

Quantification des impacts environnementaux associés au traitement biologique et à l'utilisation agricole des produits organiques – bilan des connaissances

Mallard, P.¹, Gabrielle, B.², Vial, E.³, Rogeau, D.¹, Vignoles, M.⁴, Sablayrolles, C.⁴, Carrère, M.⁵, Renou, S.⁶, Pierre, N.⁷, Muller, O.³, Coppin, Y.⁸

1: UR Gestion environnementale et traitement biologique des déchets, CEMAGREF, 17, avenue de Cucillé, F-35044 Rennes Cédex.

2: UMR INRA INA P-G Environnement et grandes cultures, F-78850 Thiverval-Grignon.

3: Ecobilan, 63, rue de Villiers, 92 200 Neuilly-sur-Seine

4: Laboratoire de Chimie Agro-Industrielle, INP-ENSIACET, 118 route de Narbonne, F-31077 Toulouse Cédex 4.

5: Centre de Recherches sur l'Energie, l'Environnement et les Déchets, 291 av. D. Ducas, 78520 Limay, France.

6: Anjou Recherche, 36 rue de Liège, 75008 Paris.

7: ORVAL, 69140 Rilleux-la-Pape, France.

8: ADEME, DDS/DGBS, 2 square Lafayette, BP 90406, F-49004 Angers Cédex 01.

Résumé

L'utilisation agricole des déchets ou produits organiques (dont les déjections animales, les boues et les composts) apparaît intuitivement comme un mode de gestion respectueux de l'environnement, car mettant en œuvre des phénomènes biologiques « naturels » et permettant le « retour au sol » de la matière organique. Pourtant, la démonstration de ce bien-fondé environnemental se révèle difficile, tant sur le choix des critères à prendre en compte que sur la quantification des impacts environnementaux et sanitaires associés potentiellement aux filières de gestion biologique. Afin de contribuer à l'amélioration des pratiques en la matière, nous avons fait le point des connaissances disponibles ou manquantes permettant la quantification, non de ces impacts à proprement parler, mais des différents rejets et consommations de substances et d'énergie qui en sont à l'origine.

Sur la base d'une large revue bibliographique, des fourchettes de valeurs pour les différents facteurs d'impacts ont pu être proposées, concernant chacune des étapes de la filière : stockage, traitement, épandage et devenir ultérieur des produits dans le sol. Sans entrer dans le détail des résultats, il apparaît une grande sensibilité des facteurs d'impact à la nature des produits ainsi qu'aux conditions de traitement et de milieu (température, type de sol...), face à laquelle les connaissances disponibles s'avèrent souvent trop partielles. Les besoins identifiés relèvent de l'acquisition de nouvelles données en conditions réelles, ou bien de la compréhension et de la modélisation des phénomènes mis en jeu.

Mots-clés: produits organiques; déchets; analyse de cycle de vie; impacts environnementaux; synthèse de données

Introduction

La valorisation organique des déchets biodégradables constitue une des priorités de la politique de gestion des déchets, en France aussi bien qu'en Europe et dans de nombreux autres pays. L'enjeu est

de favoriser la gestion biologique des déchets, tout en maîtrisant les impacts environnementaux et sanitaires qui y sont potentiellement associés. Cette volonté de promouvoir une valorisation organique durable des déchets biodégradables s'inscrit dans la hiérarchie générale largement adoptée pour la gestion des déchets : prévention, réutilisation, valorisation matière, valorisation énergétique et élimination. Plus spécifiquement, elle se justifie par l'intérêt supposé du « retour au sol » de la matière organique, et par les nuisances qu'occasionnent les déchets biodégradables introduits dans les autres filières de traitement, notamment la mise en décharge.

Il est souhaitable, cependant, que cette politique de promotion de la valorisation organique puisse s'appuyer sur une démonstration objective du bénéfice environnemental qu'on peut en attendre. L'évaluation environnementale des filières de gestion biologique des déchets est effectuée actuellement à l'aide d'outils du type analyse de cycle de vie (ACV), notamment pour comparer entre eux des scénarios multi-filières. Cette méthodologie apparaît cependant fragile à bien des égards : sur les critères pris en compte, elle se heurte à de nombreuses incertitudes, tandis que d'autres critères a priori importants sont tout simplement ignorés (RDC Environnement, 2005).

