

# Gestion des filières de traitement et de valorisation/élimination des boues par les collectivités

## L'analyse du cycle de vie comme outil d'innovation : état des lieux et perspectives

■ M. PRADEL<sup>1</sup>, J. SERRE<sup>2</sup>, S. MEHIER<sup>2</sup>, L. BENARD<sup>3</sup>, C. TESSIER<sup>3</sup>, S. BAPST<sup>4</sup>, S. HOUOT<sup>5</sup>

**Mots-clés :** ACV, boues issues du traitement des eaux usées, collectivités, outil d'aide à la décision

**Keywords:** LCA, sewage sludge, municipalities, decision support system

### Introduction

Dans le cadre des réflexions menées au sein du groupe « Boues » de la commission assainissement de l'Astee, les membres du groupe ont démarré une démarche de réflexion relative à l'analyse du cycle de vie (ACV) appliquée aux filières de traitement et de valorisation/élimination des boues issues du traitement des eaux usées. Cette démarche consiste, dans un premier temps, à réaliser un état des lieux des usages de l'ACV pour évaluer les filières de traitement et de valorisation/élimination des boues et à identifier les principales questions auxquelles il est possible de répondre par l'utilisation de cette méthode. Un premier état de l'art des ACV appliquées au traitement des boues d'épuration et la réalisation d'un bilan des impacts environnementaux en fonction des scénarios d'élimination de ces dernières (épandage, incinération...) avaient été réalisés en 2007 [PRADEL, 2008]. Selon cet état de l'art, la comparaison d'études environnementales fondées sur la méthodologie ACV est souvent peu aisée du fait des divergences entre les principales

études réalisées (différence de système étudié, d'unités fonctionnelles, manque de transparence sur les sources des données et les méthodes utilisées). De plus, alors que la plupart des ACV portent sur la comparaison des possibles voies d'élimination des boues en tant que déchet, très peu d'études considèrent la boue comme une ressource potentielle.

Sur une station d'épuration (STEP), le traitement et la valorisation/élimination des boues peuvent représenter plus de 40 % des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) [SHAW *et al.*, 2010]. C'est pourquoi la connaissance des performances environnementales des différentes voies de traitement et de valorisation/élimination des boues est une attente importante des décideurs (gérants de STEP, collectivités territoriales...) pour les accompagner dans le choix de la filière (écoconception) ou les aider dans l'amélioration des filières existantes. Pour les voies de valorisation nouvelles pour lesquelles la boue devient une ressource pour de nouveaux usages, l'ACV peut être utilisée pour confirmer ou non l'intérêt environnemental de tels systèmes innovants.

Cet article a pour objectif de présenter les différents usages de l'ACV pour l'évaluation environnementale de filières « boue ». Deux approches ont été identifiées selon que l'on se place en tant que traiteur d'eau, à savoir avec une optique d'élimination du déchet issu de la filière eau, ou en tant que producteur dans une perspective de valorisation d'une nouvelle ressource (matière, énergétique...).

<sup>1</sup> Irstea, UR TSCF – Domaine des Palanquins – 03150 Montoldre.  
Courriel : marilys.pradel@irstea.fr

<sup>2</sup> Veolia Environnement Recherche et Innovation – Chemin de la digue – 78600 Maisons-Laffitte.

<sup>3</sup> Siaap – 2, rue Jules-César – 75012 Paris.

<sup>4</sup> Syndicat mixte recyclage agricole du Haut-Rhin – 2, allée de Herrlisheim – 68000 Colmar.

<sup>5</sup> Inra, UMR Environnement et grandes cultures – Route de la Ferme – 78850 Thiverval-Grignon.

Après une présentation rapide de ce qu'est l'analyse du cycle de vie, l'article se découpera en deux parties présentant chacune de ces approches avant de présenter les principales questions méthodologiques que l'on peut rencontrer dans la réalisation d'ACV appliquées aux filières « boues ».

## 1. Qu'est ce que l'analyse du cycle de vie ?

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale multicritère dont le cadre est normalisé [AFNOR ISO 14040 et AFNOR ISO 14044]. Elle permet d'évaluer les impacts sur l'environnement d'un produit, d'un service ou d'un système en incluant l'ensemble des activités liées à ce système depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement des déchets. La quantification des impacts se fait sur l'ensemble du cycle de vie du système en considérant chaque étape « du berceau à la tombe ».

L'objectif de l'ACV est avant tout comparatif en permettant de comparer, du point de vue environnemental, des systèmes rendant le même service. Elle peut également permettre d'identifier les principaux facteurs responsables des impacts environnementaux au sein d'un système.

Selon la norme, la réalisation d'une analyse du cycle de vie suit quatre étapes (figure 1) :

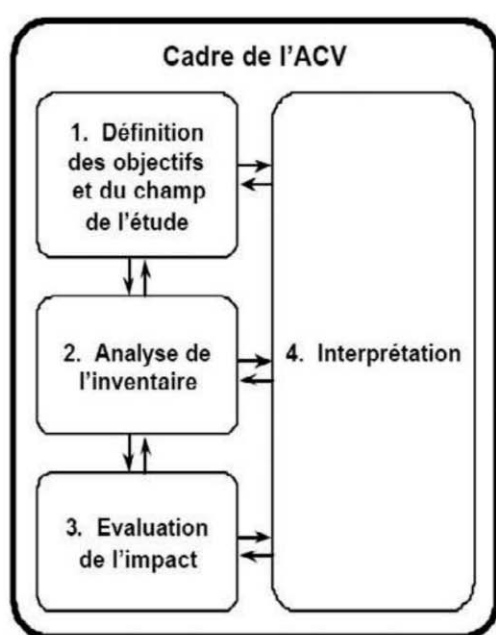


Figure 1. Les quatre étapes de l'analyse du cycle de vie

1) la définition des objectifs et du champ de l'étude : définition du périmètre du système étudié, de sa fonction et de son unité fonctionnelle ;

2) l'analyse de l'inventaire : collecte des données des flux entrants (énergie, matières nécessaires au fonctionnement du système) et des flux sortants (émissions et déchets générés par le système) et réalisation du bilan matière/énergie ;

3) l'évaluation des impacts environnementaux (conversion des flux entrants et sortants du système en indicateurs d'impacts potentiels) ;

4) l'interprétation des résultats.

### 1.1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude

Cette première étape est fondamentale pour l'étude ACV, car elle conditionne à la fois l'ensemble des calculs mais également les hypothèses sur lesquelles s'appuieront les résultats de l'étude. La définition des objectifs a ainsi pour but de définir la problématique, les applications envisagées et les destinataires de l'étude. Le champ de l'étude, quant à lui, permettra de définir les frontières du système, la fonction attribuée à ce dernier et la modélisation de celui-ci. Cette étape comprend également la définition de l'unité fonctionnelle, quantification de la fonction attribuée au système et à laquelle est rapporté l'ensemble des données d'inventaire. Les catégories et types de données à collecter et les grandes hypothèses sont également des points clés de cette étape de l'ACV et constituent le point de départ de la deuxième étape de l'ACV.

