

# Évaluation de la qualité environnementale des épandages agricoles : une nouvelle approche à l'aide de l'analyse de cycle de vie

François Thirion

*En juin 2005, la revue Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires publiait un article intitulé « Écotecnologies et écoconception : concepts et mise en œuvre » (Roux et al., 2005). Dans le cadre de leurs travaux de recherche visant à améliorer la qualité environnementale des opérations d'épandages agricoles, les auteurs nous expliquent ici comment ils ont appliqué ces concepts et plus particulièrement l'analyse de cycle de vie (ACV). Le présent article retrace l'expérimentation de l'ACV dans ce contexte et montre les éléments de différenciation des principaux impacts de l'épandage et de hiérarchisation des problèmes.*

La démarche d'amélioration de la qualité environnementale des épandages conduite au Cemagref (pôle Épandage-Environnement de Montoldre) se situe à l'interface des recherches agronomiques et des recherches industrielles. Nous souhaitons, dans ce cadre, nous inscrire dans la ligne du plan d'action pour les écotecnologies environnementales adoptée en 2004 par la Commission européenne (CDCE, 2004). De nombreux travaux de recherche et développement dans le domaine des agroéquipements et des pratiques agricoles associées tiennent compte de cette préoccupation : pulvérisateurs de produits phytosanitaires et épandeurs d'engrais plus précis, moteurs moins polluants, équipements moins lourds pour interventions légères, etc. Cependant, ces améliorations sont souvent le fait de démarches encore peu structurées et surtout, elles ne sont pas valorisées à juste titre faute d'un référentiel d'évaluation adapté. Ainsi, pour favoriser le développement d'écotecnologies en agriculture, et donc l'écoconception de nouveaux équipements, il paraît indispensable de pouvoir évaluer la réduction des impacts respectifs de différentes solutions technologiques placées dans leur contexte. L'analyse du cycle de vie (ACV) propose une méthodologie tout à fait adaptée à cette problématique. C'est en effet une méthode normalisée multicritère spécialement conçue pour évaluer les impacts sur l'environnement d'un processus ou d'un produit, depuis l'extraction des ressources naturelles jusqu'aux filières de traitement en fin de vie, selon une approche dite « du berceau à

la tombe ». Nous nous proposons ici d'appliquer l'ACV à trois scénarios appliqués à l'épandage (i) d'engrais minéraux, (ii) de lisier et (iii) de fumier. Cette analyse intégrée, dans un même bilan, le rôle des agroéquipements et les effets induits de la fertilisation. Pour ces derniers, nous nous basons sur des valeurs moyennes qui, sur des cas concrets, peuvent largement osciller suivant les types d'élevages et d'animaux, les conditions agronomiques ou les traitements éventuels des produits (compostage, méthanisation...). Une illustration de cette variabilité est donnée dans l'étude de Basset-Mens et Van der Werf (2005). Nous commencerons ici par définir les systèmes étudiés, puis nous recenserons les émissions pour en déterminer les impacts et finalement dresser le bilan des trois scénarios.

## La définition du champ d'étude

C'est la première étape de l'ACV : le choix du système retenu va conditionner les résultats et doit donc être strictement défini dans toute étude de ce type. On ne pourra donc utiliser les conclusions sans se référer au champ d'étude sélectionné. Il comprend trois éléments principaux : les limites ou frontières du système, l'unité fonctionnelle et les hypothèses de départ.

## Les frontières du système

L'analyse de cycle de vie s'applique classiquement à un système bien défini comme une exploitation agricole. Dans ce cas, il est relativement aisé d'inventorier les éléments entrant

### Les contacts

Cemagref, UR  
Technologies et  
systèmes d'information  
pour les agrosystèmes,  
Domaine des  
Palaquins, Montoldre,  
03150 Varennes-  
sur-Allier

dans l'exploitation (engrais, semences, produits de traitement, machines, carburants...) et les éléments sortants (récoltes, animaux...).

Pour l'épandage, la définition du système est plus délicate, car nous considérons en fait une activité particulière faisant partie du fonctionnement global de l'exploitation. Dans les apports externes sont considérés en particulier les équipements utilisés pour cette activité (épandeur, tracteur et garage) et leur approvisionnement en fuel et consommables d'entretien-réparation. Nous ferons au sujet de ces entrées, une distinction entre engrais minéraux et organiques. Les engrais minéraux sont achetés à l'extérieur et sont donc considérés comme intrants à part entière. Les engrais organiques sont par contre des coproduits issus de l'exploitation. Il faut donc définir une règle d'allocation des principales émissions produites par l'élevage et le stockage, suivant un ratio estimé « valeur économique en éléments fertilisants de l'engrais organique » sur « valeur économique des productions globales de l'activité élevage ».

Notre objectif étant de comparer trois types d'épandage (engrais minéraux, lisier et fumier), nous n'avons pas non plus intégré le bénéfice issu de l'apport des unités fertilisantes, c'est-à-dire la quote-part de production agricole que l'on peut y rattacher. Il y a bien, en effet, un rééquilibrage du bilan environnemental par ce produit supplémentaire, mais considéré comme identique dans

