il faut apporter l'azote de manière homogène sur la surface du sol. Or, comme il existe des espaces libres entre plantes et entre leurs racines, seulement une partie du sol sera exploitée par celles-ci, et dans les zones sans ou avec peu de racines, l'azote excédentaire sera lessivé après oxydation préalable en nitrites et nitrates.

En conséquence, vouloir nourrir directement les cultures en azote sans pertes, relève de l'utopie. La seule alternative envisageable est d'apporter l'azote sous forme lentement minéralisable (azote organique) et avec suffisamment de carbone (rapport C/N > 15 ou 20) pour entraîner un développement de la microflore du sol qui captera l'azote non utilisé par les plantes et leur restituera au gré des multiples remaniements des formes azotées du sol.

Ces propositions de révision du code de bonnes pratiques agricoles paraissent fortement justifiées dans le développement des mentalités actuelles de la population qui tolère de moins en moins les écarts par rapport à la protection de l'environnement. Une prise en mains sérieuse des problèmes environnementaux n'est pas incompatible avec les intérêts des agriculteurs mais, au contraire, motivera ceux-ci dans leur rôle de gestionnaires de notre patrimoine environnemental et de producteurs de nourriture saine. Cela ne peut que ressusciter des vocations et créer de nouvelles activités et des emplois nouveaux dans l'agriculture au sens large et dans la préservation de notre patrimoine commun.

6 Proposition d'améliorations des techniques de transformation des matières organiques

6.1 Nécessité d'une bonne connaissance des matières

Quel que soit le processus à mettre en œuvre, il faut d'abord bien connaître les matières à traiter, qualitativement et quantitativement ainsi que les filières qui les génèrent.

Au risque de lasser à le répéter, seule la maîtrise des risques permettra de fiabiliser les productions, le transport et la transformation et l'utilisation des matières destinées à être valorisées sur les sols.

Cette maîtrise des filières et des produits prendra quelques années et ne doit pas handicaper entre-temps la valorisation agricole des matières de bonne qualité.

Il faut donc, actuellement encore, se baser sur les analyses multiples des lots de matières, afin de mieux les connaître et de réduire les risques.

Les risques à prendre en compte sont de nature chimique (ETM, MPO, radioactivité), ou biologique (micro-organismes pathogènes, œufs de parasites, gènes recombinants à risques).

Les processus de traitement biologique peuvent réduire ou éliminer certains de ces risques.

Les éléments trace métalliques et la radioactivité ne sont nullement réduits mais ils sont au contraire augmentés par l'effet de concentration dû à la disparition de matières (CO₂, H₂O, NH₃...).

Pour les micro-organismes pathogènes et les œufs de parasites, il est nécessaire d'atteindre une température de 55°C minimum pendant 15 jours (normes USEPA) pour détruire ces pathogènes. Il faut évidemment que l'entièreté de la matière subisse le traitement adéquat, ce qui n'est pas aisé à réaliser efficacement en pratique.

Pour ce qui concerne les MPO et gènes recombinants, la plupart des traitements biologiques devraient les réduire ou les éliminer mais des études complémentaires sont nécessaires pour comprendre leur devenir.

Certaines molécules sont très récalcitrantes mais théoriquement dégradables.

Quasi tous les composés stables produits par l'homme sont susceptibles d'être dégradés par des micro-organismes mais ceux qui sont adéquats ne sont pas présents partout. Il faudrait donc envisager une liste de molécules non acceptables dans les produits à épandre car très difficilement dégradables dans les processus naturels. Par contre, un très grand nombre de MPO et de matériel génétique à risque seront soit détruits, soit « neutralisés » par des techniques induisant une forte multiplication de micro-organismes et une forte activité biologique diversifiée. Le processus de maturation du compost semble particulièrement efficace dans cet objectif.

6.2 Le compostage

L'essentiel est d'appliquer une aération maximale pour prévenir la formation de mauvaises odeurs, de composés phytotoxiques et pour accélérer le processus.

Un compostage dont l'aération est parfaitement réalisée ne produit pas de nuisances olfactives. La maîtrise des odeurs est plus difficile pour des matières dont le C/N est inférieur à 25. La difficulté est de maîtriser la forte consommation d'oxygène dans les premières semaines du compostage.

Quelques conseils s'avèrent utiles:

1 Il faut déjà s'assurer que les matières premières n'ont pas ou peu subi de processus anaérobie. Par exemple sur les PAC l'entassement des herbes génère en 24 h un début de fermentation qui, non maîtrisé, dégage déjà des odeurs. Un prémélange avec d'autres éléments broyés (branchages) sur le PAC permettrait de réduire les odeurs et les volumes à transporter.

2 Le broyage de matières permet la constitution de tas fortement aérés ? . Il faut veiller à la qualité des marteaux pour éviter l'usure de ceux-ci qui contamineraient le compost en ETM.

3 Le premier tas ne doit pas être très haut (maximum 2,5) pour éviter le tassement et l'éjection de l'air. La largeur devant être limitée à 2 mètres à la base, pour permettre l'aération naturelle par convection du cœur de l'andain.

4 L'humidité de la matière doit être assez élevée au départ (minimum 60 % - maximum 70 %) pour permettre une progression normale du compostage. L'eau apportée au départ doit surtout servir à éviter le dessèchement des particules à composter. Lorsqu'une déshydratation a eu lieu, elle ne peut être récupérée car le cœur des particules ne peut être réhydraté par des arrosages postérieurs. Si les pertes en eau sont importantes dans les premiers jours, il est nécessaire de réhumidifier le tas, pour maintenir le taux d'humidité adéquat pendant au moins 2 à 3 semaines. Ensuite, on peut laisser se réduire progressivement l'humidité et les activités biologiques.

L'aération des tas est importante car l'ensemble des micro-organismes qui colonisent les petites particules doivent recevoir l'oxygène nécessaire à leur travail. Et l'oxygène consommé doit être aussitôt remplacé. On imagine la difficulté de fournir de l'air en suffisance aux particules au niveau du micron (1/1.000ème de mm). L'énergie qui est produite par l'oxydation de la matière doit pouvoir aussi être évacuée sinon la température devient trop élevée et les risques d'inflammation augmentent. En outre, une température trop élevée (supérieure à 60°C) limite le travail des micro-organismes et réduit globalement les transformations de la matière. Celle-ci tend à se carboniser, ce qui présente plusieurs inconvénients, dont celui de rendre le travail des micro-organismes plus difficile.

Amener de l'air dans toute la masse de manière homogène, au niveau d'une fraction de millimètre est très difficile. L'aération forcée permet d'apporter plus d'air dans la masse mais celle-ci n'étant normalement pas remuée, l'air suit les chemins les plus faciles, entraîne l'humidité de ces chenaux et dessèche progressivement la matière autour de ces chenaux préférentiels. Le résultat est que la matière est trop sèche et handicapée pour son évolution future, et cette sécheresse fait barrage à l'air vers l'intérieur de la matière.

Donc, l'aération forcée est un outil délicat surtout si le retournement de la matière n'est pas envisagé. Un compromis possible est de réaliser cette aération forcée pendant seulement la première partie du compostage, en quelques jours seulement, pendant la phase critique de démarrage. Il faut ensuite retourner au système plus classique de compostage avec retournements, avec ou sans aération forcée.

L'aération concentre les problèmes d'odeurs éventuels et une attention particulière devra être donnée au traitement de cet air. Un biofiltre constitué d'écorces ou de matières organiques similaires, peut parfaitement convenir. Encore une fois, si les conditions de compostage sont idéales, l'air qui en sort ne devrait pas nécessiter un traitement particulier.

Indépendamment de l'aération, le retournement joue un rôle fondamental dans le déroulement du compostage. En effet, la matière de départ est par essence hétérogène, avec des foyers plus riches en azote et d'autres plus riches en carbone, l'eau est à l'échelle microscopique également mal répartie.