### 1.2. Analyse de l'inventaire

L'analyse de l'inventaire est la phase la plus longue d'une étude ACV. En effet, chaque étape du cycle de vie consomme de l'énergie et des ressources non renouvelables et génère des émissions sur l'air, l'eau et le sol à un niveau local, régional ou global. Cette étape consiste en la réalisation d'une collecte de données permettant de réaliser le bilan des flux entrants (matière, énergie...) et sortants (émissions, déchets...) du système étudié. Un exemple d'inventaire de cycle de vie est donné dans la figure 2.

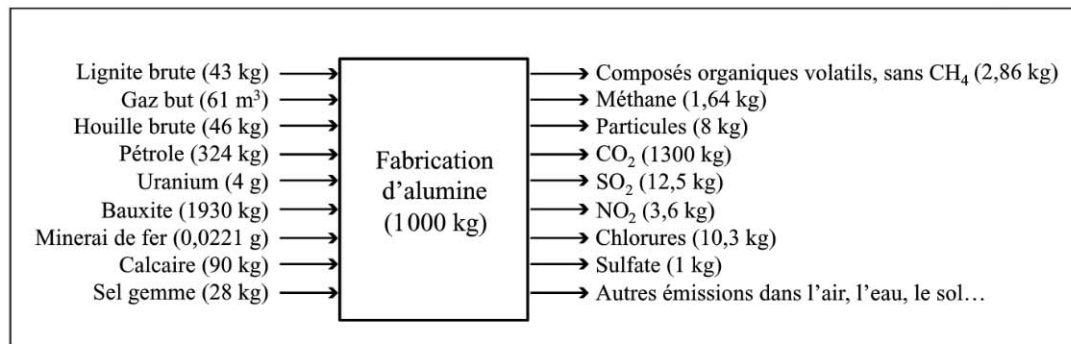


Figure 2. Inventaire des extractions et émissions pour la fabrication d'alumine [Jolliet et al., 2005]

### 1.3. Évaluation des impacts environnementaux

Cette troisième étape consiste à traduire les flux entrants et sortants du système en indicateurs d'impacts potentiels. On parle alors de « caractérisation des impacts ». Les flux référencés lors de l'analyse de l'inventaire sont convertis en quantité « équivalente » de substance de référence par un *facteur de caractérisation* pour chaque impact étudié selon la formule suivante :

$$I_p = \sum_i^n m_i \cdot EF_i$$

où  $I_p$  est la catégorie d'impact potentiel,  $m_i$  la quantité de substance émise ou prélevée et  $EF_i$  le facteur de caractérisation de l'impact.

À titre d'exemple, le calcul de l'impact « changement climatique » (ou *global warming potentiel*, GWP) est basé sur la mesure du forçage radiatif pour chaque gaz et mesuré en équivalent  $\text{CO}_2$  (substance de référence) pour un horizon de temps défini (100 ans dans la majorité des cas). Un procédé qui émettrait 1 t de  $\text{CO}_2$  et 0,15 t de  $\text{N}_2\text{O}$  aurait un impact sur le « changement climatique » équivalent à 45,7 t d'équivalent  $\text{CO}_2$ , le  $\text{N}_2\text{O}$  ayant un pouvoir de réchauffement global 298 fois supérieur au  $\text{CO}_2$  à horizon 100 ans [FOSTER et al., 2007].

L'ACV propose une approche multicritère permettant d'étudier différentes catégories d'impacts environnementaux, selon deux types de méthodes : les méthodes orientées « problème » (*midpoint*) permettant d'évaluer des impacts tels que l'eutrophisation, l'acidification, la toxicité humaine, l'écotoxicité terrestre et des milieux aquatiques et marins, l'épuisement des ressources (eau, minéraux, fossiles) ou

encore le changement climatique ; et les méthodes orientées « dommage » (*endpoint*) sur trois aires de protection : les ressources, la santé humaine ou les écosystèmes.

Il existe plusieurs méthodes de caractérisation des impacts midpoint et endpoint en ACV telles que CML-IA [GUINÉE et al., 2001] pour les premières et Impact2002+ [JOLLIET et al., 2003] pour les secondes. Les derniers développements de méthodes de caractérisation telles que Recipe ([www.lcia-recipe.net](http://www.lcia-recipe.net)) et Impact World ([www.impactworldplus.org](http://www.impactworldplus.org)) ont la particularité de regrouper ces deux types d'impact midpoint et endpoint.

Cette étape de caractérisation des impacts peut être suivie par une étape de normalisation. La normalisation est une étape facultative ; elle est soumise à discussions de la part des praticiens. Elle permet de comparer les différents résultats de caractérisation entre eux grâce à une valeur de référence (à l'échelle d'un pays, d'une personne ou d'un système à une période donnée) selon la formule suivante :

$$Norm(I_p) = \frac{\sum_i^n m_i \cdot EF_i}{\bar{N}}$$

Où  $\bar{N}$  est l'impact moyen sur une zone considérée (monde, pays, région, etc.) par an et/ou par an et par habitant.

À titre d'exemple, pour la méthode CML, le facteur  $\bar{N}$  pour l'impact « changement climatique » correspond à 4,73E+12 kg équivalent  $\text{CO}_2$  par an si on normalise par rapport aux émissions annuelles d'équivalent  $\text{CO}_2$  de la population de l'Europe de l'Ouest en 1995.

## 1.4. Interprétation des résultats

Cette dernière phase de l'ACV permet d'analyser les résultats obtenus au regard des hypothèses émises, des méthodes utilisées lors de l'analyse de l'inventaire et de l'évaluation des impacts. Elle permet de présenter les points chauds des filières, les postes ayant le plus d'impact. Enfin, dans cette partie sont émises les conclusions de l'étude et des recommandations pour l'amélioration des performances environnementales des filières évaluées.

## 2. Mise en œuvre de l'ACV pour les filières de traitement et de valorisation/élimination des boues

Les premières réflexions menées par le groupe « Boues » de la commission assainissement de l'Astée ont conduit à identifier quatre types d'études pouvant être réalisées avec la méthode ACV. Ces études ACV ont différentes finalités et objectifs selon qu'on les réalise en tant que traiteur d'eau ou en tant que producteur de ressources à valeur ajoutée.

Dans le cas d'un traiteur d'eau, la boue produite est considérée comme un déchet issu de la filière eau et doit être traitée puis éliminée. Aujourd'hui, la majorité des boues produites en France est valorisée via différentes filières telles que l'épandage (apport d'éléments fertilisants) ou l'incinération (production de chaleur et/ou d'électricité). Dans ce cas de figure, trois périmètres d'études sont identifiés et présentés dans le § 2.1.