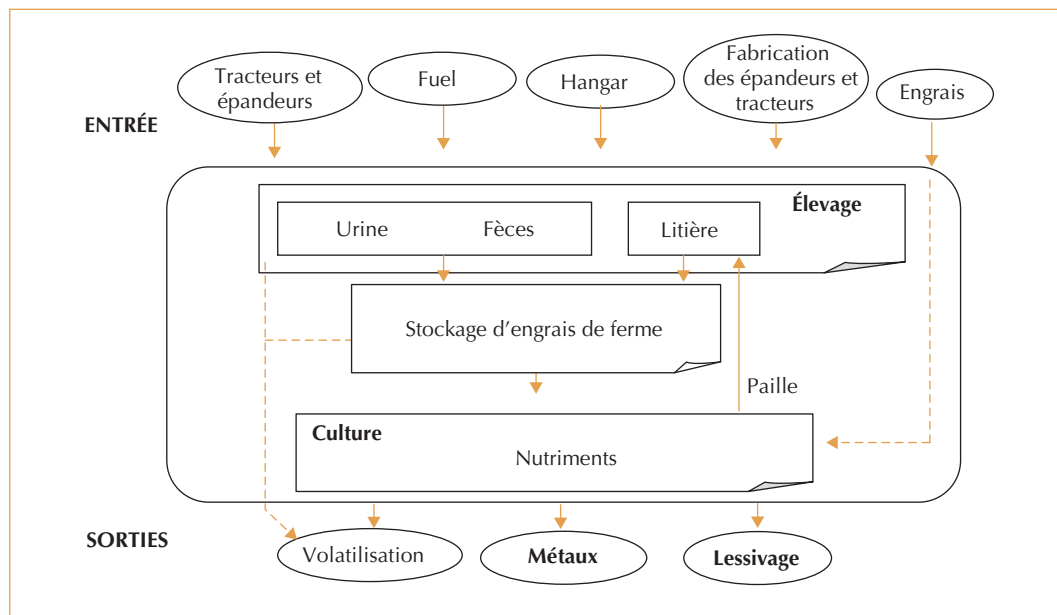
les trois cas. Cette affirmation est contestable en ce qui concerne la fertilisation azotée puisque dans l'apport d'azote avec des engrais organiques, nous devons différencier ce qui est effectivement valorisé en fertilisation directe, de ce qui le sera plus tard par arrières-effets. Ceux-ci, suivant les conditions, ne valoriseront pas toute la matière azotée apportée (nitrification partielle ou trop lente par rapport au cycle végétal, transferts diffus dans le sol...). Cependant, il faut savoir que la fertilisation organique a d'autres atouts difficilement chiffrables en terme de production tels que l'amélioration de l'activité biologique et des propriétés physiques des sols. L'équivalence globale des apports ne peut donc être démontrée et constituera notre première hypothèse simplificatrice.

En définitive, le champ d'étude peut être représenté par le graphique (figure 1), adapté de Dourmad *et al.* (2005). Le cycle de vie sera considéré entièrement, de la fabrication des équipements jusqu'à leur mise au rebut, en développant plus particulièrement la phase opérationnelle, réellement spécifique.

### L'unité fonctionnelle

C'est l'unité de référence permettant une comparaison quantifiée entre différents systèmes pour un service rendu donné, c'est-à-dire pour notre étude, la fertilisation. Ce service rendu peut être estimé à l'aide de la notion d'unité fertilisante

▼ Figure 1 – Représentation graphique du système étudié avec ses entrées et sorties.



(encadré 1). Pour effectuer ces comparaisons, nous nous baserons donc sur un apport, dans chaque cas, de 100 unités (100 kg) d'azote. Pour satisfaire la législation concernant les engrais organiques et ne pas dépasser la limite réglementaire (170 kg d'azote d'origine organique par hectare et par an), les 100 kg d'azote seront donc épandus sur 0,59 ha.

1 Unité Fonctionnelle = 100 kg d'azote  
sur 0,59 ha

Pour un fumier de bovins, cette quantité définit le flux de référence correspondant à un apport de 20 t avec une concentration de 5 unités d'azote par tonne. Pour un lisier de porcs<sup>1</sup>, le flux de référence est de 23 m<sup>3</sup> (concentration de 4,35 unités d'azote par m<sup>3</sup>). En engrais minéraux, l'apport correspondant à 100 kg d'azote est de 300 kg d'ammonitrate pour un dosage commercial de 33,5 % de N, auquel nous ajoutons 45 unités de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> soit 100 kg de superphosphate 45, afin d'obtenir un apport relativement similaire à ceux des engrais organiques. La surface épandue (0,59 ha) est dans ce cas effectuée en deux passages pour tenir compte des possibilités de fractionnement avec les engrais minéraux. Pour fournir 100 unités d'azote à cette surface de 0,59 ha, nous avons donc deux apports différents (50 + 50 par exemple).

#### Encadré 1

Il est d'usage de calculer la fertilisation à partir d'unités fertilisantes. Pour l'azote, par exemple, l'unité azote équivaut à 1 kg d'élément N (poids atomique 14) qui peut être sous forme ammoniacale, nitrique, uréique ou organique. Ainsi un kilogramme d'ammonitrate 33 % contient 0,33 kg d'azote sous forme mi-ammoniacale et mi-nitrique (nitrate).

Si un kilogramme d'azote se volatilise sous forme d'ammoniac (NH<sub>3</sub>), on obtient  $17/14 = 1,21$  kg d'ammoniac, puisque la molécule contient trois atomes d'hydrogène pour un atome d'azote. De même, un kilogramme d'azote produit par lessivage 4,43 kg de nitrates.

Avec les engrais organiques, la quantité d'azote minérale doit être évaluée au cas par cas, par analyse, alors que pour les engrais de synthèse, la composition est parfaitement connue (Schvartz *et al.*, 2005).

## Hypothèses

Nous énonçons ici les hypothèses de l'étude afin de mettre en évidence ses conditions précises de validité.

La première hypothèse, déjà évoquée au paragraphe « Frontières du système », est le service rendu identique des trois apports à la production agricole. La seconde hypothèse est le suivi des bonnes pratiques de fertilisation par l'agriculteur, selon un bilan de fumure équilibré. La troisième hypothèse concerne l'utilisation d'une technologie classique actuelle d'épandage dont les performances ont été évaluées par le pôle Épandage-Environnement.

## L'inventaire des flux

Cette seconde étape de l'ACV permet de quantifier les flux entrants et sortants liés au périmètre d'étude défini. Nous les classons en deux catégories : flux indirects, en amont ou aval de la phase opérationnelle, et flux directs, c'est-à-dire ceux générés pendant cette phase opérationnelle d'épandage.