De fait, la gestion biologique des déchets constitue un domaine complexe, en systèmes ouverts et où interviennent des phénomènes biologiques et physico-chimiques spécifiques et souvent difficilement quantifiables, comme la biodégradation de la matière organique lors du traitement ou bien la dynamique des éléments dans le sol. Pourtant, la connaissance scientifique et la modélisation de ces phénomènes a sensiblement progressé ces dernières années. Sans que toutes les questions soient encore résolues, la prise en compte de ces nouveaux acquis pour l'évaluation environnementale des filières de gestion biologique est susceptible d'en renforcer significativement la pertinence.

Cet article présente les résultats d'une étude menée par différents partenaires de la recherche publique et privée (Mallard et al., 2005), visant : **i/ à faire un bilan aussi complet que possible des connaissances disponibles sur le thème des impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets**, d'en proposer une synthèse et d'en déterminer les limites, et **ii/ à mobiliser les connaissances ainsi rassemblées, pour les adapter aux exigences méthodologiques de l'évaluation environnementale** (de l'ACV en particulier), qui doivent se baser sur un ensemble complet et homogène de données et d'hypothèses de calcul.

Champ de l'étude

Le parti pris a été de n'exclure a priori aucune filière de gestion biologique des déchets, du moins parmi celles aboutissant à une valorisation agronomique par retour au sol des produits, représentées significativement en Europe ou bien à valeur d'avenir. Toutes les étapes des filières ont été prises en compte, depuis la production du déchet jusqu'à l'utilisation agricole des produits, y compris leur devenir dans le sol, hormis les étapes éventuelles de collecte et de transport des déchets ou des produits, jugées non spécifiques de la gestion biologique.

En pratique, il s'est avéré que certaines filières étaient quasi-totalement ignorées quant à la quantification de leurs impacts environnementaux, comme les procédés de séchage des boues et des fientes de volailles, ou de traitement des résidus industriels (agro-alimentaires, papetiers...). Finalement, **outre l'épandage proprement dit et le devenir des produits après épandage (accumulation dans le sol ou exportation des éléments vers l'air, l'eau ou les plantes), quatre modes de traitement préalable à l'utilisation agricole ont été distingués :**

- Le traitement anaérobie (ou digestion anaérobie, ou méthanisation) : la biodégradation a lieu en l'absence d'oxygène et aboutit à la formation d'un produit plus ou moins liquide, appelé digestat, et de biogaz, composé essentiellement de gaz carbonique et de méthane. Le digestat fait souvent l'objet d'un pressage, en vue d'un traitement séparé des jus et de la fraction solide. Mises à part les

étapes de pré et post-traitement, la digestion anaérobie a lieu en enceinte fermée, dans des conditions contrôlées¹.

- Le compostage en phase solide (traitement aérobie): de même que le traitement anaérobie, le compostage peut concerner une grande variété de déchets et produits organiques (y compris des digestats issus du traitement anaérobie), traités seuls ou en mélange (co-compostage). Le compostage de produits humides et fermentescibles comme les boues, par exemple, suppose l'utilisation en co-substrat d'un produit structurant, copeaux ou déchets verts typiquement.
- Le stockage en phase liquide ou solide : il s'agit de stockage temporaire, préalable au traitement ou à l'épandage. Le lagunage a été rangé dans cette catégorie, ainsi que le traitement par aération en fosse. Ce dernier, appliqué aux lisiers porcin ou bovin essentiellement (ou à leur phase liquide après séparation de phase), est basé classiquement sur une alternance de périodes d'aération et d'anoxie permettant la nitrification puis la dénitrification de l'azote contenu dans les déjections.
- Les « autres traitements » : des traitements plus spécifiques aux boues, comme le séchage et le chaulage².