Les retournements ont pour objectifs de réhomogénéiser la matière au niveau des petites particules, ce qui est fondamental pour la bonne évolution du compost.

Le nombre de retournement varie avec la durée du compostage et avec le type de matière compostée.

On peut estimer qu'un compostage « normal » nécessite 4 à 7 retournements. Si la première phase est fortement aérée, 3 à 5 retournements pourraient suffire.

La maturation finale est essentielle pour la bonne qualité du compost. Celle-ci doit se faire sans manipulations de la matière pendant au minimum 3 - 4 semaines. En principe, l'humidité du compost doit être proche de 50 % après le compostage proprement dit. Les organismes filamenteux vont prendre le pas sur les bactéries unicellulaires et vont coloniser toute la masse de matière. Ces organismes (essentiellement des champignons) ont un équipement enzymatique capable d'achever le travail des bactéries et cela à un degré d'humidité beaucoup plus faible et avec moins d'air disponible. Ils vont notamment utiliser l'ammoniaque excédentaire, dégrader de grosses molécules non attaquées par les bactéries, dont certaines sont phytotoxiques. **Les phénomènes précis sont encore mal connus mais il est évident qu'une maturation convenable produit un compost plus sain, peu phytotoxique et plus stimulant de la croissance végétale tout en étant inhibiteur des organismes phytopathogènes du sol.**

Les normes de qualité actuelles appliquées aux composts mériteraient une révision, à la fois pour promouvoir les bons produits et pour restreindre l'utilisation de composts mal réalisés.

6.3 Biométhanisation

6.3.1 Matières premières et relation producteur-traiteur

Quel que soit le système mis en œuvre, la qualité du digestat valorisable dépendra de celle de la matière de départ.

Donc, si l'on veut valoriser le digestat sur les sols, la matière organique doit être de qualité adéquate et va nécessiter une nouvelle stabilisation par une phase aérée tout comme le compostage.

Cette qualité est d'autant plus difficilement maîtrisable que la quantité récoltée augmente et que l'origine des matières varie.

La méconnaissance mutuelle des partenaires (habitant producteur de déchet, société collectrice et Intercommunale traitante), le manque de relations entre eux, le manque d'information sur les objectifs fondamentaux de chacun ne sont pas favorables à la motivation du respect des bonnes pratiques nécessaires au succès de la filière.

Par contre la proximité, la connaissance mutuelle des partenaires peuvent plus facilement amener une collaboration pour réussir une entreprise commune dans l'intérêt des divers intervenants.

Autrement dit, le rapprochement du traiteur de déchets vers le producteur de ces déchets devrait être un gage de réussite, à condition d'encadrer adéquatement cette relation et de mettre les guides et contrôles utiles.

Cependant, il est indéniable qu'une certaine taille critique, augmentant la « professionnalisation » du traiteur, permet des moyens de maîtrise et de contrôle plus difficiles à petite échelle. La réponse viendrait sans doute avec l'approche qualité et la maîtrise des risques, réalisables pour les installations de toutes tailles.

La problématique de la biométhanisation va reposer sur 2 éléments qui la distingue du compostage : l'absence d'aération et l'énergie produite.

6.3.2 Absence d'air et prédisposition de la matière à une méthode de valorisation

Certaines matières, comme les herbes de tonte, les déchets de légumes, déchets d'industries agro-alimentaires, sont riches en eau, pauvres en cellulose et lignine et se prêtent mal par leur manque de structure, au compostage isolément. En effet, ces matières ont tendance à se tasser facilement ne laissant alors pas de place pour l'air entre les particules. Pour les composter, il faut trouver les matières structurantes en quantités suffisantes, ce qui n'est quasi pas possible actuellement. Ce sont donc des matières qui peuvent parfaitement convenir à la biométhanisation.

Au lieu de dissiper l'essentiel de l'énergie contenue dans les molécules organiques sous forme de chaleur perdue, la méthanisation récupère cette énergie sous forme de méthane.

Pour la production d'énergie, c'est évidemment le carbone qui constitue la matière première. Cependant, celui-ci est aussi indispensable pour la reconstitution de la matière organique des sols.

Plutôt que d'enclencher une « opposition de principes » entre compostage et biométhanisation, il semble plus judicieux de chercher la complémentarité entre filières en répartissant les matières difficilement compostables vers la biométhanisation et celles riches en matières carbonées structurantes vers le compostage. Les 2 types de matières pourront se retrouver ensuite, éventuellement en mélange harmonieux, pour l'amendement et la fertilisation des sols.

6.3.3 Besoin en énergie

Le besoin en énergie renouvelable est incontestable pour l'avenir proche. Il y a donc un intérêt à se tourner notamment vers la biomasse végétale dans cet objectif.

Cependant, si le besoin en matière organique dans les sols est réel sur tout le territoire de la Région wallonne le besoin en énergie alternative pouvant être valorisée localement est beaucoup moins important et moins bien défini actuellement. Certes, l'opportunité actuelle de vendre des certificats verts aux « électriciens » permet d'envisager la production d'énergie électrique presque n'importe où mais pas n'importe quand !

En effet, la production d'énergie quand la demande est nulle n'est guère défendable, ni financièrement, ni environnementalement parlant.

Il faudrait donc idéalement stocker le méthane et ne produire de l'électricité que lorsque la demande existe, ce qui engendrera inévitablement des coûts supplémentaires.

On peut imaginer (et déjà constater) que les compagnies d'électricité ne souhaitent pas être dépendantes financièrement, mais surtout techniquement de petits producteurs. Ces compagnies vont tout faire pour être autonomes le plus tôt possible. Plusieurs cas en Europe en sont déjà la preuve.

Il semble donc raisonnable d'envisager, dans l'étude d'un projet de production alternative d'énergie, le besoin précis et la valorisation réelle associée de cette énergie au niveau local.

Sans avoir de données concrètes, ni d'études précises, envisageant la demande croissante en énergie électrique, en compensation de l'abandon progressif d'autres sources d'énergie fossiles, il paraît déjà intéressant de mieux étudier l'adéquation entre une production d'énergie non centralisée avec les besoins énergétiques de proximité futurs de notre société.

Si l'on parle de production locale d'énergie, il faut là aussi réfléchir aux acteurs potentiels.

Tout déplacement de matière engendre une dépense énergétique et donc un coût environnemental (en production de CO₂ actuellement d'origine fossile, sans parler des autres polluants atmosphériques, de l'usure des pneus et des routes, des pertes d'huiles produisant une pollution diffuse des eaux de surface, du temps perdu, des risques d'accidents, ...).

On peut en déduire que l'échelle la plus réduite est probablement la meilleure, énergétiquement et environnementalement parlant.

Encore faut-il qu'elle soit performante, efficace et traitant les problèmes globalement.

Le niveau le plus pertinent semble l'agriculteur, plaque tournante entre les besoins de matières organiques des sols et la production de cette matière organique, qui peut gérer les intrants intrinsèques, éventuellement extrinsèques, mais avec le souci de produire une matière de qualité à valoriser sur ses propres terres.

Il y verra donc le triple intérêt, de bien s'intégrer dans la société locale, d'avoir une plus-value énergétique, et de s'auto-provisionner en amendements de qualité.

Il faut y ajouter un quatrième intérêt pour la société qui voit se réduire les coûts de gestion de certains déchets organiques et accroître le gain environnemental certain.

6.3.4 Techniques de biométhanisation

Les deux techniques de base sont : digestion en flux solide (forte charge) continu ou en milieu liquide en cuve étanche (faible charge), avec alimentation continue ou discontinue.

La première technique produisant peu d'effluents liquides (réintégrables le plus souvent dans le flux entrant des matières organiques) a évidemment l'avantage de réduire la gestion délicate de ces effluents, très malodorants, riches en azote et éventuellement en polluants qui s'y concentrent progressivement. Si excès de liquide il y avait, il pourrait être absorbé lors de la phase finale de compostage du digestat.