### Flux indirects en amont ou aval de la phase principale du cycle de vie

Nous considérons qu'il s'agit des flux générés par tous les composants du système étudié en dehors de la phase opérationnelle d'utilisation (épandage). Ces flux comprennent des consommations (fuels, etc.), des émissions dans l'air et des rejets dans l'eau et vers les sols. Pour les équipements utilisés en épandage, il convient de déterminer la part des flux que l'on peut affecter à l'épandage d'une unité fonctionnelle. Si, par exemple, un tracteur pesant 5 000 kg travaille 6 000 heures dans son cycle de vie, on affecte 0,83 kg (tracteur) par heure de fonctionnement. Si, d'autre part, l'épandage d'une unité fonctionnelle nécessite 0,5 heure, le ratio considéré sera donc de 0,415 kg (tracteur) par unité fonctionnelle (100 kg d'azote). Pour tenir compte en outre des ressources consommées pour l'entretien et les réparations de ces équipements, on majore forfaitairement le poids de la machine (par exemple, de 20 % pour les tracteurs).

Les données concernant les émissions générées par la fabrication et la fin de vie des tracteurs et machines agricoles sont issues de la base de données d'origine suisse : Ecoinvent (Nemecek *et al.*, 2004). La fabrication des tracteurs et leurs

1. Contrairement au fumier dont l'unité d'application est la tonne, l'unité utilisée par le lisier est le m<sup>3</sup>.

caractéristiques étant internationales, on peut considérer que les valeurs indiquées pour la Suisse sont du même ordre pour la France. De même, la construction d'épandeurs est réalisée dans des petites et moyennes entreprises, avec des composants similaires et donc dans des conditions suffisamment proches entre la Suisse et la France pour permettre l'utilisation de ces références. La même base de données nous fournit également des indications, tant sur les émissions liées à l'approvisionnement en fuel qu'en engrais.

Il faut en effet considérer les flux liés à la fabrication d'engrais. La fabrication d'ammonitrate provoque une forte dépense d'énergie liée à la synthèse d'ammoniac combinant azote et hydrogène dans un réacteur à pression et température élevée. La fabrication d'engrais phosphatés demande surtout un prélèvement direct de ressources naturelles. La fabrication de fumier et lisier, liée à l'activité d'élevage génère principalement du méthane et de l'ammoniac :

– le méthane ( $\text{CH}_4$ ) est un gaz à effet de serre fortement émis en agriculture. Ces émissions polluantes se produisent majoritairement lors de la digestion des ruminants et concernent donc indirectement notre fumier de bovin. Un calcul sommaire nous a permis d'estimer l'allocation correspondant à l'épandage, différenciée de l'allocation affectée aux produits de l'élevage (lait, viande). Une quantité de 20 t de fumier (flux de référence) correspond à la production annuelle de 4,5 vaches logées l'hiver sur litière à paille accumulée. Chaque vache produisant 90 kg de méthane par an, le flux est de 405 kg dont nous ne considérons qu'une partie définie par le rapport « équivalent économique du fumier produit » (20 euros/an) sur « production économique d'une vache » (1 850 euros/an). Le flux considéré est donc de 4,4 kg de méthane pour une unité fonctionnelle de fumier ;

– l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) est émis au niveau des bâtiments d'élevage et du stockage selon des quantités équivalentes en moyenne à celles émises lors de l'épandage. En retenant les mêmes règles d'allocation que précédemment, cela nous amène à majorer de 1 % les flux directement relatifs à l'épandage.

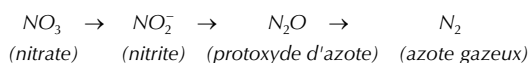
### Flux directs de la phase principale du cycle de vie

Les flux directs sont liés à la phase opérationnelle du système, c'est-à-dire à l'épandage de fertilisants

et d'amendements. Ces flux sont essentiellement constitués d'émissions, mais aussi de consommation de ressources énergétiques. Les émissions sont classées selon trois compartiments : air, eau et sols. Pour l'agriculture, nous prenons plus particulièrement en compte les sols cultivés.

#### LE PROTOXYDE D'AZOTE $\text{N}_2\text{O}$

Il est émis lors de la dénitrification incomplète des nitrates. Le phénomène de dénitrification aboutit à la formation d'azote gazeux sans effet sur l'environnement. C'est ce processus qui est utilisé pour épurer les eaux chargées en nitrates dans des ripisylves, zones humides en bord de rivière.



La réaction de dénitrification se produit également en culture et est favorisée par une concentration élevée de nitrates. Cette réaction peut s'avérer incomplète, se limitant à l'étape d'émission de protoxyde d'azote. Ce  $\text{N}_2\text{O}$  est un gaz à fort effet de serre dont la durée de rétention dans l'atmosphère est de 150 ans. Il participe aussi à la destruction de la couche d'ozone. Nous considérons une émission de 1,96 kg de  $\text{N}_2\text{O}$  (pour une unité fonctionnelle), correspondant à 1,25 % de l'apport en azote.

#### L'AMMONIAC $\text{NH}_3$

La volatilisation ammoniacale dépend de nombreux paramètres : température, pH, vent, dose... L'ammoniac perdu par volatilisation retombe non loin de son point d'émission. Ces dépôts contribuent à l'acidification du sol lorsque les ions ammonium se substituent sur le complexe argilo-humique à des ions calcium. En effet, les cations libres en solution dans le sol et les cations fixés sur le complexe sont en équilibre. Le lessivage des ions  $\text{Ca}^{++}$  libres se traduit par une diminution du pH. Les pertes en azote peuvent être conséquentes (Morvan *et al.*, 2004). Pour le fumier et le lisier, nous considérons (en l'absence d'enfouissement rapide) que la volatilisation correspond à 45 % de l'azote ammoniacal contenu. Pour un fumier où 10 % de l'azote total est sous forme ammoniacale, l'émission est de 4,5 kg d'azote ammoniacal (pour 20 t de fumier) ou 5,5 kg d'ammoniac. Pour le lisier de porc, le flux est de 22,5 kg de N soit 27,3 kg de  $\text{NH}_3$ . Pour les engrais minéraux, la volatilisation est faible puisqu'elle se limite à la phase d'humectation et d'imprégnation par le sol : 3,5 kg de  $\text{NH}_3$ .