Dans le cas d'un producteur de ressources à valeur ajoutée, la boue en sortie de STEP est considérée comme une ressource potentielle. Elle peut, par exemple, être utilisée comme un fertilisant et/ou un amendement pour les sols agricoles en remplacement de tout ou partie des engrais minéraux de synthèse, comme une ressource énergétique en remplacement des ressources fossiles, mais également comme une matière première destinée à d'autres processus industriels (céramiques, cimenterie...). Dans ce cas de figure, trois périmètres d'études ont également été identifiés et sont présentés dans le § 2.2.

## 2.1. État des lieux des ACV appliquées en tant que traiteur d'eau

Parmi les trois périmètres d'études possibles identifiés lorsque l'on souhaite réaliser une ACV en tant que traiteur d'eau, on distingue :

- la possibilité d'évaluer et de comparer les impacts environnementaux de procédés de traitement des boues seuls ;
- la possibilité d'évaluer et de comparer les impacts environnementaux des voies de valorisation ou d'élimination des boues ;
- la possibilité d'évaluer et de comparer des filières « boues » complètes depuis l'épaississement jusqu'à la voie de valorisation/élimination finale.

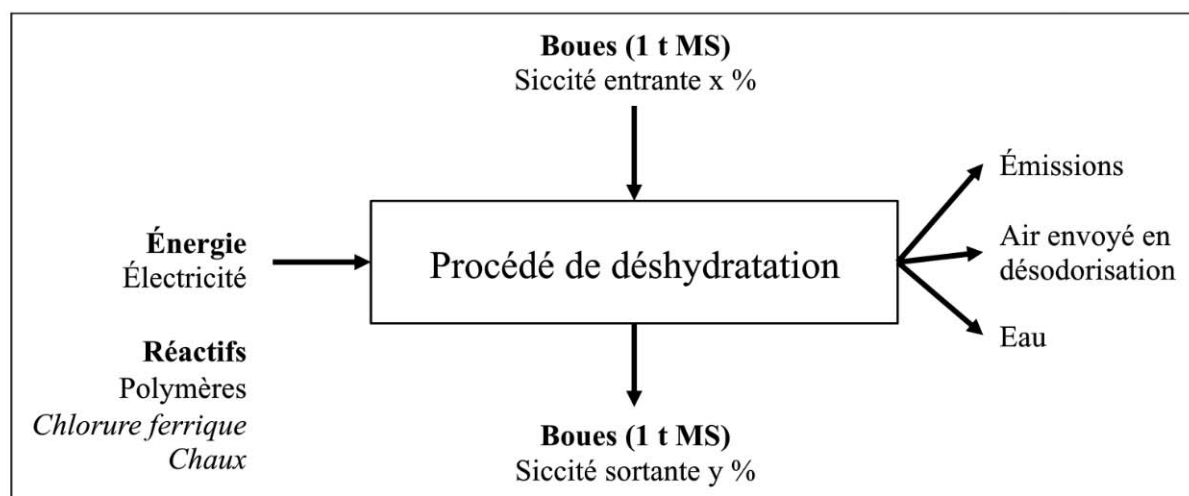
Les objectifs, frontières et unités fonctionnelles retenus sont détaillés dans les paragraphes suivants pour chaque type d'études ACV identifiées.

### 2.1.1. Les ACV appliquées aux procédés de traitement des boues

L'objectif de ce type d'études ACV est de pouvoir évaluer la performance des procédés de traitement des boues nécessaires quelle que soit la filière de gestion envisagée, et de pouvoir les comparer entre eux. Les procédés de traitement pouvant être comparés sont différents procédés d'épaississement, de digestion, de déshydratation, de compostage ou de séchage.

La réalisation de ce type d'études peut être faite pour des procédés de traitement déjà en place. Cela permettra au gestionnaire de la station d'épuration d'avoir une vision opérationnelle des impacts environnementaux de ces procédés et d'agir en conséquence sur les paramètres opératoires des procédés de traitements (diminution des consommables, optimisation des consommations énergétiques...). Toutefois, la marge de manœuvre pour améliorer les procédés de traitement reste faible puisqu'il n'y a souvent pas de possibilité d'implanter un procédé de traitement alternatif au procédé existant dans la pratique.

Dans une vision prospective d'implantation de nouvelles stations, ce type d'études peut permettre d'orienter le choix des procédés de traitement à implanter en permettant d'identifier ceux qui ont le plus faible impact environnemental tout en permet-



Objectif : réduire le volume des boues, c'est-à-dire atteindre un taux de siccité à définir en sortie pour une tonne de matière sèche (MS) de boues à un taux de siccité fixé en entrée. L'unité fonctionnelle de ce système est donc la quantité (tonnage) de boue en sortie de procédé de déshydratation, caractérisée par un taux y de siccité pour un taux x de siccité en entrée.

Source : Siaap.

Figure 3. ACV appliquée à la déshydratation des boues d'épuration

|                                          |                | Centrifugeuse |              | Filtre presse |              | Filtre à bande |              |
|------------------------------------------|----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|----------------|--------------|
|                                          |                | Boue standard | Boue digérée | Boue standard | Boue digérée | Boue standard  | Boue digérée |
| Flux entrants                            |                |               |              |               |              |                |              |
| Électricité, tension moyenne, production | kWh            | 65,80         | 50,33        | 37,00         |              | 34,36          | 35,50        |
| Polymères                                | kg             | 5,78          | 6,65         | 5,00          | 6,00         | 5,50           | 5,00         |
| Chlorure de fer                          | kg             | –             |              | 57,50         | 60,00        | –              |              |
| Chaux hydratée                           | kg             | –             |              | 236,88        | 220,00       | –              |              |
| Infrastructures de déshydratation        | p <sup>1</sup> | 1,49E-04      |              | 1,49E-04      |              | 1,49E-04       |              |
| Conditionnement chimique                 | p              | 1,49E-04      |              | 1,49E-04      |              | 1,49E-04       |              |
| Flux sortants (émissions vers l'air)     |                |               |              |               |              |                |              |
| CH <sub>4</sub> d'origine biogénique     | kg             | 12,33         |              | –             |              | –              |              |
| N <sub>2</sub> O                         | kg             | 0,77          |              | –             |              | –              |              |
| Flux sortants autres                     |                |               |              |               |              |                |              |
| Rejets aqueux                            | m <sup>3</sup> | 20            |              | 5             |              | 14             |              |

<sup>1</sup>p (pour pièce) est le symbole pour un item ou une unité (dans notre cas, à la part d'infrastructure allouée au tonnage de boue) utilisée lors de la modélisation des procédés avec le logiciel ACV Simapro.

Tableau I. Inventaire du cycle de vie de différentes techniques de déshydratation des boues de la filière française (d'après PRADEL et coll. [2014]). Chaque valeur est donnée pour une tonne de matière sèche de boue

tant d'atteindre les objectifs opérationnels fixés par l'exploitant.