Il apparaît donc raisonnable de promouvoir les traitements en flux solide pour les matières qui risquent d'amener quelques polluants de manière ponctuelle.

Il est important de minimiser les pièces en mouvement pour éviter l'usure en conditions oxydantes et la corrosion qui en résulte, et qui libère des métaux non souhaitables dans le produit organique final.

En outre, il est tout à fait possible de réaliser cette méthanisation en thermophilie (autour de 55°C) qui est une température hygiénisante, qui de surcroît augmente le rendement et la richesse en méthane du biogaz tout en consommant bien sûr une part de cette énergie.

En synthèse, on pourrait recommander la biométhanisation à forte charge à 55°C pour la fraction fermentescible des ordures ménagères collectées sélectivement, ainsi que pour les déchets agro-alimentaires riches en eau et pauvres en matière structurante.

Une attention toute particulière devra être portée sur la qualité des matières récoltées et sur l'utilisation rationnelle de l'énergie produite.

7 Rôle potentiel des agriculteurs

Actuellement se déroule au niveau fédéral une réflexion concernant l'avenir des industries belges et l'impact des biotechnologies sur notre société à l'initiative du Ministre Verwilgen. Un des thèmes traités concerne la biomasse, source potentielle d'énergie renouvelable et de matières premières pour les biotechnologies du futur.

Il est curieux de constater la convergence de points de vue vers l'agriculteur comme « plaque tournante » dans la gestion des matières et de l'énergie potentielle qui en résulte. Notamment une des recommandations du groupe de travail sur la biomasse est de désigner la ferme comme productrice locale (made in Belgium) d'énergie verte « green petrol », avec des impacts positifs sur l'environnement et sur la socio-économie.

Les agriculteurs faisant de l'élevage disposent de déchets en quantité importante qu'ils doivent gérer en fonction de l'azote et du taux de liaison au sol. C'est une première réponse importante à la protection des sols et surtout des nappes d'eau souterraines.

La nature des déchets de l'élevage est cependant inadéquate pour une bonne gestion des sols à long terme, en raison du déficit en carbone. Le rapport C/N y est trop faible pour empêcher des excès localisés d'azote et pour permettre une bonne reconstitution de l'humus des sols cultivés, et même des prairies.

Il serait donc souhaitable que les éleveurs disposent de plus de matières carbonées pour rééquilibrer leurs déchets et qu'une réflexion plus globale ait lieu pour définir une politique à long terme.

Ce supplément de matières carbonées serait précieux pour pouvoir composter leurs déchets, ce qui permettrait de les assainir (destruction des pathogènes) et de les stabiliser (empêcher une fermentation spontanée non maîtrisée responsable de mauvaises odeurs).

A l'heure actuelle, ce carbone supplémentaire n'est guère disponible. Par contre les gestionnaires de déchets vont se trouver face à un flux croissant de FFOM et de déchets verts.

Ce flux accru va nécessiter des investissements complémentaires coûteux et des déplacements de matières brutes au départ, et de produits finis ensuite.

Il serait donc judicieux de réunir les intérêts des éleveurs pour un supplément de matières carbonées, et celui la collectivité de limiter les coûts financiers et environnementaux de la gestion des déchets organiques.

Des aides publiques aux agriculteurs devraient probablement être envisagées pour soutenir des initiatives nouvelles, intéressantes pour toutes les parties.

Si les éleveurs investissent dans des équipements de traitement des matières organiques, peut-être pourraient-ils aussi gérer une partie de la FFOM de leur voisinage. Ceci permettrait de diminuer les coûts de gestion de cette FFOM, de garantir une qualité des matières sous contrôle des agriculteurs, d'accroître leurs réserves en matières organiques, de produire une matière organique commercialisable et ainsi d'augmenter leurs revenus.

La position des Intercommunales est centrale dans la problématique des déchets, puisque coordinatrices de la collecte et responsables du traitement et de l'élimination.

Dans l'hypothèse d'un traitement de déchets verts et ménagers à la ferme, les Intercommunales pourraient éventuellement jouer un rôle d'intermédiaire, assurant la collecte et la redistribuant chez les fermiers transformateurs.

L'ensemble de ces tâches contribuerait à « redorer le blason » de l'agriculture et de contribuer à l'amélioration globale de l'environnement.

Les fermes pratiquant l'élevage sont actuellement exclues de la gestion et du traitement des ordures ménagères en raison des risques possibles de contamination des aliments des animaux.

8 Description des conditions impératives de qualité pour le futur et proposition de moyens pour les garantir

Comme évoqué précédemment, il est incontournable dans le futur de préserver ou de restaurer la qualité des sols. Pour atteindre cet objectif, il est indispensable de maîtriser la bonne qualité des matières y appliquées. Comme il est impossible de garantir par des analyses l'innocuité de chaque fraction des matières épandues, il est impératif de mettre en place des stratégies qui protègent les filières et les « produits » finaux.

Deux approches sont possibles mais non équivalentes sur les résultats.

Premièrement, un système de normalisation peut contraindre à ne mettre sur le marché que des matières correspondant à un profil particulier (norme) défini par des analyses.

Sans vouloir évoquer à nouveau toute la problématique de la fiabilité et précision des analyses, il est clair que l'on ne peut contrôler sérieusement l'entièreté des matières appliquées sur les sols et en outre celles-ci devraient être en adéquation avec les besoins des sols et des cultures. En effet le nombre des analyses nécessaires et leurs coûts deviennent prohibitifs sans encore de garantie totale puisque l'échantillonnage est toujours faible et pas nécessairement représentatif.

En outre les analyses recommandées ou exigées pour les composts ne prennent pas en compte toutes les contaminations aléatoires qu'ils peuvent subir.

Les analyses ne portent jamais que sur une minime fraction de l'ensemble de la matière. Même si une bonne technique d'échantillonnage permet de rapprocher l'échantillon prélevé de la qualité moyenne de l'ensemble, elle ne peut tout mettre en évidence. En exemple, on pourrait citer une contamination locale par des métaux lourds venant d'une pile. Soit l'échantillonnage est très limité et passe probablement tout à fait à côté de la zone contaminée, soit l'échantillonnage est large, représentatif de toute la masse de compost produit, mais l'échantillon composite qui en résulte ne contiendra qu'une toute petite partie de la zone contaminée et la concentration dans l'échantillon final risque d'être sous la limite de détection ou simplement sous la norme acceptée. Mais cela n'empêchera pas une application de quelques dm³ de compost fortement contaminé et que quelques légumes, par exemple, soient *in fine* eux-mêmes très chargés en métaux lourds.

La deuxième approche consiste à vouloir garantir les filières (et non plus les produits seuls) en identifiant tous les risques existant et en mettant en place tous les moyens pour maîtriser ces risques et éviter les accidents en tous genres.

La comparaison est souvent faite avec le domaine alimentaire où l'on sait que les contrôles bactériologiques seulement sur les produits finis ne peuvent en aucune manière prémunir les consommateurs contre un accident.

En effet, le très faible nombre de contrôles analytiques possibles par rapport aux quantités produites, et le temps nécessaire à ces contrôles, rendent illusoire la protection des consommateurs uniquement par l'analyse des produits finis.

La seule manière d'assurer une certaine protection, est de contrôler la manière dont les aliments sont produits, stockés et distribués, de sécuriser ces filières et dans ces conditions, l'analyse ne sert qu'à vérifier que les risques sont connus et minimisés, que les filières sont sécurisées et que les produits finis sont conformes à ce qui est attendu.

La sécurité est donc obtenue, non par l'analyse des produits mais par la mise en place d'un système qui identifie les risques potentiels, propose une stratégie qui contrôle leur apparition et qui les prévient ou maîtrise leurs conséquences.