#### LES NITRATES $\text{NO}_3$ SONT ÉMIS DANS LE COMPARTIMENT « EAU »

Le lessivage de nitrates a principalement lieu en période automnale et hivernale. On peut alors avoir une lame drainante chargée à 50 mg/l de nitrates, même pour une fertilisation équilibrée. Nous considérons donc que tout apport excédentaire d'azote (déséquilibre du bilan) participe au lessivage. Selon nos hypothèses, nous excluons les excès qui pourraient être dus à de mauvaises pratiques agricoles pour nous concentrer sur les excédents liés à un fonctionnement imparfait de l'épandeur. Pour le fumier, en référence à nos données d'essai, nous considérons un lessivage de 80 kg de nitrate provoqué par ces surdosages provenant d'une part de l'hétérogénéité d'épandage et d'autre part de la difficulté de réglage (qui amène généralement à surdoser). En engrais minéraux et lisier, où la précision est meilleure, les émissions considérées sont respectivement évalués à 33 et 23,2 kg de nitrate.

#### LES PHOSPHATES $\text{PO}_4$

Les phosphates sont surtout émis par ruissellement en surface de parcelle. Nous avons considéré une émission de 4 kg pour le lisier et l'engrais minéral et 2 kg pour le fumier. Nitrates et phosphates participent à l'eutrophisation des rivières et étangs.

#### LES MÉTAUX LOURDS

Il faut prendre en considération les métaux lourds apportés par le fumier, le lisier et les engrais minéraux chiffrés d'après des données de l'ADEME<sup>2</sup>. L'émission vers les sols est considérée comme une sortie dans notre cas, ce qui peut être discutable, mais ne remet pas en cause le bilan. Les quantités exportées par les récoltes pourraient être déduites de ces apports, mais ne sont pas prises en compte ici car les organismes commercialisant les céréales estiment qu'elles sont en dessous des seuils d'analyse.

#### LES FLUX ÉMIS PAR LES ÉQUIPEMENTS D'ÉPANDAGE

D'autres émissions directes proviennent du fonctionnement des machines lors de l'épandage. Elles ont été estimées par la FAT<sup>3</sup> en Suisse (Nemecek *et al.*, 2004). Ainsi, les gaz d'échappement du moteur diesel comprennent divers polluants alimentant le compartiment air. En quantité, c'est le gaz carbonique qui prédomine avec 3,12 kg de  $\text{CO}_2$  par kilogramme de fuel consommé. Les émissions de monoxyde de carbone (CO) et d'oxydes

d'azote dépendent des réglages et de la charge du moteur. Elles sont estimées à 0,118 g de  $\text{N}_2\text{O}$  et 42 mg de  $\text{NO}_x$  par kilogramme de fuel.

L'usure des pneumatiques du tracteur et éventuellement de l'épandeur laissent dans le sol des particules de caoutchouc qui contiennent des éléments trace métalliques issus de la fabrication des pneus. On rapporte l'utilisation de ces pneumatiques faite lors de l'épandage à leur durée de vie pour quantifier l'émission dans les sols agricoles. Ainsi, un kilogramme de gomme usée va introduire dans le sol 16 g de zinc, 2,6 g de plomb et 0,6 g de cadmium.

### Les impacts environnementaux

La traduction des flux en impacts potentiels est réalisée à l'aide d'indicateurs. Plusieurs méthodes de calcul d'impact sont proposées aujourd'hui. À l'instar des études du programme « Porcherie verte » (Basset-Mens et Van der Werf, 2005), nous avons choisi la méthode CML 2001 (Guinée *et al.*, 2002), méthode conçue par l'Institut des sciences de l'environnement de Leiden aux Pays-Bas. La prise en considération des métaux lourds est un point crucial qui doit être considéré dans l'analyse environnementale en matière d'épandage. Les éléments trace métalliques provenant de l'épandage se fixent au sol et peuvent être exportés par la culture. La méthode CML 2001 a l'avantage de prendre en compte ces éléments trace métalliques au sein de l'indicateur « *Terrestrial ecotoxicity* » que nous intitulerons plus spécifiquement « toxicité des sols ». Nous avons en définitive retenu quatre indicateurs pertinents pour notre problématique :

– la contribution au « **réchauffement planétaire** » est mesurée par les kilogrammes équivalents  $\text{CO}_2$ . Pour ce calcul, 1 kg de  $\text{N}_2\text{O}$  est équivalent à 296 kg de  $\text{CO}_2$  ;

– la contribution à « **l'acidification des sols** » est déterminée en kilogrammes équivalents  $\text{SO}_2$ . Un kg de  $\text{NH}_3$  est équivalent à 1,6 kg équivalent  $\text{SO}_2$ , alors qu'un kg de  $\text{NO}_x$  est équivalent à 0,5 kg de  $\text{SO}_2$  ;

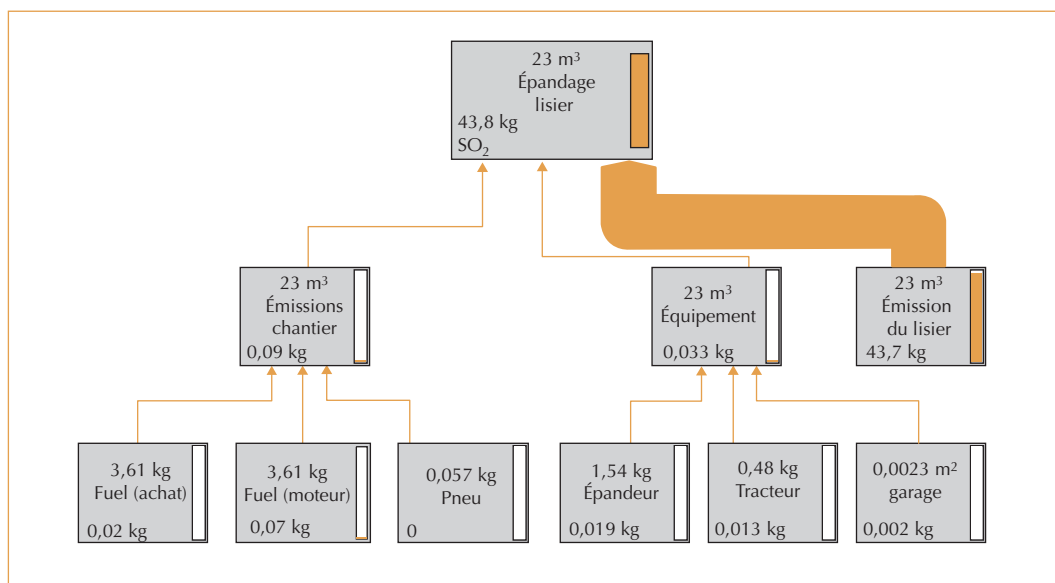
– la contribution à « **l'eutrophisation des eaux** » est calculée en kilogrammes équivalents  $\text{PO}_4$  avec un coefficient de 0,35 pour  $\text{NH}_3$  ; 0,1 pour  $\text{NO}_3$  et 0,13 pour  $\text{NO}_x$  ;