De même, dans la mesure où l'objectif était de répondre au caractère sommaire des évaluations environnementales existantes pour la gestion biologique des déchets, l'étude a voulu **porter sur l'ensemble des catégories d'impacts environnementaux, y compris et notamment les effets positifs de l'utilisation agricole des produits organiques** qui ne sont ordinairement pas considérés dans les évaluations environnementales globales des filières. Plus précisément, les catégories d'impacts environnementaux jugées pertinentes vis-à-vis des filières de gestion biologique et considérées dans l'étude ont été :

- ◇ l'effet de serre, à savoir les émissions de gaz à effet de serre et le stockage de carbone dans les sols ;
- ◇ les nuisances olfactives ;
- ◇ les retombées atmosphériques de composés acides ou nutritifs (surtout l'ammoniac en l'occurrence), causes d'eutrophisation et d'acidification des milieux ;
- ◇ la dégradation des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols ;
- ◇ la dégradation de la qualité de l'eau, concrètement l'eutrophisation des milieux aquatiques ;
- ◇ les problèmes de santé et de toxicité (y compris l'écotoxicité) ;
- ◇ les impacts liés à des flux intermédiaires, comme la consommation d'énergie, la consommation de ressources, l'utilisation d'engrais minéraux et la production de déchets résiduels.

Le risque microbiologique, sujet très spécifique et complexe, a cependant été laissé de côté, afin de limiter quelque peu l'étendue du travail.

¹ Dans cette logique, le lagunage des déjections animales (non pratiqué en Europe) sera assimilé à du stockage. La technique consiste à laisser se décomposer en bassins les déjections animales mélangées à de l'eau. Cette décomposition a lieu en conditions généralement anaérobies.

² Le traitement de biodéchets ménagers par chaulage est une technique proposée par certains prestataires, mais qui n'a guère dépassé le stade du prototype pour le moment.