Cette méthode préconisée pour limiter les contaminations des produits alimentaires et basée sur « l'analyse des risques et le contrôle des points critiques » est appelée à l'origine « Hazard Analysis and Control of Critical Points » (H.A.C.C.P.). Cette stratégie est transposable dans tous les domaines des activités humaines et, pour ce qui nous concerne, elle pourrait être rebaptisée P.A.C.C.P. (Process Analysis and Control of Critical Points), le process devant être pris au sens large, englobant toutes les filières dans leur entièreté depuis les matières premières jusqu'à la valorisation des matières sur les sols.

Il est néanmoins prématuré de vouloir décrire une stratégie précise adaptée aux filières de valorisation des matières organiques parce que l'objet final, c'est-à-dire le sol, est également soumis à des sollicitations qui devraient être intégrées dans une approche « qualité par la maîtrise des risques » des utilisations des sols.

Cependant, nos connaissances sur de nombreux déchets sont encore très partielles, tant du point de vue qualitatif que quantitatif et, si l'on sait que les matières organiques vont manquer pour reconstituer l'humus des sols wallons, qu'il y a encore de la place pour des matières azotées, qu'il existe des matières organiques difficiles à valoriser.... on ne peut encore clairement organiser les filières de meilleure valorisation des matières disponibles et les productions des matières complémentaires qui seraient nécessaires (ex. matières structurantes riches en carbone, comme les déchets végétaux). D'où l'utilité de créer une banque de données régionale (ou plus étendue ?) sur les matières organiques.

En outre, il paraît recommandable de mettre en place un système d'assurances-garantie, qui obligerait tous les acteurs à maîtriser leurs interventions dans le cadre des responsabilités clairement définies et qui disponibiliserait les moyens de remédier, autant que possible, à une dégradation du sol ou de l'environnement consécutive à un apport donné ou à une série de pratiques dommageables.

L'agriculteur ou le gestionnaire d'un sol est responsable de sa qualité. Les apports qu'il est forcé d'y amener ne sont pas toujours bien connus et les impacts sur le sol encore moins. Il semble donc naturel de couvrir, pour l'utilisation, les risques liés à l'épandage de matières peu contrôlées, naturellement variables dans leur composition et dont les origines précises sont mal définies.

A titre illustratif, il est intéressant de considérer le cas du Canada qui veut développer une norme sur les composts mais basée sur une maîtrise des risques que doit prouver le producteur pour bénéficier de la norme.

« Étant donné le potentiel de croissance du compostage au Canada ainsi que les aspects de protection de la santé et de l'environnement associés aux installations industrielles de compostage, le développement d'une norme nationale était devenu une nécessité pour les provinces.

La *Loi sur les engrais chimiques* et le *Règlement sur les engrais* de ce Ministère exigent que tout produit employé comme amendement de sol doit être sécuritaire, efficace et étiqueté correctement. Ce Ministère a adopté les exigences de la norme nationale sous le couvert de cette loi et de ce règlement sous la forme d'une circulaire à la profession. »

MÉTHODOLOGIE DE NORMALISATION

« Pour qu'une norme soit valable et acceptée dans le milieu, il est essentiel d'obtenir la participation et la collaboration de l'ensemble des intervenants de ce milieu. De plus, la norme doit s'appuyer sur un consensus et doit respecter les critères du Conseil canadien des normes pour être approuvée comme Norme nationale du Canada. Pour atteindre ces objectifs, les étapes du projet ont été les suivantes :

- _ étude de faisabilité
- _ production d'un document normatif préliminaire
- _ formation du comité
- _ étude en comité du document normatif préliminaire et recherche de consensus
- _ production du document normatif faisant l'objet d'un consensus
- _ correction et révision linguistiques
- _ enquête publique
- _ vote du comité
- _ vote de 2e niveau (révision du processus)
- _ approbation par le CCN
- _ approbation par la Direction du BNQ
- _ publication et diffusion de la norme. »

« LE CONTENU DE LA NORME CANADIENNE : La certification de conformité

À la suite d'essais et d'une vérification de la maîtrise de la qualité, le BNQ délivre un certificat de conformité qui témoigne qu'un produit fabriqué par une usine donnée est conforme aux exigences de la norme applicable. De plus, la certification reconnaît à cette dernière la capacité de fabriquer, de façon permanente et constante, un tel produit conforme. Ceci implique qu'un suivi est assuré tout au long de la période de validité du certificat (2 ans pour les composts). »

Il paraît en outre opportun de mentionner, que, dans le cadre d'un groupe de travail sous la tutelle d'Aquawal, qui a examiné un projet de décret et d'arrêté sur la valorisation des matières recyclables dans les sols, les fédérations des différentes productions de déchets sont favorables à un meilleur contrôle des matières épandues, quelles qu'elles soient, et une tendance se dessine en faveur de la constitution d'une assurance dont les modalités ne sont pas encore définies.

En outre, afin de garantir la meilleure protection des sols et des apports aux plantes compatibles avec leurs besoins réels, il faut, outre la sécurisation des matières épandables ciblées plus haut, une totale maîtrise des épandages sur les sols. Dans cet objectif, il est proposé d'offrir aux agriculteurs la possibilité de traiter de manière informatique leurs prévisions d'épandages. Ce « plan d'épandages » serait cadré, dans le futur, par un logiciel prenant en compte les apports en azotes, ETM, etc. au niveau de chaque parcelle, des années précédentes, qui seront enregistrées dans un « registre d'épandages » mis à jour chaque année après les épandages de l'année. Donc, le « plan d'épandage » sera réalisé avec l'appui d'un conseiller agronome de la DGA qui pourra gérer les logiciels adéquats, et donner automatiquement les limites à ne pas dépasser pour les éléments à risques, dont l'azote.

Le registre, mis à jour chaque année, pourra alimenter le cadastre des épandages, géré au niveau de l'Administration de la Région wallonne qui permettrait de gérer et contrôler les flux des matières recyclables et de connaître à tout moment et en tout lieu le statut de sols en ETM.

Enfin, les multiples aspects de la gestion des déchets et de l'épandage des matières recyclables nécessitent une vigilance et une adaptation continue des mesures et paramètres de contrôles, tant au niveau des sols qu'au niveau des déchets en amont.

Dans cet objectif, il est souhaitable de mettre en place une structure constituée de responsables de l'Administration de la Région wallonne, de scientifiques, de gestionnaires de l'environnement et d'hommes de terrain, que l'on pourrait appeler « Observatoire des sols et des déchets ».

Ce dernier aurait pour mission, outre la vigilance sur les productions de déchets et la protection des sols, de suivre ce qui se fait dans les autres pays, de diffuser les connaissances nouvelles et de proposer des modifications adéquates dans le but de réduire les déchets et ses contaminants et de mieux protéger les sols pour le très long terme.

9 Conclusions

Il est fréquent, pour ne pas dire habituel, que les problèmes de notre société soient compartimentés et traités séparément par des spécialistes en chaque matière.

Or, la nature est un tout dont il est délicat de ne prendre en compte que certains de ses éléments, notamment dans les réflexions concernant nos impacts sur elle.

Il est donc urgent de prendre conscience, pour le thème qui nous occupe ici, des enjeux relatifs aux rapports non seulement entre la production des déchets organiques et les valorisations potentielles de ceux-ci d'une part, mais aussi d'autre part, entre les besoins de nos sols et les éléments utiles disponibles, sachant que les pratiques utilisées, ou non utilisées jusqu'à présent, ont eu un certain nombre de conséquences négatives sur l'environnement et ne pourront pas se poursuivre indéfiniment sans perturber gravement les systèmes qui garantissent encore nos moyens de subsistance.

A titre d'exemple, combien d'années, de décennies ou de siècles, pourra-t-on, sans conséquences graves, continuer à exporter de nos sols de multiples éléments minéraux, en ne se préoccupant de leur restituer que les « simples » N-P-K, et éventuellement le calcium et le magnésium, par ailleurs en quantités non proportionnelles aux exportations et souvent avec des apports non maîtrisés de certains éléments non souhaitables (métaux lourds ou autres, en concentrations non recommandables).