– la contribution à la « **toxicité des sols** » est évaluée en kilogramme de 1-4 DCB (1-4 dichlo-

2. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

3. FAT Taenikon ; station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles ; CH-8356 Ettenhausen.

► Figure 2 – Exemple de calcul de l'indicateur « acidification » pour l'épandage de 23 m<sup>3</sup> de lisier (les émissions en kg de SO<sub>2</sub> équivalents figurent en bas et à gauche de chaque case).



robenzène). Ce produit de synthèse est plus généralement émis dans l'air. Dans notre cas, il sert de point de comparaison pour l'écotoxicité des différents métaux lourds : la toxicité équivalente est de 170 kg de 1-4 DCB/kg pour le cadmium, 33 kg pour le plomb, 25 kg pour le zinc et 14 kg pour le cuivre.

Les autres impacts tels que la destruction de la couche d'ozone ou l'épuisement des ressources naturelles sont bien entendu importants, mais ils présentent un intérêt moindre dans le cadre spécifique de cette étude. Le calcul d'un indicateur est effectué par agrégation de la part relative des différents processus au procédé global. À titre d'exemple, la figure 2 illustre la détermination de l'indicateur « acidification des sols » pour l'épandage de 23 m<sup>3</sup> de lisier. La quantité totale équivalente du procédé d'épandage est de 43,8 kg de SO<sub>2</sub>.

#### La « normalisation »

Quand on veut examiner l'impact global d'un procédé, on peut utiliser alors une méthode dite de « normalisation » permettant de comparer les différents indicateurs obtenus à ceux connus pour une activité de référence. Diverses méthodes sont disponibles. Avec CML 2001, nous avons choisi la relation aux flux totaux émis en Europe occidentale (ex-Europe des 15). Les valeurs obtenues (indicateurs du système/indicateurs Europe

occidentale) sont naturellement très faibles, mais leur importance relative montre les domaines où l'impact est le plus significatif dans un pays européen et peut donc aider à déterminer des priorités de recherche.

### Application à trois scénarios d'épandage et résultats

Nous appliquerons maintenant cette démarche aux trois cas sélectionnés : l'épandage d'engrais minéraux, l'épandage de lisier et l'épandage de fumier. Afin d'effectuer l'inventaire des flux, nous prenons des hypothèses de chantiers types (Thirion et Chabot, 2003) : matériel utilisé et leur durée de vie, condition et rendement de chantier, éloignement de parcelle, consommation de fuel et quantité annuelle épandue.

#### Scénario 1 : épandage d'engrais minéraux

Les conditions de chantier sont présentées sur la figure 3, et les émissions sur les tableaux 1 et 2.

Dose apportée : 300 kg d'ammonitrate et 100 kg de Super 45 (100 unités de N et 45 unités de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). La surface épandue est 0,59 ha (170 unités de N par hectare), effectuée en deux passages. Le temps d'épandage est 9,5 min par ha.

L'engrais (400 kg) épandu au champ provoque des émissions dans l'air, l'eau et les sols agricoles.



◀ Figure 3 – Hypothèses définissant le scénario « épandage d'engrais minéraux ».

| Substance        | Quantité | Gaz effet serre (eq. CO <sub>2</sub> ) | Acidification (eq. SO <sub>2</sub> ) | Eutrophisation (eq. PO <sub>4</sub> ) | Toxicité du sol (eq. 1-4 DCB) |
|------------------|----------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| N <sub>2</sub> O | 1,96 kg  | 580 kg                                 |                                      |                                       |                               |
| NH <sub>3</sub>  | 3,5 kg   |  | 5,6 kg                               | 1,2 kg                                |                               |
| PO <sub>4</sub>  | 2 kg     |  |                                      | 2 kg                                  |                               |
| NO <sub>3</sub>  | 33 kg    |  |                                      | 3,3 kg                                |                               |
| Cadmium          | 4,8 g    |  |                                      |                                       | 0,81 kg                       |
| Zinc             | 38 g     |  |                                      |                                       | 0,95 kg                       |
| Cuivre           | 3,5 g    |  |                                      |                                       | 0,05 kg                       |

◀ Tableau 1 – Émissions des engrais minéraux au champ (flux directs).

| Catégorie d'émissions | Gaz effet serre (eq. CO <sub>2</sub> ) | Acidification (eq. SO <sub>2</sub> ) | Eutrophisation (eq. PO <sub>4</sub> ) | Toxicité du sol (eq. 1-4 DCB) |
|-----------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Fabrications          | 1,77 kg                                | (7,7 x 10 <sup>-3</sup> kg)          | (1,25 x 10 <sup>-3</sup> kg)          | (12,5 x 10 <sup>-3</sup> kg)  |
| Moteur, Fuel, Pneus   | 4,03 kg                                | (28 x 10 <sup>-3</sup> kg)           | (6,6 x 10 <sup>-3</sup> kg)           | (8 x 10 <sup>-3</sup> kg)     |
| Production engrais    | 966 kg                                 | 4,4 kg                               | 0,7 kg                                | 3,7 kg                        |
| Engrais au champ      | 580 kg                                 | 5,6 kg                               | 6,5 kg                                | 1,81 kg                       |
| <b>Total</b>          | <b>1 550 kg</b>                        | <b>10 kg</b>                         | <b>7,2 kg</b>                         | <b>5,5 kg</b>                 |
| <b>Normalisation</b>  | <b>3,2 .10<sup>-10</sup></b>           | <b>3,6 .10<sup>-10</sup></b>         | <b>5,8 .10<sup>-10</sup></b>          | <b>1,2 .10<sup>-10</sup></b>  |

◀ Tableau 2 – Émissions totales du système pour 400 kg d'engrais (scénario engrais minéraux).