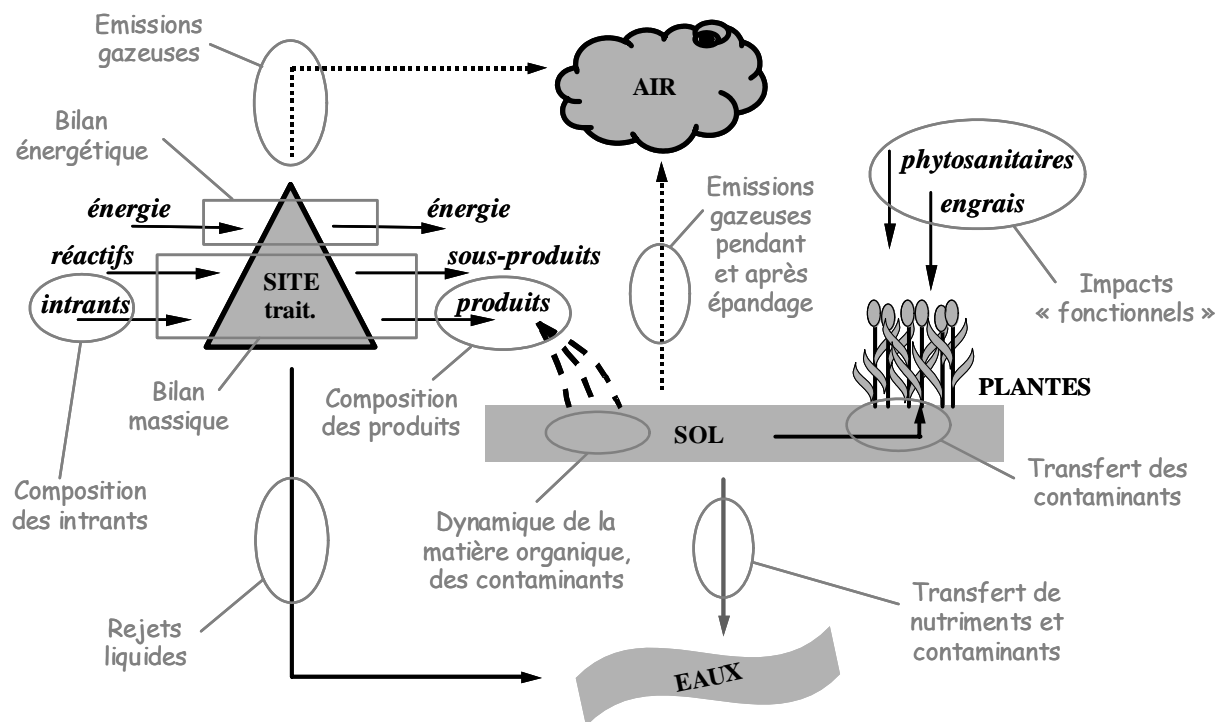


Figure 1. Les différents facteurs d'impacts étudiés pour les étapes successives des filières de gestion biologique. Les caractéristiques et phénomènes considérés figurent en gris.

Enfin, il s'est agi dans cette étude de **caractériser, non pas les impacts environnementaux des filières à proprement parler, mais les flux de substances responsables de ces impacts, dits « facteurs d'impacts »**. Soit, par exemple, de quantifier les transferts de nutriments vers les eaux liés à l'utilisation agricole de produits organiques, mais non de traduire ces transferts en termes d'eutrophisation. Ce sont ces facteurs d'impacts qui alimentent en effet les évaluations environnementales du type ACV, dès lors qu'ils se présentent sous une forme adaptée à cet usage. La synthèse et l'adaptation des données aux contraintes d'utilisation des ACV ont fait l'objet d'une seconde phase de l'étude, après celle de recueil et d'analyse des connaissances disponibles (voir ci-après). La Figure 1 présente les différents facteurs d'impacts étudiés et les étapes des filières associées.

Analyse bibliographique et calcul des émissions

Les différents modes de traitement des déchets, étapes techniques, impacts potentiels associés ont été croisés en « thèmes », comme compostage et gaz à effet de serre, épandage et consommation d'énergie, ou fertilisation organique et pollution de l'eau.

La première étape du travail a consisté à choisir un ensemble de publications donnant, pour chaque thème défini, un bon aperçu de l'état des connaissances, sans prétendre à l'exhaustivité. Les publications prises en compte, à caractère scientifique ou technique, sont généralement en français ou en anglais. Hormis quelques-unes connues au préalable ou accessibles via Internet, elles ont été le plus souvent identifiées via une recherche dans les bases bibliographiques classiques ou dans les bases documentaires des organismes impliqués dans l'étude (dont l'ADEME³). La littérature

³Agence Française de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

en langue germanique ou des pays d'Europe du Nord, bien pourvue en matière de traitement biologique, n'a pas été exploitée.

Pour le **dépouillement des publications**, une grille d'analyse a été construite, comprenant des mots clés relatifs aux déchets ou produits, aux modes de traitement ou étapes techniques, et aux catégories d'impact considérés, et des rubriques décrivant exactement la méthodologie employée et les résultats obtenus. Au total de 150 fiches de lecture ont ainsi été renseignées (elles seront bientôt disponibles sur le site de l'ADEME, www.ademe.fr).

A l'issue de cette **analyse critique des connaissances**, des données de référence ont été obtenues. Ces données ont été adaptées afin d'être plus facilement exploitables par la suite, en vue de la réalisation d'évaluations environnementales globales du type analyse de cycle de vie. Elles ont été rassemblées par étape technique et leur représentativité en vue d'une utilisation ultérieure a été caractérisée. Pour cela, la méthodologie préconisée dans les normes ISO 14040 et 14041 (ISO, 1997) relatives à l'analyse de cycle de vie a été utilisée. Cette méthode a permis de présenter un **bilan synthétique et cohérent des données obtenues**, et de mettre ainsi en évidence les lacunes des connaissances disponibles ou de notre analyse pour les différentes filières et catégories d'impacts considérées. Les données issues de l'étude ont ensuite été comparées à d'autres sources de données afin de valider leur pertinence. Enfin, différents **points méthodologiques** ont été traités afin de faciliter l'utilisation ultérieure de ces données pour l'évaluation environnementale de la gestion biologique des déchets.