Les matières organiques d'origine végétale, par contre, possèdent des éléments minéraux, venus de nos sols, en équilibre avec les besoins biologiques des plantes bien évidemment, et, réalimenter les sols en éléments minéraux d'origine végétale est donc un gage d'apports équilibrés.

Or, les sols wallons éprouvent de plus en plus un besoin accru en matières organiques, particulièrement ceux qui ont été dégradés par suite d'une forte intensification agricole, sans apports proportionnels de matières organiques riches en carbone. L'Union Européenne s'intéresse de plus en plus à cette situation préoccupante et prépare pour la fin 2005 une directive cadre sur les sols.

Les déchets animaux, industriels, etc. ne sont pas aussi équilibrés que les déchets végétaux et certains ne devraient pas être valorisés isolément sur les sols. Pour ces derniers, des mélanges seraient indispensables avec d'autres composés pour rectifier la composition globale (il faut notamment souligner l'intérêt de la contribution de l'apport de matériau ligneux sur le rapport C/N). Il faut bien sûr être vigilant à ce que cette pratique ne devienne un alibi pour éliminer des matières dangereuses. Pour le long terme, ces mélanges sont certainement un aspect indispensable à la durabilité de l'agriculture et de la gestion de notre environnement et c'est dès à présent qu'il faut acquérir les connaissances, préparer les conditions et fixer les règles qui permettront cette meilleure gestion de nos ressources.

Ceci implique qu'il faille mieux connaître tous les déchets organiques disponibles, ou à venir, afin de pouvoir les inclure au mieux dans les filières de valorisation des matières dans nos sols.

Une étude sur la valorisation des matières organiques, en plus des contingences pratiques incontournables, techniques et économiques, est donc indispensable et se doit d'être continuellement replacée dans le cadre des considérations évoquées ci-dessus, sous peine de devenir obsolète dans quelques années.

Les tendances actuelles en matière de déchets visent ainsi une gestion intégrée du cycle de vie des déchets, seul moyen de concilier développement et protection de l'environnement. Les priorités entre prévention, recyclage et élimination sont intégrées au mieux et l'accent a clairement été mis, ces dernières années, sur la nécessité de réduire la fraction organique par le recours notamment aux traitements biologiques des déchets afin de pouvoir envisager une valorisation ultérieure telle le recyclage sur ou dans les sols. Cela nécessite, entre autres, la mise en œuvre d'une politique générale de tri des déchets à la source et de collecte sélective via les parcs à conteneurs.

La création d'une banque de données sur les déchets disponibles s'avérerait précieuse, d'une part pour ne pas ignorer les ressources organiques disponibles si précieuses, et permettre de trouver les matières complémentaires adéquates pour les mélanges à réaliser en vue de réaliser des produits finis équilibrés.

En outre, les réflexions de la Commission européenne, jadis axées essentiellement sur les déchets ménagers, s'orientent maintenant vers une gamme plus large des matières et mettent en avant les nécessités de :

- créer des « niveaux » (classes) de qualité pour les matières organiques épandables, à mettre en parallèle avec la qualité des sols récepteurs et la nature des grandes productions (cultures, prairies,...) sur ces sols ;
- d'assurer la traçabilité des matières par l'intermédiaire de bases de données centralisées et de suivi administratif contraignant ;
- de contrôler et d'enregistrer les apports de tous les éléments sur les sols afin de garantir à la fois la protection des sols mais aussi leur fertilité.

Différents pays de l'Union européenne et du monde entier restent ainsi encore confrontés à la difficulté de gestion des déchets en général, et organiques en particulier. Il ressort tout de même que toutes les initiatives (au Japon, Canada, Etats-Unis, Australie, Union Européenne) qui revendiquent une approche gestionnaire dans la « durabilité » (sustainability) et *a fortiori*, celles qui prennent en compte les besoins des sols, vont dans le sens d'une récupération des matières organiques de qualité pour la valorisation dans les sols. Un traitement stabilisant et hygiénisant, comme le compostage, est le plus souvent recommandé.

Il est apparu que les déchets verts font l'objet d'un compostage à grande échelle en Wallonie ainsi qu'une partie des effluents d'élevages. Les traitements par biométhanisation pourraient s'avérer intéressants pour les matières organiques facilement fermentescibles et riches en eau vu le manque général de matières structurantes, donc difficiles à composter isolément.

Il s'est avéré qu'un potentiel important de valorisation existe pour les matières organiques mais que des efforts restent à faire en matière, notamment, de sécurisation des filières et de garantie de qualité, afin que ce potentiel puisse être exploité pleinement. Dès lors, il paraît recommandable de mettre en place un système « fonds de garantie » avec recours vers les responsables de pollutions identifiées, à compléter par un cautionnement en fonction de l'entreprise productrice du déchet, qui obligerait tous les acteurs à maîtriser leurs interventions dans le cadre des responsabilités clairement définies, et qui disponibiliserait les moyens de remédier, autant que possible, à une dégradation du sol ou de l'environnement consécutive à un apport donné ou à une série de pratiques dommageables. En outre il apparaît actuellement encore difficile de quantifier de manière précise ces différents débouchés et leur évolution dans l'avenir.

La confrontation des concentrations limites dans les sols d'une part, et des concentrations moyennes en métaux lourds par zone agricole d'autre part, amène à la conclusion que l'utilisation de certaines matières devra être limitée dans les zones agricoles suivantes : Ardenne, Jurassique et Herbagère (Liège). L'accumulation progressive de nouvelles données devrait permettre, à l'avenir, d'affiner la réflexion.

Idéalement, les plans d'épandages devraient permettre le transport, pour une période transitoire, de matières suffisamment peu concentrées en métaux lourds vers ces zones.

Dans les cas des sols les plus concentrés en métaux lourds, des possibilités de phytoextractions pourraient être explorées via la production transitoire de cultures énergétiques. Cette technique permet de faire baisser les concentrations en métaux lourds sans demander un investissement en matériel pour l'agriculteur. Il s'agirait d'une véritable bioremédiation des sols par les plantes. En conclusion, la définition des zones dans lesquelles des limitations, voire des interdictions d'épandage de certaines classes de matières organiques est limitée par la précision des données actuellement disponibles.

Par ailleurs, d'autres limitations devraient être envisagées pour les zones de captage dont les diamètres de protection devraient être étendus pour les produits à C/N bas (par exemple <20). La prudence s'impose pour les versants de cours d'eau à forte pente. Par contre des composts ou broyats de végétaux à C/N>30 pourraient être utilisés pour stabiliser des berges ou des versants pentus et pour en augmenter la perméabilité du sol.

Outre les principales conclusions de l'étude, plusieurs recommandations, d'ordre général, sont apparues au cours des travaux et méritent d'être précisées ci-dessous.

Dans ce contexte de valorisation sur sols, il s'est ainsi avéré qu'aucun déchet ne possède isolément toutes les caractéristiques (humidité, composition, ...) idéales d'un bon fertilisant ou même d'un bon amendement en application directe à l'état brute, a fortiori s'il présente des contaminations à risque.

En outre, tous les déchets disponibles n'ont pas pu encore être recensés, ni étudiés dans leurs diverses potentialités de valorisation. En outre, les sols n'ont pas non plus été étudiés dans une perspective de réception de diverses matières organiques en quantités plus ou moins importantes. Il reste beaucoup d'études à faire dans ces domaines. Un inventaire de ces études à réaliser et des récentes terminées devrait être réalisé au plus tôt pour préparer les choix stratégiques. Néanmoins, le compostage d'un grand nombre de ces déchets en mélange permettrait une standardisation des produits finaux. Ceci réduirait fortement les coûts analytiques de suivi de la qualité, pour autant qu'il y ait une bonne connaissance et un contrôle administratif strict des matières entrantes. Les mélanges favoriseraient les complémentarités entre déchets initiaux afin de garantir un produit final de qualité.