On cherche au final par ce type d'étude à améliorer seulement un procédé sur la filière. En théorie, si on ne compare que des procédés au sein d'une filière, la boue en entrée et en sortie doit être identique (même masse sèche de boue sous différentes formes et de siccités différentes), mais, en pratique, l'application de ce type d'étude est rare et est générale-

ment intégrée dans la partie d'inventaire du cycle de vie d'études plus complète (filiale « boue »).

Un exemple d'application à la déshydratation des boues est donné dans la figure 3 et l'inventaire associé dans le tableau I.

Le tableau I [PRADEL et al., 2014]) permet d'illustrer pour ce procédé comment est constitué un inventaire de cycle de vie (ICV), mais il est volontairement limité aux émissions de gaz à effet de

serre répertoriées dans la littérature. LICV des procédés de déshydratation comprend d'autres flux, tels que les flux de contaminants inorganiques (éléments traces minéraux...), de macropolluants (azote, phosphore...) et de micropolluants – hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB), alkylbenzènes sulfonates à chaîne linéaire (LAS)... – qui ne sont pas représentés dans ce tableau, tout comme les émissions de carbone biogénique.

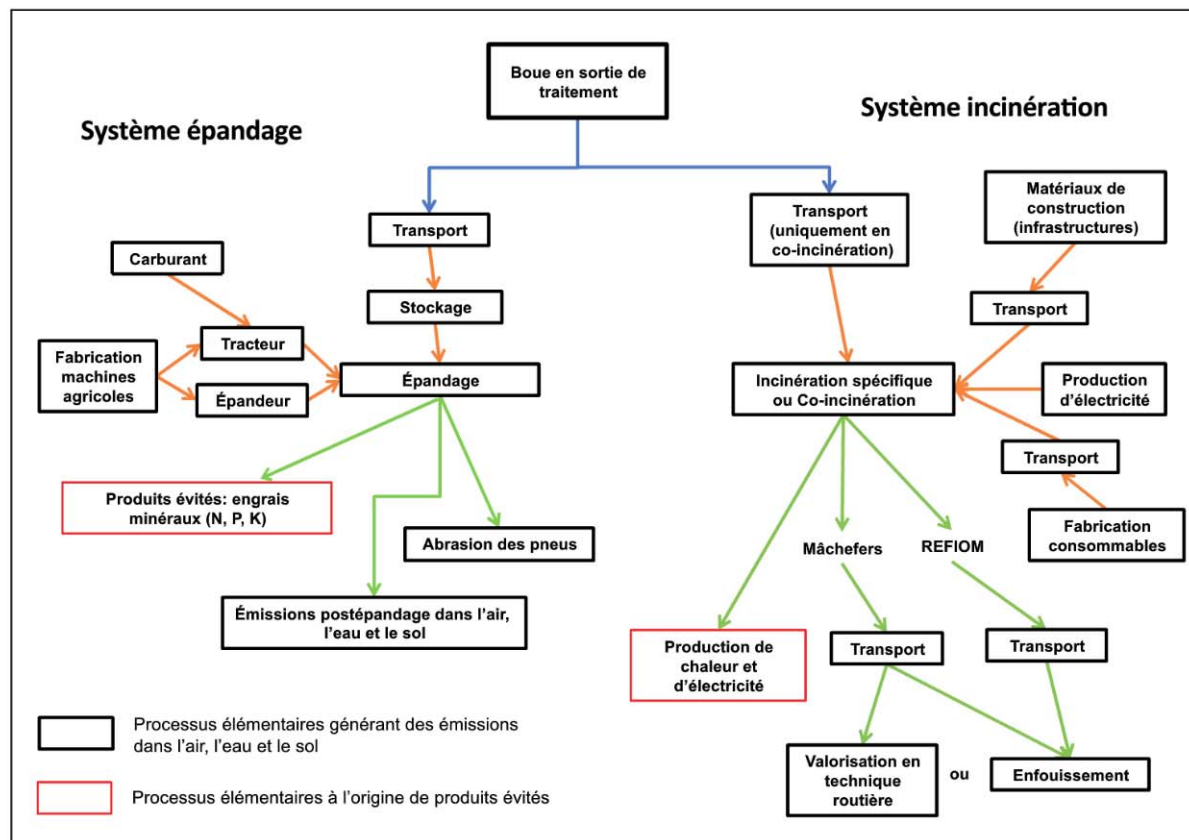
### 2.1.2. Les ACV appliquées aux procédés de valorisation/élimination des boues

L'objectif de ce type d'ACV est de comparer les filières de posttraitement des boues (valorisation/élimination) entre elles. La comparaison des procédés de valorisation/élimination n'est possible que pour une même boue en entrée de système (même siccité, même traitement préalable, même lieu de production). Si des traitements spécifiques complémentaires ont lieu en fonction de la filière de ges-

tion choisie (ex. : séchage des boues avant épandage), ils seront introduits dans le périmètre de l'étude. Les filières pouvant être comparées sont les filières d'épandage, d'incinération (traitement thermique), de co-incinération en cimenterie, d'enfouissement en installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND) principalement.

Le périmètre du système dont un exemple est représenté en figure 4 comprend l'ensemble des procédés nécessaires au bon fonctionnement de la filière : stockage et transport de la boue, transport des consommables, émissions générées par les procédés et gestion (posttraitement) des sous-produits générés par ces procédés. Dans ce cas précis, la fonction principale du système est de valoriser/éliminer la boue en sortie de traitement et l'unité fonctionnelle choisie est généralement le tonnage de boue en sortie de traitement ramené en matière sèche.

Toutefois, il existe des fonctions secondaires associées à ce système. Dans le cas de l'épandage, la boue va



Refiom : résidus d'épuration des fumées d'incinération des ordures ménagères.

Source : Irstea

Figure 4. ACV appliquée à l'élimination des boues par épandage et incinération/co-incinération

permettre d'apporter des éléments nutritifs et de fertiliser les cultures tandis que l'incinération des boues va permettre de produire de la chaleur et de l'électricité. Ces cofonctions sont traitées en ACV par extension des frontières du système, plus communément connues sous le terme de substitution. Dans ce cas-ci, on substituera par soustraction au système la cofonction associée, c'est-à-dire la substitution des engrais minéraux par les boues dans le cas de l'épandage et la production de chaleur et d'électricité dans le cas de l'incinération. Cette notion de substitution amène la notion d'impacts évités et des questionnements méthodologiques traités en dernière partie de cet article.

À l'instar des études ACV réalisées sur les procédés de traitement, on cherche par ce type d'étude à identifier quelle est la voie d'élimination ayant le moins d'impact d'un point de vue environnemental pour un type de boue identique.

### 2.1.3. Les ACV des filières « boues » intégrant à la fois les procédés de traitement et de valorisation/élimination des boues

Il est également possible de réaliser des études de filières boues dans leur ensemble, du « berceau à la tombe », c'est-à-dire de l'extraction des boues de la filière eau à l'intérieur de la STEP jusqu'à l'élimination/valorisation des boues et de leurs éventuels sous-produits. Dans ce cas, toutes les configurations sont envisageables dans l'élaboration des scénarios : des procédés de traitement différents ou non, des niveaux de siccités variables avec une ou plusieurs voies d'évacuation.