Résultats par étape élémentaire

Compte tenu de l'importante quantité de résultats élémentaires présentés dans le rapport de l'étude rapportée ici (Mallard et al., 2005), nous présentons ici seulement quelques exemples concernant les phases de traitement, stockage, épandage et devenir ultérieur des produits dans le sol. De façon générale, des fourchettes de valeurs ont pu être proposées pour les différents facteurs d'impacts, faisant apparaître une grande sensibilité à la nature des produits ainsi qu'aux conditions de traitement et de milieu (température, type de sol...). Une valeur médiane a également été retenue, si les références disponibles étaient suffisamment nombreuses et concordantes. Enfin les émissions ont été rapportées à un flux de référence en rapport au service rendu (élimination/recyclage des déchets), qui par défaut était la tonne de matière sèche (MS) de déchets. D'autres unités ayant un meilleur pouvoir explicatif ont aussi été utilisées en plus (flux polluant par kg N ou kg P contenu dans le déchets par exemple).

Emissions de gaz à effet de serre

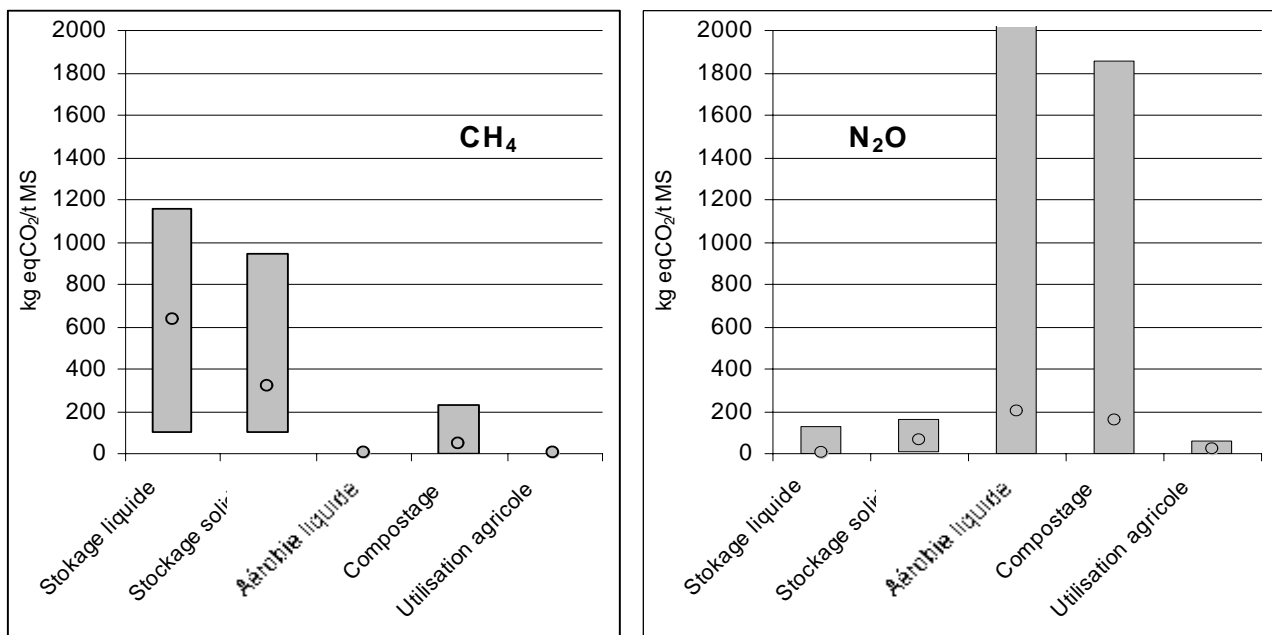


Figure 1: Emissions de gaz à effet de serre, par tonne de matière sèche traitée et hors épuration des gaz sortants, liées aux différentes étapes des filières de gestion biologique. L'utilisation agricole désigne l'épandage et le devenir ultérieur du produit dans le sol.