Il est clair également que les multiples déchets affectés par des polluants métalliques, organiques très peu dégradables, bactériologiques, ne peuvent plus être acceptés directement sur les sols cultivés ou non cultivés sans mettre en péril les êtres vivants de toutes tailles et toutes espèces qui fréquentent ces sols. Un compostage bien conduit pourrait par contre favoriser la décomposition d'une grande part des produits indésirables et rendre inertes certains microorganismes. En exemple, on peut citer les spores de germes pathogènes non détruites totalement dans les composts, mais dont la revivification est inhibée par la forte concurrence microbienne et par les inhibiteurs sécrétés par ce que l'on a coutume d'appeler la flore de barrière qui constitue une microflore concurrentielle énorme.

Un compostage bien mené est aussi destructeur de virus et de la très grande majorité des pathogènes animaux et végétaux. A titre d'exemple, les Américains se lancent depuis quelques années dans le compostage des animaux morts, avec confiance sur la destruction des éventuels pathogènes.

En conclusion, pour garantir une bonne gestion des éléments minéraux en vue d'une agriculture durable, pour réduire les apports externes à la région, pour rendre à nos sols les éléments minéraux et biologiques pour dynamiser les activités dans les sols, l'apport de matière organique de bonne qualité est indispensable.

Le compostage des déchets ou le cocompostage, par exemple de boues avec des déchets ligneux, doit être une filière à encourager, pour autant que les métaux lourds soient en concentrations acceptables et il faut s'attaquer dès que possible aux sources de ces métaux en amont de la collecte des déchets.

Les autres filières pour la valorisation de matières organiques de bonne qualité ne sont pas concevables dans le cadre d'une agriculture durable à très long terme, par contre une complémentarité avec la biométhanisation est envisageable pour certaines matières.

Il est impératif de laisser la porte ouverte, dans une période transitoire à définir, pour augmenter les connaissances, les expériences, permettre l'accoutumance des mentalités aux nouvelles exigences,...avant de pouvoir définir une politique précise et efficace.

Il est aussi urgent de formaliser de nouvelles règles en matière de métaux lourds dans les plantes consommables et donc dans les sols, notamment à la lumière des connaissances nouvelles sur les besoins nutritionnels et tolérances vis-à-vis des oligo-éléments nécessaires à la vie (Zn, Cu, ...), mais là aussi de nombreuses petites études précises devraient également précéder des recommandations finales.

10 Recommandations

10.1 Distribution parcellaire des intrants

Il faut sortir de la gestion au niveau de la surface globale de l'exploitation agricole qui camoufle des erreurs d'applications de matières sur les sols pour entrer au plus tôt dans une gestion parcellaire bien maîtrisée, seule garante de la protection des sols et de leur saine fertilité dans le futur.

Point de vue français sur la question :

« De nos jours, les contraintes économiques et techniques aidant, les superficies exploitées sont bien plus importantes, et en perpétuelle croissance. Or, l'unité de base du raisonnement agronomique est toujours la parcelle, avec toutes ses variations. L'agriculture de précision nous propose donc de moduler nos pratiques culturales pour les adapter aux exigences locales. A terme nous voulons arriver à raisonner la dose d'engrais, de semis, en un mot de tous les intrants, en l'adaptant aux nécessités d'une surface élémentaire homogène.

C'est ainsi que les agriculteurs américains ont les premiers cherché à mettre en évidence la présence de différents types de sols sur une même parcelle. La méthode utilisée est celle du « grid sampling ». Il s'agit de tresser un maillage sur les parcelles et de réaliser plusieurs analyses de terre par mailles. La taille des carrés est généralement comprise entre 1 et 1,6 ha. Après traitement informatique, nous obtenons une carte qui montre les différentes zones homogènes de la parcelle. Elle peut être utilisée pour une première modulation de la fumure de fonds.»

10.2 Utilisation maximale des matières organiques

Pour reconstituer le stock d'humus, l'ensemble des matières organiques devrait être pris en compte, non seulement celles habituellement reconnues comme valorisables en agriculture, mais aussi toutes celles qui ne sont pas encore valorisées ou qui ne sont pas utilisables seules, mais qui pourraient être intégrées harmonieusement dans des mélanges (après contrôle du niveau de pollution), comme les copeaux et sciures, actuellement trop souvent brûlés chez les petits producteurs, les broyats de végétation le long des routes.

La valorisation agricole des boues de stations d'épuration est très controversée à l'heure actuelle. Leur qualité s'est beaucoup améliorée ces dernières années et dépasse quelquefois celle de certains fertilisants traditionnels de l'agriculture. Il ne faut pas oublier que leur source de minéraux provenant en grande partie de nos régions est nécessaire à un certain maintien du potentiel de fertilité de nos sols. Les arguments négatifs qu'on leur oppose devraient être discutés en rapport avec les alternatives, non seulement d'élimination, mais aussi de substitution comme source de fertilisation des sols dans la perspective de durabilité de ces pratiques.

La fraction organique des déchets ménagers collectée séparément peut représenter dans le futur proche une part significative de la matière organique à valoriser. Il sera important de contrôler d'abord l'efficacité du tri complémentaire préalable, et ensuite les performances des traitements. La filière énergétique doit être envisagée quand les collectes sélectives sont difficiles et aléatoires, et que la qualité des produits récoltés n'est pas à la hauteur des exigences de la valorisation répétée sur les mêmes sols.

Il est clair également qu'augmenter l'incitation à trier les déchets organiques dans une fraction de la population non motivée risque d'altérer la qualité de la collecte provenant d'habitants plus motivés.

Le sort des boues de dragage (peu riches en matière organique) ainsi que des sédiments d'étangs, lacs et lagunes n'a pas été examiné, mais au cas par cas, en fonction de leur qualité, des mélanges avec des matières organiques permettraient l'obtention de bons produits pour les sols.

Une meilleure exploitation des déchets forestiers devrait être envisagée. Ceux-ci représentent en effet un complément en carbone avec effet structurant intéressant pour le compostage de produits trop riches en azote. Ces mêmes déchets forestiers, ainsi que les résidus d'élagages, contiennent des éléments minéraux intéressants pour l'agriculture et gaspillés actuellement. Ces déchets peuvent aussi être utilisés sous forme de broyat frais. Cette pratique, plus économique que le compostage, a été initiée par le Pr. Lemieux au Canada et est appliquée avec succès sur certains sols dégradés.

Les déchets d'autres industries, papetières ou lainières, etc. mériteraient une meilleure prise en compte de leurs propriétés en fonction des besoins des sols ou des mélanges de matières organiques.

Dans l'analyse des flux, il ne faudra pas ignorer les risques ou éventuellement les avantages des échanges transfrontaliers de diverses matières, notamment en conséquence des disparités entre exigences qualitatives entre différents régimes ou pays.

Sur base de l'estimation des quantités de matières organiques nécessaires pour compenser les pertes d'humus annuelles par minéralisation, pour les cultures et les prairies, le taux d'auto-provisionnement global de la Région wallonne en matière organique a pu être évalué. Il s'avère ainsi que le gisement annuel wallon en matière organique sans les déchets d'élevages approchent 1.100.000 tonnes de MS organique au total. Dès lors, ce gisement pourra combler de 33 à 66 % (en fonction du coefficient considéré de minéralisation secondaire : de 2 ou 1 % par an) des besoins des sols en matières organiques nécessaires pour maintenir le stock d'humus actuel. Les effluents d'élevages permettent, à eux seuls, de couvrir, de 46 à 23 % de ces besoins.