La fonction d'un tel système est généralement identique à celle du système précédent, à savoir valoriser/éliminer la boue en sortie de traitement. L'unité fonctionnelle choisie est généralement la quantité de boue valorisée (en tonnage brut ou ramené à la tonne de matière sèche). Un exemple de filières intégrées comparables est donné en figure 5.

De telles études peuvent être réalisées en amont d'un projet, dans une démarche d'écoconception, pour établir la meilleure filière à mettre en place pour un site donné. La prise en compte des contraintes et opportunités spécifiques locales (proximité d'habitations, emprise foncière, surface agricole disponible...) influera sur le choix des scénarios retenus pour l'analyse, mais elle pourra également se traduire dans le résultat des calculs pour les différents indicateurs d'impact environnemental (ex. : consommateur ou producteur d'énergie thermique à proximité).

Ce type d'ACV peut également être réalisé une fois les installations en fonctionnement afin d'évaluer et de mettre en perspective les performances environnementales globales d'un site, sans se limiter à son périmètre physique strict. L'utilisation de l'ACV permet alors une compatibilité environnementale, qui peut servir pour évaluer les évolutions interannuelles, l'impact de la mise en place d'un nouveau procédé de traitement ou encore identifier des marges d'amélioration dans une démarche de reconception.

Comme le montre l'exemple de la figure 6, cette approche permet de faire apparaître pour l'indicateur « consommation d'énergie primaire » les impacts

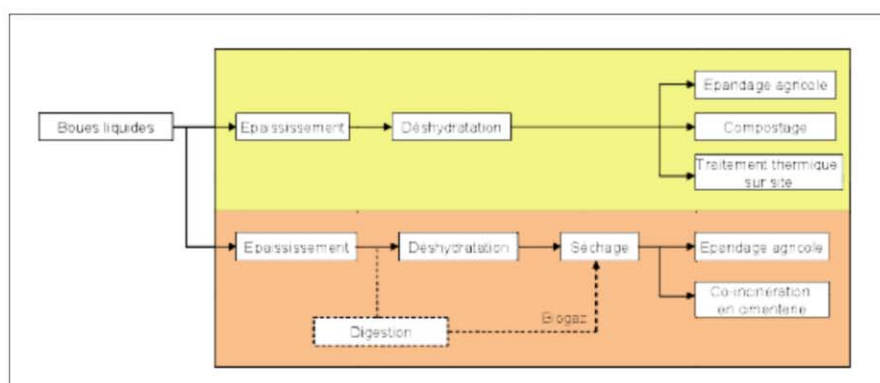


Figure 5. Exemple de filières intégrées comparables (filières boues déshydratées ou boues séchées avec ou sans digestion)

3<sup>e</sup>

# AQUATERRITORIAL

TERRITOIRES ET USAGES DE L'EAU



⇒ 20 Conférences

⇒ 100 Intervenants

⇒ 1 Salon professionnel

MULHOUSE PARC EXPO

23&24 SEPTEMBRE 2015

CONFÉRENCES ET SALON PROFESSIONNEL

Un événement



Co-organisé avec

Sivom



Avec le soutien de



En partenariat avec



Partenariat presse



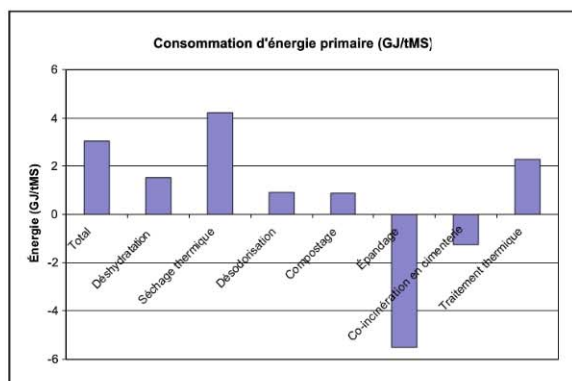


Figure 6. Consommation d'énergie primaire par t de matière sèche (tMS) traitée sur une station d'épuration fonctionnant en multifilière sur boues déshydratées et séchées

évités potentiels attribuables aux boues pour chaque procédé de traitement et voies de valorisation. Il s'agit des substitutions en combustibles fossiles pour le traitement thermique et la co-incinération en cimenterie et la substitution en engrais minéraux pour l'épandage. Dans cet exemple, le compostage est considéré comme une étape de traitement avant épandage. Le total correspond à la balance entre impacts évités et impacts générés. Toutefois, la pertinence de la représentation graphique de la balance entre impacts est discutable et des recommandations à ce sujet sont proposées en dernière partie d'article.

À l'intérieur même de la STEP, l'optimisation énergétique entre l'énergie produite à partir de la digestion ou de l'incinération et celle consommée pour le traitement (séchage notamment) est un point particulièrement sensible.

Ce type d'ACV peut ainsi être mis en œuvre à la fois par les industriels et par les collectivités, dans un objectif d'amélioration des performances d'une installation en place, dans une démarche d'écoconception en amont de la construction d'un nouveau site.

## 2.2. Perspectives de l'application de l'ACV en tant que producteur de ressources à valeur ajoutée

Les traiteurs d'eau se positionnent de plus en plus dans une optique de valorisation de la ressource produite et cherchent notamment de nouveaux débouchés à la boue en tant que ressource afin de produire de la valeur ajoutée.

Plusieurs voies de valorisation de ces ressources sont possibles :

- la production d'un fertilisant ou d'un amendement agricole ;
- l'utilisation de la boue comme ressource énergétique sur site, ce qui permet de réduire ainsi la consommation énergétique de la station ;
- l'utilisation de la boue comme matière première dans des produits biosourcés ou en remplacement de matière inerte en cimenterie.

Les objectifs, frontières et unités fonctionnelles retenus sont détaillés dans les paragraphes suivants pour chaque type d'études ACV identifiées.

### 2.2.1. La boue, une voie de valorisation principale comme fertilisant pour les sols agricoles

L'objectif de ce type d'ACV est de pouvoir comparer les impacts de la fertilisation des cultures impliquant :

- différents types de boues avec la possibilité de scénarios technologiques distincts (choix du matériel d'épandage...) ;
- des boues avec d'autres produits résiduels organiques (PRO) (ex. : composts, fumiers, lisiers) et/ou des engrais minéraux de synthèse.

La comparaison de scénarios entre eux nécessite de disposer d'une fonction commune, à laquelle tous les flux de matières et d'énergie, toutes les émissions de polluants sont rapportés.