### Scénario 2 : épandage de lisier

Les conditions de chantier sont présentées sur la figure 4, et les émissions sur les tableaux 3 et 4.

Dose apportée : 23 m<sup>3</sup> (100 unités N) à 40 m<sup>3</sup>/ha (170 unités N). Le temps d'épandage est 15 min pour 10 m<sup>3</sup>.

Le lisier épandu au champ provoque des émissions dans l'air, l'eau et les sols agricoles (pour un apport de 23 m<sup>3</sup> de lisier).

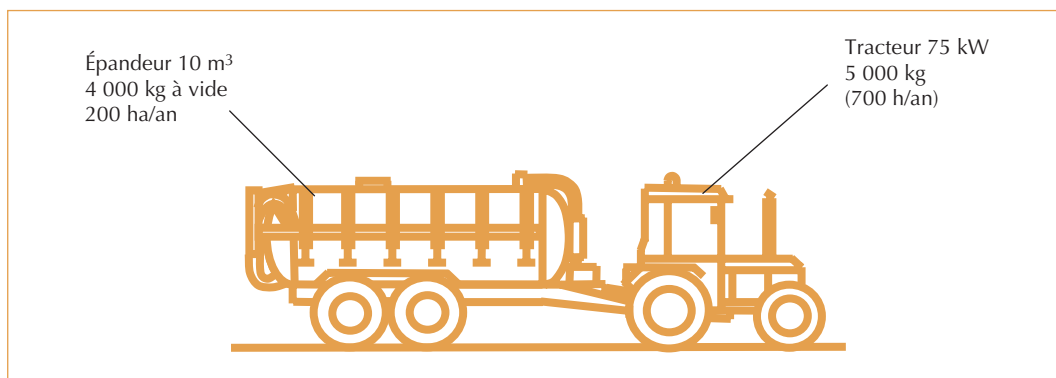
### Scénario 3 : épandeur de fumier

Les conditions de chantier sont présentées sur la figure 5, et les émissions sur les tableaux 5 et 6.

Dose apportée : 20 t (100 unités N) à 34 t/ha (170 unités N). Le temps d'épandage est de 22 min pour 10 t.

Le fumier épandu au champ provoque des émissions dans l'air, l'eau et les sols agricoles (pour 20 t de fumier).

► Figure 4 – Hypothèses définissant le scénario « épandage de lisier ».



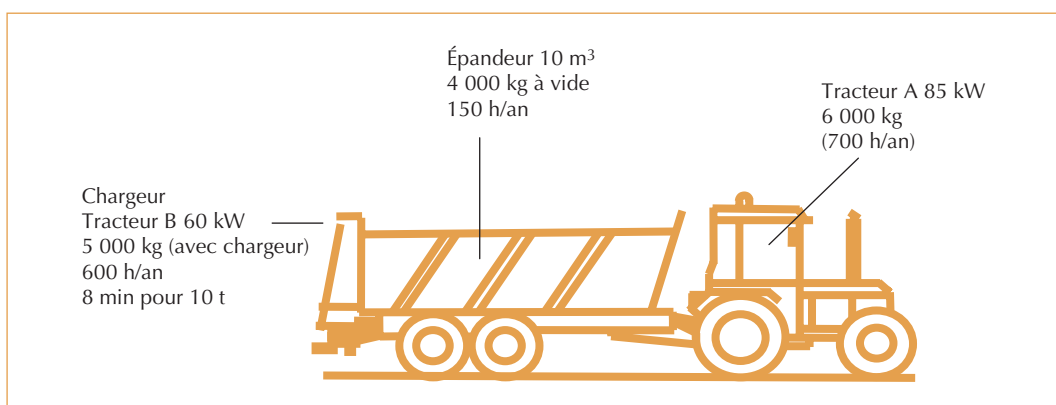
► Tableau 3 – Émissions du lisier au champ (flux directs).

| Substance        | Quantité | Gaz effet serre (eq. CO <sub>2</sub> ) | Acidification (eq. SO <sub>2</sub> ) | Eutrophisation (eq. PO <sub>4</sub> ) | Toxicité du sol (eq. 1-4 DCB) |
|------------------|----------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| N <sub>2</sub> O | 1,96 kg  | 580 kg                                 |                                      |                                       |                               |
| NH <sub>3</sub>  | 27,3 kg  |  | 43,7 kg                              | 9,55 kg                               |                               |
| PO <sub>4</sub>  | 4 kg     |  |                                      | 4 kg                                  |                               |
| NO <sub>3</sub>  | 23,2 kg  |  |                                      | 2,3 kg                                |                               |
| Cuivre           | 345 g    |  |                                      |                                       | 4,83 kg                       |
| Zinc             | 805 g    |  |                                      |                                       | 20,12 kg                      |

► Tableau 4 – Émissions totales du système pour un apport de 23 m<sup>3</sup> de lisier (scénario lisier).

| Catégorie d'émissions | Gaz effet serre (eq. CO <sub>2</sub> ) | Acidification (eq. SO <sub>2</sub> ) | Eutrophisation (eq. PO <sub>4</sub> ) | Toxicité du sol (eq. 1-4 DCB) |
|-----------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Fabrications          | 7,37 kg                                | (33 x 10 <sup>-3</sup> kg)           | (7,9 x 10 <sup>-3</sup> kg)           | (76 x 10 <sup>-3</sup> kg)    |
| Moteur, Fuel, Pneus   | 13,3 kg                                | (93 x 10 <sup>-3</sup> kg)           | (22 x 10 <sup>-3</sup> kg)            | (41 x 10 <sup>-3</sup> kg)    |
| Engrais au champ      | 580 kg                                 | 43,7 kg                              | 15,8 kg                               | 24,95 kg                      |
| <b>Total</b>          | <b>600 kg</b>                          | <b>43,8 kg</b>                       | <b>15,85 kg</b>                       | <b>25 kg</b>                  |
| <b>Normalisation</b>  | <b>1,25 x 10<sup>-10</sup></b>         | <b>16,0 x 10<sup>-10</sup></b>       | <b>11,3 x 10<sup>-10</sup></b>        | <b>5,3 x 10<sup>-10</sup></b> |