Il existe donc un manque global de matière organique en Région wallonne, si bien que la valorisation de l'ensemble des matières organiques considérées dans la présente étude ne permet pas de couvrir l'ensemble des besoins des sols aussi bien en ce qui concerne l'azote organique que le carbone. Il ne devrait donc pas y avoir de concurrence marquée entre ces deux types d'amendements organiques qui d'ailleurs devraient être plus complémentaires que concurrents, puisque, pour réduire le lessivage d'azote, il serait souhaitable de relever le rapport C/N en amenant des composts en même temps que les effluents d'élevages ou mieux en intégrant ces effluents dans les processus de gestion globale et notamment dans les processus de compostage pour les hygiéniser.

Dans l'objectif de restaurer et/ou maintenir le stock d'humus des sols wallons, il est nécessaire de mettre en place une politique de sensibilisation, d'information, de promotion auprès des gestionnaires des sols (agriculteurs, horticulteurs, jardiniers amateurs et professionnels) afin de les conscientiser à l'urgence d'une meilleure gestion de la matière organique, depuis la production jusqu'à son utilisation, en passant par les traitements possibles ou nécessaires.

Il est donc important aussi de sensibiliser la population agricole à la nécessité de produire et utiliser plus de matière organique stable et ligneuse (sur les jachères, mise en place de haies, sur les talus, ...) et de ne pas gaspiller celle qui existe et que l'on galvaude (abandon, incinération, mise en décharge, ...).

Une telle politique de sensibilisation ne s'improvise pas et doit faire l'objet d'une étude de base en concertation avec les représentants des agriculteurs et d'autres organisations ayant un rôle à jouer dans la production végétale, dans la transformation, le commerce et l'application de matière organique ainsi que la préservation de l'environnement.

En outre, un débat doit naître sur la destination à donner au carbone disponible en Région wallonne. Etant donné son insuffisance doit-on l'orienter principalement vers les sols pour rehausser le taux de matières organiques et pour augmenter le rapport C/N des apports azotés ou doit-on favoriser la production d'énergie verte pour réduire le taux de CO₂ d'origine fossile.

Il semble que les deux options soient compatibles selon le schéma suivant :

Dans les régions forestières ou de prairies, dans lesquelles les besoins en matières organiques ne sont pas aussi importants, on peut envisager d'utiliser de la matière organique difficile à composter, pour des raisons de structure essentiellement, à des fins énergétiques.

Dans ce cas, il est important d'envisager une utilisation rationnelle de l'énergie produite. Il n'est pas rare, en effet, de produire du biogaz qui est ensuite brûlé dans une torchère, ou qui est converti en électricité à un moment de la journée où elle n'est pas utilisée... Une infrastructure de production d'énergie doit donc être envisagée afin que chaque mètre cube de biogaz produit ne soit pas perdu. Dans cet objectif, il est possible d'envisager trois destinations complémentaires du biogaz : utilisation directe dans l'installation, production d'électricité lorsque le besoin en électricité se fait sentir (heures de pointe), utilisation en tant que combustible pour véhicule sous forme comprimée. Cette dernière solution pourrait être promue, ne fut-ce que pour les véhicules de l'exploitation.

Pour la matière organique de bonne qualité, la priorité doit être donnée à la valorisation agricole étant donné l'urgence d'arrêter la dégradation des sols.

En effet, si l'on considère les intérêts du compostage et des composts de qualité obtenus, on ne peut qu'encourager la transformation des matières organiques en composts, si d'autres considérations (qualité des matières, coûts, ...) ne s'y opposent pas.

Les inconvénients habituels (mauvaises odeurs, pertes d'ammoniac, jus nauséabonds et riches en azote, produit résiduel riche en eau et phytotoxique) sont toujours dus à une mauvaise aération et à un processus mal maîtrisé ou incomplet, alors qu'un compostage bien réussi, au contraire, permet une oxydation de la matière organique, avec élévation de la température et l'obtention, *in fine*, d'une matière :

- sans odeur désagréable : odeur d'humus ;
- stabilisée : tout ce qui était disponible pour la fermentation a été utilisé par les microorganismes et l'activité des microorganismes est quasi arrêtée par manque de matière à dégrader ;
- hygiénisée : la température atteinte pendant la phase thermophile doit être supérieure à 55°C pendant au moins 15 jours pour détruire tous les pathogènes animaux et végétaux ;

- déshydratée partiellement par les pertes importantes en eau pendant le compostage : 20 à 45 % d'eau en fin de compostage.

L'intérêt des composts découle du fait que la matière organique d'un sol est plus ou moins rapidement minéralisée en fonction de sa nature. L'humus ne l'est que lentement, mais a peu d'effet sur l'activité biologique du sol, tandis qu'une matière organique jeune comme un compost, active la vie du sol mais se dégrade rapidement. De plus, toutes les matières organiques ne sont pas comparables de ce point de vue, par exemple, la cellulose est beaucoup moins efficace que la lignine (venant du bois) pour reconstituer l'humus. Dans ce dernier cas, il faut renouveler fréquemment les apports, ceux-ci permettent d'augmenter le stock de matière organique (de divers niveaux d'évolution) ce qui procure aux sols un certain nombre d'avantages très importants, dont les principaux suivants :

Minimisation des risques

Le compost bien réussi étant une matière stabilisée, il peut être stocké quasiment n'importe où, sans risque pour l'environnement (d'odeur et de lessivage d'azote) grâce au C/N supérieur à 15 - 20.

Le compost ou le digestat après compostage étant hygiénisé, il n'y a pas de risque de diffusion ou de rémanence de pathogènes.

Un label « WALCO », prenant en compte les micro-organismes pathogènes (animaux et végétaux), les graines d'adventices et la phytotoxicité, de manière plus sévère devrait être envisagé mais réservé aux produits basés sur une approche qualité sécurisée par une maîtrise des risques. En outre, il est d'ores et déjà certain que la formalisation de ce label devra faire l'objet d'un consensus après concertation de tous les partenaires potentiels. De même, il serait nécessaire de favoriser un système d'assurance qualité couvrant progressivement l'ensemble des processus et basé, notamment, sur l'analyse de risques.

En outre, il paraît recommandable de mettre en place un système d'assurances-garantie, qui obligerait tous les acteurs à maîtriser leurs interventions dans le cadre des responsabilités clairement définies et qui disponibiliserait les moyens de remédier, autant que possible, à une dégradation du sol ou de l'environnement consécutive à un apport donné ou à une série de pratiques dommageables.

En outre, afin de garantir la meilleure protection des sols et des apports aux plantes compatibles avec leurs besoins réels, il faut, outre la sécurisation des matières épandables ciblées plus haut, une totale maîtrise des épandages sur les sols. Dans cet objectif, il est proposé d'obliger les agriculteurs à mettre par écrit leurs prévisions d'épandages. Ce « plan d'épandages » sera cadré, dans le futur, par un logiciel prenant en compte les apports en azotes, ETM, etc. au niveau de chaque parcelle, des années précédentes, qui seront enregistrées dans un « registre d'épandages » mis à jour chaque année après les épandages de l'année. Donc, le « plan d'épandage » sera réalisé avec l'appui d'un conseiller agronome qui pourra gérer les logiciels adéquats, et donner automatiquement les limites à ne pas dépasser pour les éléments à risques, dont l'azote.

Le registre, mis à jour chaque année, pourra alimenter le cadastre des épandages, géré au niveau de l'Administration de la Région wallonne qui permettrait de gérer et contrôler les flux des matières recyclables et de connaître à tout moment et en tout lieu le statut de sols en ETM grâce au logiciel SCARABEE (ou similaire) et peut-être aussi la matière organique et l'azote à l'aide du logiciel TALISOL (ou similaire).

Enfin, les multiples aspects de la gestion des déchets et de l'épandage des matières recyclables nécessitent une vigilance et une adaptation continue des mesures et paramètres de contrôles, tant au niveau des sols qu'au niveau des déchets en amont.

Dans cet objectif, il est souhaitable de mettre en place une structure constituée de responsables de l'Administration de la Région wallonne, de scientifiques, de gestionnaires de l'environnement et d'hommes de terrain, que l'on pourrait appeler « Observatoire des sols et des matières organiques ».