À l'instar de ce qui est rapporté dans les paragraphes précédents, deux fonctions peuvent être associées à l'apport de PRO : fertilisant ou amendement. Néanmoins, l'augmentation du stock d'éléments minéraux N, P et K est la principale fonction évoquée généralement par ce système et est exprimée en équivalent N, P et K (dont la quantité est calculée pour répondre aux besoins des cultures).

La quantité d'éléments N, P et K apportée par les PRO peut être estimée selon plusieurs approches :

- apports maximisés pour maintenir les rendements dans le respect des réglementations en vigueur (arrêté de 1998 relatif à l'épandage de boues, norme NFU 44-095, directive nitrates). Cette approche a été déployée dans le cadre du projet Proextern (projet Ademe, 2011-2015). Elle permet de mettre en avant les intérêts agronomiques des PRO et

correspond davantage aux pratiques réelles observées. Dans ce cas, il est possible que certains éléments soient apportés en quantités supérieures par rapport aux besoins des cultures (ex. : cas du P) ;

– apports raisonnés en fonction de l'élément limitant calculé sur les besoins des cultures (N, P, ou K). Cette approche a été déployée dans le cadre du projet Ecodefi (projet ANR Precodd 2007-2011). Elle permet de raisonner la fertilisation en calculant la dose de boue à apporter pour l'élément limitant (généralement le P) et assurer un complément en N et K avec des engrais minéraux sans effectuer de surdosages [PRADEL *et al.*, 2011].

Lorsque la fertilisation est en partie réalisée avec une boue, ou plus généralement un PRO, un complément en engrais minéral peut être nécessaire pour combler le besoin des cultures.

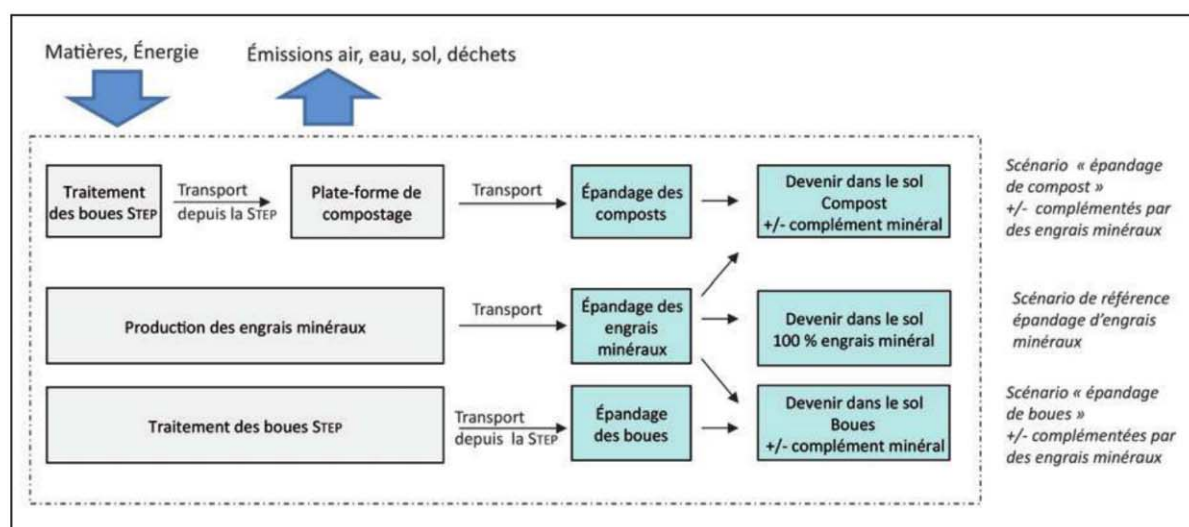
Les frontières du système incluent tous les procédés nécessaires à la réalisation de la fonction retenue. Ainsi, comme le montre l'exemple dans la figure 7 (extrait du projet Proextern, 2014), dans le scénario « engrais minéraux », il faut prendre en compte leur fabrication et le transport au champ, et dans les scénarios « épandage de compost » et « épandage de boues », les procédés de traitement impliqués dans la préparation de ces PRO avant épandage (plate-forme de compostage, procédés de traitement des boues...).

Quand seuls différents types de PRO (boues et/ou composts) sont comparés entre eux, la substitution avec des engrais minéraux est possible avec la prise en compte dans la substitution (impacts évités potentiels) de la fabrication des engrais minéraux substitués, de leur épandage et des émissions générées à la suite de leur application. Néanmoins, les résultats doivent être maniés avec précaution et être communiqués sans pour autant constituer un axe majeur de l'étude. En effet, il est toujours difficile d'établir clairement les conséquences associées à l'usage de PRO en fertilisation : cela évite-t-il clairement la production des engrais minéraux ? Dans quelles proportions l'engrais minéral est-il substitué par l'agriculteur ?

Les règles de substitution des engrais avec des boues en ACV donnent toujours lieu à des questionnements méthodologiques de la part de la communauté des chercheurs et des praticiens de l'ACV. Un certain nombre d'entre eux est présenté dans la dernière partie de cet article.

## 2.2.2. La valorisation énergétique, un nouveau débouché pour les boues

À notre connaissance, il n'existe pas à l'heure actuelle d'études portant sur la comparaison de plusieurs filières de production d'électricité incluant les boues d'épuration. Toutefois, dans l'optique du développement de la valorisation énergétique des boues d'épuration, ce scénario est tout à fait envisageable.



STEP : station d'épuration.

Figure 7. Scénarios étudiés et frontières de l'étude dans le projet Proextern (projet Ademe 2011-2015)

Dans ce cas-là, l'objectif de ce type d'ACV serait de pouvoir comparer les impacts de la production d'électricité avec différents types de boues (et différentes techniques au sein des STEP) ou les impacts de la production d'électricité des boues avec d'autres combustibles. Dans ce type d'étude de production d'énergie à partir de boues, la fonction principale est de produire de l'énergie et, dans ce cas, le fait de traiter les boues est une fonction secondaire. L'unité fonctionnelle serait donc relative à la production de 1 kWh d'électricité.

Ainsi, il sera possible de comparer la filière boue à d'autres filières permettant la production d'énergie, telle que la production d'énergie fossile ou la production d'énergie à partir de biomasse.

Toutefois, d'autres questions se posent sur ce débouché, notamment des questionnements techniques et méthodologiques :

- la boue dont le pouvoir calorifique (PCi) n'est pas suffisant pour permettre une combustion nécessite un ajout de combustible supplémentaire : en quoi cela influence-t-il le bilan environnemental de ce nouveau débouché, y a-t-il un réel gain ?
- la boue peut être mélangée à d'autres substrats, tels que les ordures ménagères, pour produire de l'énergie ; dans ce cas-là, doit-on prendre en compte la filière ordures ménagères dans le périmètre du système boue ?

Ces questions sont d'autant plus importantes qu'elles vont avoir une influence sur le périmètre de l'étude, les hypothèses à réaliser et donc conditionner les résultats de l'étude.