► Figure 5 – Hypothèses définissant le scénario « épandage de fumier ».





| Substance        | Quantité | Gaz effet serre (eq. CO <sub>2</sub> ) | Acidification (eq. SO <sub>2</sub> ) | Eutrophisation (eq. PO <sub>4</sub> ) | Toxicité du sol (eq. 1-4 DCB) |
|------------------|----------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| N <sub>2</sub> O | 1,96 kg  | 580 kg                                 |                                      |                                       |                               |
| NH <sub>3</sub>  | 5,5 kg   |  | 8,8 kg                               | 1,92 kg                               |                               |
| PO <sub>4</sub>  | 2 kg     |  |                                      | 2 kg                                  |                               |
| NO <sub>3</sub>  | 80 kg    |  |                                      | 8 kg                                  |                               |
| Cuivre           | 120 g    |  |                                      |                                       | 1,7 kg                        |
| Zinc             | 660 g    |  |                                      |                                       | 16,5 kg                       |

◀ Tableau 5 – Émissions du fumier au champ (flux directs).

| Catégorie d'émissions | Gaz effet serre (eq. CO <sub>2</sub> ) | Acidification (eq. SO <sub>2</sub> ) | Eutrophisation (eq. PO <sub>4</sub> ) | Toxicité du sol (eq. 1-4 DCB) |
|-----------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Fabrications          | 14,6 kg                                | (61 x 10 <sup>-3</sup> kg)           | (10 x 10 <sup>-3</sup> kg)            | (101 x 10 <sup>-3</sup> kg)   |
| Moteur, Fuel, Pneus   | 22,5 kg                                | (167 x 10 <sup>-3</sup> kg)          | (39 x 10 <sup>-3</sup> kg)            | (69,5 x 10 <sup>-3</sup> kg)  |
| Élevage               | 92,4 kg                                |                                      |                                       |                               |
| Engrais au champ      | 580 kg                                 | 8,8 kg                               | 11,9 kg                               | 18,2 kg                       |
| <b>Total</b>          | <b>709 kg</b>                          | <b>9,0 kg</b>                        | <b>11,9 kg</b>                        | <b>18,4 kg</b>                |
| <b>Normalisation</b>  | <b>1,47 x 10<sup>-10</sup></b>         | <b>3,28 x 10<sup>-10</sup></b>       | <b>9,5 x 10<sup>-10</sup></b>         | <b>3,9 x 10<sup>-10</sup></b> |

◀ Tableau 6 – Émissions totales du système pour 20 t de fumier (scénario fumier).

## Discussion et perspectives

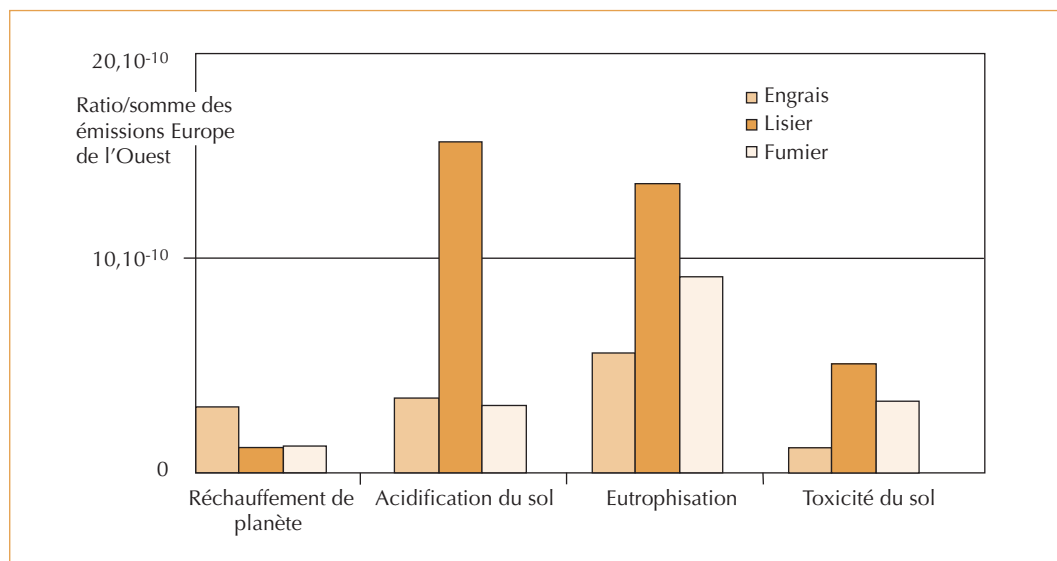
Pour permettre une comparaison des impacts générés selon les différents scénarios, nous pouvons utiliser les tableaux de chiffres correspondant à chaque cas. L'examen de ces tableaux montre que la part d'impact directement liée au machinisme est faible. Les émissions provenant du moteur Diesel sont significatives, mais d'un ordre de grandeur différent de celui de la fertilisation. Les facteurs principaux d'émissions sont au final la fabrication d'engrais minéraux et les émissions au champ. Pour comparer les différents scénarios, on peut se référer à un histogramme comme le montre la figure 6. Il s'agit d'indicateurs normalisés, c'est-à-dire que l'on a divisé la valeur brute de l'indicateur (en kilogrammes du produit indicateur de référence) par la quantité totale émise dans l'ensemble de l'Europe de l'Ouest (également en kilogrammes du même produit indicateur de référence).

On voit que les émissions les plus importantes proviennent du lisier, essentiellement à cause de la volatilisation de l'ammoniac. Cela vient du fait que nous avons choisi un épandage par rampe

à buse, système en expansion, plutôt qu'un procédé par enfouissement qui aurait amélioré les résultats. L'importance des teneurs en cuivre et en zinc observées dans le lisier (liée à l'addition d'oligo-éléments dans l'alimentation) handicape aussi le lisier au niveau de la toxicité des sols. L'eutrophisation pèse également fortement sur les divers résultats en raison du lessivage des nitrates.