Ce dernier aurait pour mission, outre la vigilance sur les productions de déchets et la protection des sols, de suivre ce qui se fait dans les autres pays, de diffuser les connaissances nouvelles et de proposer des modifications adéquates dans le but de réduire les déchets et ses contaminants et de mieux protéger les sols pour le très long terme.

10.3 Au-delà de la directive "Nitrates"

Celle-ci ne recouvre qu'une partie des pratiques recommandables pour l'utilisation de matières recyclables dans les sols. La limitation des apports en fonction de plafonds en azote est un point positif mais bien insuffisant.

D'une part, de nombreux polluants potentiels sont à prendre en compte comme les ETM, les micro-organismes pathogènes et les micropolluants organiques très peu biodégradables.

D'autre part, les principes préconisés dans le code de bonnes pratiques vont, peut-être, limiter partiellement les migrations d'azote vers les eaux souterraines mais certainement pas les arrêter. Que peut-on envisager de mieux ?

En premier lieu, on peut dire que les zones de protection rapprochée des captages sont beaucoup trop « rapprochées » et les percolations directes ne sont pas rares. Une situation récente a montré un fermier situé à environ 50 m d'une zone de captage mais dont les jus s'écoulaient par un petit fossé orienté directement vers la zone de captage !

En second lieu, il est évident que pour nourrir directement les plantes à partir d'apports azotés, il faut apporter l'azote de manière homogène sur la surface du sol. Hors, comme il existe des écarts entre plantes, seulement une partie du sol sera exploitée par celles-ci, et dans les zones sans ou avec peu de racines, l'azote excédentaire sera lessivé après oxydation éventuelle.

En conséquence, vouloir nourrir directement les cultures en azote sans pertes, relève de l'utopie. La seule alternative envisageable est d'apporter l'azote sous forme lentement minéralisable (azote organique) et avec suffisamment de carbone (rapport C/N > 15 ou 20) pour entraîner un développement de la microflore du sol qui captera l'azote non utilisé par les plantes.

10.4 Perception du monde agricole par la société civile

Des propositions de révision du code de bonnes pratiques agricoles paraissent tellement justifiées dans le développement des mentalités actuelles de la population qui tolère de moins en moins les écarts par rapport à la protection de l'environnement. La population agricole risque d'être de plus en plus la critique de la population vigilante. *A contrario*, une prise en mains sérieuse des problèmes environnementaux n'est non seulement pas incompatible avec les intérêts des agriculteurs mais motivera ceux-ci dans leur rôle de gestionnaire de notre patrimoine environnemental et de producteur de nourriture saine qui pourra être fier de sa noble activité. Cela ne peut que ressusciter des vocations et créer de nouvelles activités et des emplois nouveaux dans l'agriculture au sens large et dans la préservation de notre patrimoine commun.

En guise d'épilogue, voici l'extrait d'un article de Daniel Bodson (Un sérieux coup de vache, LA REVUE NOUVELLE, Numéro 4, Tome 113, Avril 2001), qui est bien représentatif de l'évolution des mentalités.

« L'image ternie de l'agriculture

Traditionnellement, l'image sociale de l'agriculteur est liée à sa double fonction de nourricier de la société et de gardien de la nature, et en cela elle est nettement positive. Cependant, les problèmes liés à la surproduction et aux aides compensatoires interpellent la société sur le sens d'un métier axé à outrance sur la production. De même, les problèmes liés à la pollution des sols et à la santé publique interpellent le grand public sur la fiabilité des productions agricoles.

Quelle identité et donc quel rôle pour l'agriculteur du XXI^{ème} siècle ?

Depuis cinquante ans, être agriculteur c'est être capable de produire beaucoup, pour ne pas dire le plus possible. Il y avait un large consensus social autour de ce rôle dévolu aux agriculteurs tant au niveau des politiques qui l'exprimaient à travers un soutien massif à la production que des consommateurs satisfaits de disposer d'une alimentation surabondante à bas prix. Les agriculteurs se sont donc construits une identité autour de cette capacité à produire toujours plus et se sont d'ailleurs dotés de quelques emblèmes symbolisant à souhait cette conscience fière : que l'on songe à la race blanc-bleu, par exemple, fleuron de l'élevage wallon. A présent, le contexte évolue et le consensus autour d'une agriculture productiviste se lézarde pour ne pas dire est rompu tant du côté des autorités que du côté des consommateurs.

Cette remise en cause fondamentale ne va pas être sans conséquences : le scénario de la disparition des exploitations les plus fragiles paraît plus que probable. Mais, au-delà de cet impact économique imminent, ce bouleversement crée d'ores et déjà un malaise profond dans le groupe des agriculteurs. De la même façon qu'en fermant les mines, il y a quelques décennies, on a porté un coup fatal à l'économie, mais aussi à l'identité des régions houillères, l'abandon d'une politique agricole productiviste atteint gravement les agriculteurs dans leur identité même, et ce n'est pas la perspective de devenir les jardiniers du paysage qui risque de les réjouir.

Remise en cause de son rôle de producteur, modification de sa position dans le monde rural, évolution de son statut professionnel et effritement de son image sociale, l'agriculteur contemporain souffre d'un problème identitaire. Or l'identité que ce soit celle d'un individu ou celle d'une société, n'est pas d'abord liée à des qualités intrinsèques qu'il faut défendre contre des agressions extérieures. L'identité est liée à un positionnement dans un système d'échange et à la définition qui en découle. C'est pourquoi le renouveau de l'identité de l'agriculteur passera, non pas par un, mais par deux repositionnements : celui de l'agriculteur dans le monde rural, d'une part, celui du monde rural dans l'ensemble social, d'autre part. La succession des crises actuelles nous indique à suffisance qu'il est urgent et déterminant de réfléchir au nouveau positionnement que nous voulons donner à l'espace rural et à la place que l'agriculture doit jouer dans celui-ci.

Les agriculteurs ne veulent pas être réduits au simple rôle de jardinier du paysage et ils ont probablement raison, car renoncer à produire porterait un coup définitif à leur identité sociale. Dans notre société, en effet, un groupe social n'a pas d'identité fière s'il n'est pas inscrit dans un processus de production crucial pour le reste du corps social.

L'agriculture doit donc continuer à produire, mais autrement et surtout autre chose.

Autrement : on l'a évoqué plus haut, il ne s'agit pas de tout centrer sur la production artisanale, même si celle-ci doit avoir sa place. La seule production artisanale serait un mode de production dérisoire face aux besoins alimentaires de la société. Produire autrement veut dire produire en se souciant des effets collatéraux sanitaires, économiques et environnementaux. Autrement dit, en redéfinissant les règles de l'art de la profession.

11 BIBLIOGRAPHIE

- ABIVEN, *Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes, décembre 2004
- BODSON D., *Un sérieux coup de vache*, LA REVUE NOUVELLE, Numéro 4, Tome 113, Avril 2001
- BROWN S. and LEONARD P., *Biocycle*, Sept. 2004, p.25-28.
- CEMAGREF : Centre d'Etude du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, <http://www.cemagref.fr>
- DGRNE : Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, <http://environnement.wallonie.be/owd/dps>
- ENSP : Ecole Nationale de la Santé Publique, <http://www.ensp.fr>
- INRA : Institut National de la Recherche Agronomique - Cellule Environnement, <http://www.inra.fr>
- ROBERT M. et ARROUAYS D., *Carbon sequestration and greenhouse effect : new implications for european agriculture after Kyoto and Bonn*, Communication faite à Naples, Octobre 2001
- ROUSSEL *et al.*, *Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques*, Etude et Gestion des sols, 8, 1, 2001, p.65-81.
- TROEH F.R. & THOMPSON L.M. – *Soils and soil fertility* – 5th Edition – Oxford University Press, 1993

12 REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont permis de réaliser ce travail.