### 2.2.3. De nouveaux débouchés pour les boues en tant que nouvelle matière première : polymères et matériaux inertes

De nouvelles voies de valorisation des boues pour la production de ressources à valeur ajoutée sont de plus en plus explorées. Par exemple, de nouvelles voies de valorisation pour la production de biopolymères de type polyhydroxyalcanoates (PHA) à partir de la fraction organique du carbone contenu dans les boues sont en cours de développement [ALBUQUERQUE, 2011]. Par ailleurs, le potentiel d'utilisation des boues dans le domaine de la céramique est également en cours d'évaluation.

Le développement de nouvelles filières implique l'enchaînement de procédés ayant recours à des équipements et des réactifs complexes, dont les impacts sur l'environnement sont mal connus. En mettant en évidence les points sensibles de la filière de production de matériaux (méthode de production, étapes, produits, techniques d'extraction, etc.), l'ACV permet d'identifier les voies d'amélioration des performances environnementales des innovations en développement, avec une vision multicritère.

Ainsi, pour accompagner le développement de ces innovations technologiques et s'assurer de la pertinence environnementale, l'ACV est un outil adapté.

Dans ce type d'étude de production de ressources à partir de boues, la fonction principale est de produire du matériau (céramique, biopolymère) et, dans ce cas, le fait de traiter les boues est une fonction secondaire. Ainsi, il sera possible de comparer la filière boue à d'autres filières permettant la production d'un matériau équivalent.

## 3. Problématiques méthodologiques associées aux ACV appliquées aux boues d'épuration

L'ACV des filières de traitement et de valorisation des boues comporte des lacunes méthodologiques importantes qui doivent encore faire l'objet d'échanges entre experts ACV et gestionnaires de boues afin d'aboutir à des recommandations adaptées en fonction de l'objectif des études.

D'une manière générale, les ACV de traitement et de valorisation des boues comportent les mêmes problématiques méthodologiques que les ACV « déchets », à savoir le caractère « fatal » du déchet entrant [GENTIL *et al.*, 2010]. Ainsi, les impacts amont associés à la gestion des eaux usées ne sont pas pris en compte.

Par ailleurs, de même qu'en ACV déchets, la question de l'allocation des bénéfices associés à la valorisation matière ou énergie se pose. Différents choix méthodologiques sont possibles : extension des frontières, allocation en fonction des marchés, des flux physiques... Selon la méthode choisie, les résultats peuvent être très différents et la question de la modélisation conséquentielle se pose.

La règle d'extension des frontières est celle la plus souvent utilisée. Cette règle permet d'avoir recours à la substitution des cofonctions (production d'énergie, production d'engrais organiques) par des procédés classiquement utilisés (mix électrique, engrais minéraux respectivement). Ainsi pour la modélisation de la substitution de l'électricité, plusieurs mix électriques sont possibles en fonction de l'approche considérée (moyenne, saison, usage en base ou en pointe...). Pour la substitution à des engrais minéraux, plusieurs engrais peuvent être utilisés (engrais simples, engrais composés ayant chacun un coût environnemental différent lié à leur fabrication) et la question de l'équivalence entre engrais minéraux et PRO (boues ou composts) se pose.

Pour la filière d'épandage des boues, plusieurs problématiques méthodologiques sont soulevées :

1°) Les bénéfices agronomiques associés à l'apport de matière organique contenue dans la boue ne sont pas considérés dans les méthodes d'impact ACV [GARRIGUES *et al.*, 2012 ; MARTINEZ-BLANCO *et al.*, 2013]. Cela est particulièrement important quand les boues sont compostées et que les effets agronomiques sont plus liés à l'apport de matière organique plutôt que d'éléments fertilisants. En conséquence, tous les effets positifs sur la stabilité de la structure, les propriétés hydriques des sols (et les conséquences sur la lutte contre l'érosion, l'alimentation en eau des plantes, la biodiversité, le travail du sol, etc.) en lien avec les propriétés amendantes des PRO (surtout pour les composts) sont généralement négligés dans la communication des résultats.

2°) Les modèles utilisés pour l'évaluation des impacts relatifs à l'écotoxicité sont souvent remis en cause par de nombreux praticiens de l'ACV [CURRAN *et al.*, 2010]. Ainsi, cet impact pénalise en général fortement la filière d'épandage de boues en lien avec les contaminants, tels que les éléments traces minéraux qu'elles peuvent contenir et qui sont apportés au sol lors de l'épandage, en raison des incertitudes associées aux méthodes d'impacts ACV pour ces substances.

3°) Le carbone biogénique apporté par les PRO stocké temporairement dans le sol et réémis peut être comptabilisé avec un pouvoir de réchauffement global nul au nom du principe de neutralité carbone de la biomasse. Néanmoins cette approche est remise

en cause [LEVASSEUR *et al.*, 2010]. L'abandon du principe de neutralité des émissions de carbone biogénique en matière de changement climatique implique la quantification des flux de carbone d'origine biogénique absorbés ou émis par la biomasse et les sols, ce qui nécessite des connaissances spécifiques sur des processus complexes liés à l'évolution des stocks de carbone dans les sols au cours du temps.

4°) Les émissions de gaz à effet de serre et notamment de N<sub>2</sub>O peuvent être estimées grâce à l'utilisation de modèles agronomiques spécifiques (STICS [BRISSON *et al.*, 2003] et CERES-EGC [GABRIELLE *et al.*, 2005]) ou de données du GIEC. Aussi bien les facteurs d'émissions de l'*Intergovernmental panel on climate change* (IPCC) ou le paramétrage des modèles pour la diversité des PRO et des situations pédoclimatiques restent à améliorer. En fonction du modèle et des horizons temporels considérés, les émissions sont très variables, posant la question de la cohérence des données et des périodes à prendre en compte.

Enfin, lors de la réalisation d'ACV déchets, l'interprétation des résultats peut être difficile, car elle est très dépendante des hypothèses, et d'autant plus lorsque l'on traite des règles de substitution. Quelques préconisations peuvent toutefois faciliter l'interprétation de ces résultats :

- ne pas agréger impacts évités et impacts générés, afin de pouvoir visualiser les résultats relatifs aux deux types d'impacts ;
- réaliser une analyse de sensibilité<sup>6</sup> des hypothèses de substitution au regard de leur manque vraisemblable de fiabilité, il s'agira alors de quantifier et de discuter les différences d'impact selon différents choix méthodologiques et hypothèses de substitution.

## Conclusion

La conduite d'une étude ACV sur les boues d'épuration dépend du mandataire de l'étude (gestionnaire ou collectivité) et des objectifs fixés par celui-ci (écoconception ou reconception d'un procédé ou

<sup>6</sup> Procédure systématique pour estimer les effets sur les résultats d'une étude des choix concernant les méthodes et les données utilisées.

d'une filière, choix de la voie de valorisation des boues ayant le moins d'impact...). La terminologie « ACV boues » regroupe ainsi au minimum quatre types d'ACV selon que l'on cherche à évaluer les performances environnementales d'un procédé ou d'une filière dans son ensemble et selon que l'on se place en tant que traiteur d'eau ou en tant que producteur d'une nouvelle ressource.