Les deux graphiques de la Figure 2 permettent de comparer les contributions des différentes étapes des filières telles que résultant de la revue bibliographique. Les chiffres, donnés globalement pour tous types de produits organiques, sont à considérer avec précaution :

- Pour chaque étape (stockage, ...), le rond représente la valeur « moyenne plausible ». Cette valeur a été approchée souvent à partir d'un petit nombre de données, souvent aussi très inégales. Elle souffre donc parfois d'une large incertitude.
- Pour les mêmes raisons, les valeurs d'émissions minimales et maximales relevées, correspondant aux extrémités de chaque barre verticale, ne sont pas représentatives des situations réelles.
- Outre l'incidence des conditions de traitement ou de milieu (température, oxygénation, type de sol...), les valeurs d'émissions peuvent varier sensiblement selon la nature des déchets. Or, les données d'émissions de CH₄ et N₂O disponibles dans la littérature concernent le plus souvent des déjections animales. Il serait donc hasardeux de les extrapoler directement à tous les types de déchets, boues, déchets ménagers ou industriels, ayant subi ou non un traitement préalable.

Au-delà des incertitudes, on constate par exemple que le compostage émet moins de CH₄ que le stockage solide mais, qu'en terme d'effet de serre (pouvoir de réchauffement global), cette différence peut être plus que compensée par les émissions de N₂O.

Valeur fertilisante

La valeur fertilisante correspond à une équivalence avec un engrais minéral de référence, du point de vue de la production agronomique (Figure 3). Il y a très peu de données sur les autres éléments : K, S, et micro-éléments (hormis Ca pour la valeur d'amendement basique des boues chaulées).

Conclusion sur l'analyse bibliographique

Des lacunes de connaissances ont été identifiées à différents niveaux dans l'analyse bibliographique: sur certaines filières « orphelines », et certains impacts ou facteurs d'impacts; sur la compréhension des phénomènes pour expliquer les émissions; et sur la compatibilité des résultats avec l'approche

ACV. Sur le premier point, les filières les moins connues globalement sont les résidus industriels et le traitement des boues en particulier. La méthanisation des déjections animales, de même que les impacts liés à la présence d'éléments traces métalliques (ETM) dans les déjections, sont peu étudiés, de même que les émissions gazeuses liées au stockage et au compostage des boues et biodéchets.

Concernant les facteurs d'impacts, les lacunes varient selon les filières et leurs étapes respectives. Sont apparus comme peu ou pas documentées: les pertes sous forme liquide au stockage; les émissions de composés organiques volatils (COV); la composition des jus et du digestat de méthanisation; les transferts de composés traces organiques (CTO) et ETM vers les eaux et les plantes; sur la protection phytosanitaire et sur la valeur fertilisante (oligo-éléments) des déchets.

Les connaissances sur les processus en jeu se sont souvent avérées trop partielles pour expliquer et prédire la variabilité des émissions en fonction des conditions physiques ou de la nature des déchets traités ou épandus. En particulier, le lien entre qualité des MO des déchets et impacts, faute d'informations sur les caractéristiques physico-chimiques, biochimiques ou microbiologiques des déchets, de même qu'une description complète du processus de traitement. Beaucoup des données ont également été obtenues en conditions contrôlées de laboratoire, sans que les auteurs indiquent dans quelle mesure leurs résultats pouvaient être extrapolés à l'échelle du champ cultivé. Enfin pour certains facteurs d'impacts c'est la métrologie même de mesure des flux qui reste à développer, notamment in situ (émissions gazeuses lors des phases de traitement, ou des CTO lors de l'épandage).