Cependant, dans le cadre d'une agriculture durable, la valorisation des fumiers et lisiers devrait être incitée car ce sont des produits « renouvelables » alors que les engrais minéraux font appel à des ressources « non renouvelables » énergétiques et minérales. Mais cette préférence environnementale ne se justifie plus quand on observe les impacts de notre étude. Il faut donc améliorer ces résultats avec deux pistes principales pour l'écoconception : développer l'enfouissement et gagner en régularité et précision d'épandage. Le développement de solutions alternatives, telles que la fabrication de biogaz doit aussi être soumis à la même analyse pour s'assurer de la pertinence des choix environnementaux.

► Figure 6 – Indicateurs « normalisés » représentant les impacts environnementaux des trois scénarios.



Sur le plan méthodologique, des développements sont encore nécessaires pour aboutir à des analyses plus précises. Au stade actuel, cette étude constitue en réalité une base de raisonnement et une justification pour de nouvelles recherches. Certaines références sont aujourd'hui disponibles, sur l'effet de l'enfouissement par exemple, mais il manque des études pour analyser l'impact des hétérogénéités d'épandage sur l'environnement, ce qui fera l'objet de nos prochaines recherches. Il faut aussi remarquer que les quatre indicateurs choisis ne permettent pas un diagnostic environnemental complet de l'épandage. Les risques de tassement important du sol, tout comme l'émission de mauvaises odeurs sont en effet des inconvénients notables de l'épandage de lisier qui n'ont pas été répertoriés dans cette analyse. Pour

comblar ces lacunes, il faudra proposer et tester des indicateurs complémentaires spécifiques de notre problématique.

L'analyse de cycle de vie s'avère donc une méthode qui permet dès maintenant de différencier les principaux impacts de l'épandage et de hiérarchiser les problèmes. Si l'on veut analyser plus finement les interférences entre la qualité du matériel d'épandage et les impacts potentiels sur l'environnement, il faudra progresser dans la connaissance des liens entre performances technologiques et performances environnementales. Ceci remettra aussi en cause certaines normes d'évaluation qui n'ont pas été conçues dans une logique associable à notre démarche d'analyse environnementale. □

### Résumé

La qualité environnementale des épandages dépend à la fois de la conception de l'épandeur, du travail d'épandage et du devenir des éléments épandus. Nous nous proposons d'appréhender ces divers aspects au travers d'une analyse de cycle de vie de plusieurs systèmes d'épandage, en mettant plus particulièrement en évidence la phase opérationnelle d'épandage où la qualité d'application va influencer le volume global d'émissions polluantes. L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode multicritère conçue pour évaluer les impacts sur l'environnement d'un produit dans les diverses phases de son cycle de vie. Nous appliquons ici l'ACV à l'épandage de trois types de fertilisants : engrais minéraux, lisier et fumier. Quatre types d'impact ont été considérés : le réchauffement planétaire, l'acidification des sols, l'eutrophisation des eaux et la contribution à la toxicité des sols. Les émissions relatives à la fabrication des machines ou au fonctionnement du moteur du tracteur sont relativement faibles par rapport aux émissions générées par les engrais minéraux et organiques. Le bilan global permet de dresser les priorités d'amélioration des épandeurs, tant sur l'homogénéité d'épandage que sur le développement de méthodes d'enfouissement.

### Abstract

Quality of agricultural spreading processes depends both on the spreader performances and fertilizing elements behaviour. This dual aspect can be examined through a Life Cycle Analysis (LCA), especially considering the operational stage of the life cycle where the quality of application will influence the amount of emissions. LCA is an effective method of accounting for the environmental benefits and burdens of the production of goods and services. The objectives of this study were to evaluate the environmental impacts of three fertilizing scenarios: application of mineral fertilizers, liquid manure and solid manure. The environmental categories assessed were: climate change, acidification, eutrophication and terrestrial toxicity. Emissions related to the tractors operation are lower than emissions induced by mineral and organic fertilizers application. Ecodesign has an important issue in reducing environmental impacts by improving application quality and developing manure injection.

### Bibliographie

- BASSET-MENS, C., VAN DER WERF, H., 2005, Scenario-based environmental assessment of farming systems : the case of pig production in France, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 105, p. 127-144.
- CDCE (Commission des communautés européennes), 2004, Promouvoir les technologies au service du développement durable : plan d'action de l'Union européenne en faveur des écotechnologies, communication de la commission au Conseil et au Parlement européen, Bruxelles.
- DOURMAD, J.-Y., BAUDON, E., ESPAGNOL, S., LETERME, P., 2005, Environmental optimization of swine pork production, *International workshop on pork production*, 25-27 mai 2005, Paris, France.
- GUINEE, J.-B., 2002, *Handbook on life cycle assessment : operational guide to the ISO standards*, Dordrecht, Boston : Kluwer Academic Publishers, 704 p.
- MORVAN, T., GENERMONT, S., THIRION, F., 2004, Maîtrise des émissions ammoniacales au champ : les techniques qui marchent, *Perspectives Agricoles*, n° 304, p. 24-27.
- NEMECEK, T., HEIL, A., HUGUENIN, O., MEIER, S., ERZINGER, S., BLASER, S., DUX, D., ZIMMERMANN, A., 2004, *Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems*, Final report Ecoinvent 2000 n° 15, 289 p. Ce travail réalisé pour l'alimentation des bases de données Ecoinvent, fournit notamment des données sur la construction, l'utilisation et la fin de vie de tracteurs et machines agricoles.
- ROUX, P., PATINGRE, J.-F., GIROUX, F., NAUD, O., 2005, Écotechnologies et écoconception : concepts et mise en œuvre, *Ingénieries-EAT*, n° 42, p. 55-70.
- SCHVARTZ, C., MULLER, J.-C., DECROUX, J., 2005, *Guide de la fertilisation raisonnée*, Éditions France Agricole, 414 p. Cet ouvrage, placé sous l'égide du Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée (COMIFER), développe les principes de la fertilisation. Il propose des données sur les émissions ainsi qu'une bibliographie correspondante.
- THIRION, F., CHABOT, F., 2003, *Épandage des boues résiduelles et effluents organiques : Matériels et pratiques*, Cemagref Éditions, 191 p.