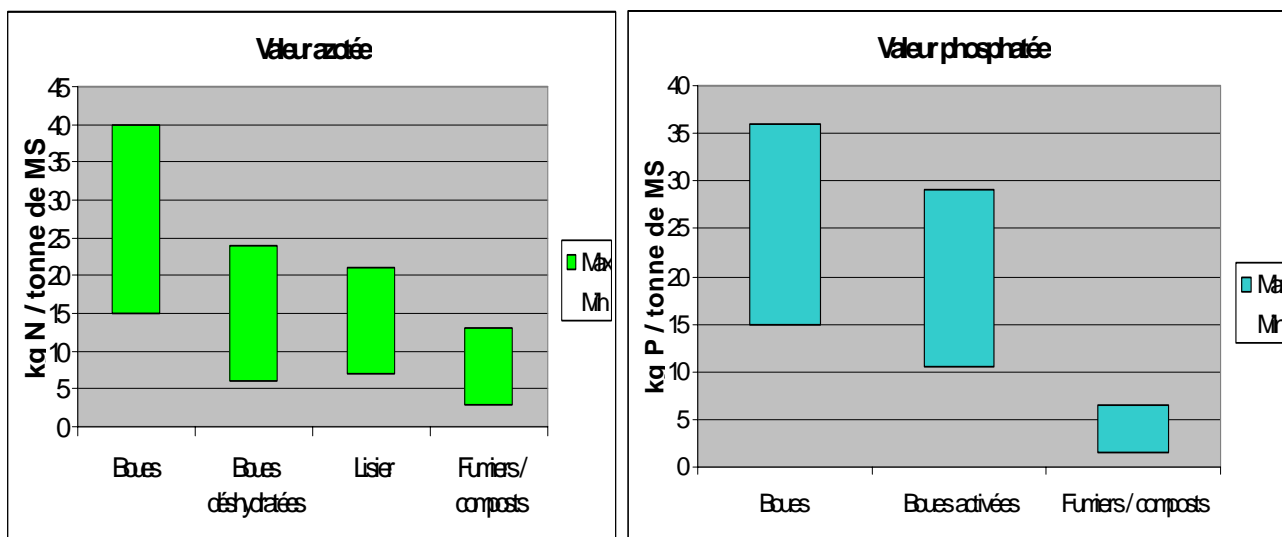


Figure 2: Valeurs fertilisantes azotée et phosphatée de différents types de déchets biologiques.

Synthèse et construction de bases de données

Dans une seconde phase, les valeurs de référence proposées ont été présentées et adaptées de façon à être directement exploitables dans le cadre d'évaluations environnementales du type analyse de cycle de vie.

Plusieurs niveaux de lecture sont proposés par type de traitement pour exploiter les données collectées durant la revue bibliographique. Un premier niveau de lecture (niveau 1) correspond à la synthèse des données collectées ramenées à un flux de référence qui est 1000 kg de matière sèche de déchet entrant sur site. Un niveau de lecture plus approfondi (niveau 2) correspond à une mise en forme des données de référence selon un format détaillant la représentativité, la variabilité ainsi que les sources des données utilisées.

Des valeurs de références ainsi que les valeurs minimales et maximales sont données pour chaque type de déchets et pour chaque entrant (consommation d'énergie, d'eau etc.) et sortant (produit en sortie, émissions dans l'air, dans l'eau etc.). Ce tableau permet de disposer d'un jeu de données

directement utilisable dans une analyse de cycle de vie avec une fourchette de variation pour réaliser des analyses de sensibilité.

Un extrait de tableau de niveau 2 relatif aux émissions de N₂O du compostage, est également présenté en annexe (Tableau A-2). Ce format permet de mieux appréhender la qualité des données notamment en matière de :

- Sources de données et traitement de ces données pour obtenir la valeur de référence et la fourchette de variation,
- Représentativité temporelle (date à laquelle les données bibliographiques ont été relevées),
- Représentativité géographique, technologique (par exemple le type de compostage),
- Durée de l'émission considérée pour la valeur retenue et durée totale théorique de l'émission.

Cette description de la qualité des données reprend les principales exigences de la norme ISO/TS 14048 relative au format de documentation des données en analyse de cycle de vie.

Les données collectées lors de cette étude ont été comparées avec des données issues de base de données ACV publiques existantes (Ecoinvent⁴, Wisard^{TM5}). Concernant l'effet de serre, une comparaison a également été réalisée avec les données du GIEC⁶.

La comparaison avec les données issues de la base de donnée Ecoinvent consacrée à l'agriculture et du logiciel WisardTM montre des résultats du même ordre de grandeur excepté les émissions dans l'eau, qui sont très supérieures dans la présente étude aux données du logiciel WisardTM, différence qui s'explique en partie seulement par la prise en compte d'un traitement avant rejet pour la base de donnée du logiciel WisardTM.

Pour les boues, les indications du GIEC sont maigres, et la présente étude n'a pas permis de trouver plus de données. Les émissions de protoxyde d'azote collectées durant la présente étude sont plus faibles que les données du GIEC pour tous les traitements confondus. Selon la recherche bibliographique effectuée lors de la présente étude et au contraire des valeurs données par le GIEC, il n'est pas fait état par exemple d'émissions de méthane lors du traitement aérobique liquide ou de méthane fugitif pour la digestion anaérobie. Les émissions de protoxyde d'azote sont également systématiquement inférieures aux émissions du GIEC.

Conclusion générale

L'étude a permis de souligner les forces et faiblesses des connaissances actuelles sur les impacts des filières biologiques, et de pointer des besoins en matière de recherche et développement. Ces derniers concernent principalement l'acquisition de nouvelles données en conditions réelles (par rapport à des données de laboratoire), la compréhension et de la modélisation des phénomènes mis en jeu pour lier

⁴ La base de donnée consacrée à l'agriculture aborde le domaine de la gestion des déchets biologiques. Cette base de donnée a été compilée par FAT, le laboratoire fédéral suisse d'économie et d'ingénierie agricole et par FAL, le laboratoire fédéral suisse d'écologie agricole sous la direction de Thomas Nemecek du FAL

⁵ Le logiciel WISARDTM utilise la méthode de l'ACV pour calculer les impacts environnementaux du traitement des déchets ménagers et assimilés. Il a été développé par la société Ecobilan suite notamment à des études menées pour Eco-Emballages et l'ADEME depuis 1993. La version utilisée ici est la version 4.0 datant de 2002.

⁶ Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

les conditions locales de la gestion biologique des déchets aux impacts environnementaux. Les composés à étudier en priorité sont les COV, les oxydes d'azote NOx, et les composés traces.

L'étude a permis de compléter les bases de données publiques d'ACV du traitement des déchets biologiques, sur le stockage solide / liquide, le traitement aérobie en fosse, le chaulage, et le traitement des déjections animales.

Pour les étapes déjà couvertes par des données d'ACV, comme le compostage, la digestion anaérobie et l'utilisation agricole, la présente étude a permis de préciser et d'améliorer les modèles existants.

Par rapport au cadre méthodologique proposé par le GIEC pour le calcul des émissions de gaz à effet de serre, les données rassemblées dans la présente étude sont sensiblement cohérentes. Elles apportent des compléments pour certaines sources d'émissions non prises en compte par le GIEC. Notamment, le GIEC ne considère les émissions liées au compostage que dans le cas des déjections animales, et non des autres déchets. Par ailleurs, les facteurs d'émission de méthane et de protoxyde d'azote fixés par le GIEC pourraient être sur-estimés à l'exception des émissions de méthane liées au stockage solide du fumier.

Enfin l'étude a également mis en lumière les limites de la méthodologie ACV comme cadre indépassable de l'évaluation des différents modes de gestion des déchets. En effet la méthode nécessite des adaptations importantes pour pouvoir intégrer des impacts plus qualitatifs: émissions d'odeurs, impacts sanitaires via la dispersion de pathogènes dans l'environnement, accumulation de polluants-traces dans les sols. Dans l'élaboration d'un diagnostic global, l'outil ACV pourrait donc être utilement complété par des méthodes issues du domaine de l'analyse des risques et d'impacts, basés sur des scénarios locaux propres aux sites où seraient mises en oeuvre les traitements.

Références bibliographiques

Hellebraut, F., et B. Decaevel, B (2005). Bilan des connaissances ACV sur les enjeux environnementaux de la gestion des déchets organiques. Rapport de synthèse, RDC Environment – ADEME (<http://www.ademe.fr/collectivites/dechets-new/sante/acv.htm>).

ISO (1997). Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Standard EN ISO, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.

Mallard, P., D. Rogeau, B. Gabrielle, M. Vignoles, C. Sablayrolles, V. Le Corff, M. Carrère, S. Renou, E. Vial, O. Muller, N. Pierre, et Y. Coppin. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets - bilan des connaissances. Rapport final Contrat ademe GBD 03, ADEME, Angers, France, 2005.