Pour chacune de ces ACV, les questions relatives aux objectifs attendus, au périmètre à prendre en compte, à la fonction étudiée et au choix de l'unité fonctionnelle (unité de quantification de la fonction) ont été présentées.

L'ACV des filières de traitement et de valorisation des boues comporte des lacunes méthodologiques qui doivent encore faire l'objet d'échanges entre experts ACV et gestionnaires de boues afin d'aboutir à des recommandations adaptées en fonction de l'objectif des études (substitution, méthodes d'impacts, bénéfices agronomiques, horizons temporels...).

## Bibliographie

- AFNOR, NF EN ISO 14040 (2006) : Analyse du cycle de vie – Principes et cadre. 23 pages.
- AFNOR, NF EN ISO 14044 (2006) : Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices. 49 pages.
- ALBUQUERQUE M.G.E., MARTINO V., POLLET E., AVÉROUS L., REIS M.A.M. (2011) : « Mixed culture polyhydroxyalkanoate (PHA) production from volatile fatty acid (VFA)-rich streams: Effect of substrate composition and feeding regime on PHA productivity, composition and properties ». *Journal of Biotechnology* ; vol. 151 (1) : 66-76.
- BRISSON N., GARY C., JUSTES E., ROCHE R., MARY B., RIPOCHE D., *et al.* (2003) : « An overview of the crop model STICS ». *European Journal of Agronomy* ; 18 : 309-332.
- CURRAN M., DE BAAN L., DE SCHRYVER A.M., VAN ZELM R., HELLWEG S., KOELLNER T., *et al.* (2010) : « Toward meaningful end points of biodiversity in life cycle assessment ». *Environmental Science & Technology* ; 45(1) : 70-79.
- FORSTER P., RAMASWAMY V., ARTAXO P., BERNTSEN T., BETTS R., FAHEY D.W., *et al.* (2007) : « Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing ». In : Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., *et al.* (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Grande-Bretagne, et New York, États-Unis.
- GABRIELLE B., DA-SILVEIRA J., HOUOT S., MICHELIN J. (2005) : « Field-scale modelling of carbon and nitrogen

Des recommandations sont proposées également pour l'interprétation des résultats. Dissocier les impacts évités des impacts générés permet de fournir au gestionnaire et au décideur une vision des bénéfices potentiels qui peuvent être réalisés. Toutefois, la prise de décision ne devra pas être fondée sur ces impacts évités dans le choix final du décideur du fait des hypothèses fortes réalisées sur la substitution.

Malgré les limites méthodologiques soulevées, cet article met en avant l'usage de la méthodologie ACV comme outil de pilotage de filières innovantes de gestion des boues et comme outil d'aide à la décision pour les politiques industrielles ou publiques (améliorations de produits, choix de procédés ou de filières...).

## Remerciements

Les auteurs remercient vivement Lynda Aissani et Claire Déchaux pour leur contribution à la relecture de cet article.

- dynamics in soils amended with urban waste composts Agriculture ». *Ecosystems and Environment* ; 110 : 289-299.
- GARRIGUES E., CORSON M., ANGERS D.A., VAN DER WERF H., WALTER C. (2012) : « Soil quality in life cycle assessment: Towards development of an indicator ». *Ecological Indicators* ; 18 : 434-442.
- GENTIL E., DAMGAARD A., HAUSCHILD M., FINNVEDEN G., ERIKSSON O., THORNELOE S., *et al.* 2010. « Models for waste life cycle assessment: Review of technical assumptions ». *Waste Management* ; 30, No. 12 : 2636-2648.
- GUINÉE J.B., GORRÉE M., HEIJUNGS R., HUPPES G., KLEIJN R., DE KONING A., *et al.* (2001) : *Life cycle assessment - An Operational Guide to the ISO Standards*. Leiden, The Netherlands, Centre of Environmental Science, Leiden University.
- JOLLIET O., MARGNI M., CHARLES R., HUMBERT S., PAYET J., REBITZER G., ROSENBAUM R., (2003) : « IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology ». *International Journal of Life Cycle Assessment* ; 8(6) : 324-330.
- JOLLIET O., SAADÉ M., CRETATZ P. (2005) : « Analyse du cycle de vie – Comprendre et réaliser un écobilan ». Lausanne, collection Gérer l'environnement n° 23, Presses Polytechniques et universitaires romandes.
- LEVASSEUR A., LESAGE P., MARGNI M., DESCHÊNES L., SAMSON R. (2010) : « Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments ». *Environmental Science & Technology* ; 44(8) : 3169-3174.
- MARTÍNEZ-BLANCO J., LAZCANO C., CHRISTENSEN T.H., MUÑOZ P., RIERADEVALL J., MØLLER J., *et al.*

[2013] : « Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment ». *A review. Agronomy for Sustainable Development* ; 33(4) : 721-732.

PRADEL M. (2008) : « Analyses de cycle de vie (ACV) appliquées au traitement des boues d'épuration : état de l'art, bilan des connaissances et des impacts environnementaux ». *Ingénieries - E A T, n° spécial Les boues résiduaires : quelle caractérisation et quels impacts expérimentaux pour l'épandage agricole ?*, p. 81-93.

PRADEL M., PACAUD T., CARIOLLE M. (2011) : Émissions azotées au champ et performances des machines lors de l'épandage de boues issues du traitement des eaux usées. Livrable T2c du projet Ecodefi. 116 p + annexes.

PRADEL M., RICHARD M., REVERDY A.L. (2014) : Analyses du cycle de vie des filières de traitement et de valorisation des boues issues du traitement des eaux usées. Rapport Onema/Irstea, 100 pages.

SHAW A., COLEMAN P., NOLASCO D., ROSSO D., YUAN Z., VAN LOOSDRECHT M.C.M., *et al.* (2010) : « Workshop Summary: The role of modeling in assessing greenhouse gas (GHG) emissions ». *Proceedings of 83rd Annual WEFTEC*, New Orleans (États-Unis).

## Résumé

**M. PRADEL, J. SERRE, S. MEHIER, L. BENARD, C. TESSIER, S. BAPST, S. HOUOT**

### **Gestion des filières de traitement et de valorisation/élimination des boues par les collectivités. L'analyse du cycle de vie comme outil d'innovation : état des lieux et perspectives**

Dans le cadre des travaux menés au sein du groupe « Boues » de la commission assainissement de l'Astee, les membres du groupe ont démarré une démarche de réflexion relative à l'analyse du cycle de vie (ACV) appliquée aux filières de traitement et de valorisation/élimination des boues issues du traitement des eaux usées. L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation environnementale multicritère permettant d'évaluer les impacts environnementaux potentiels d'un produit, d'un service ou d'un système en incluant l'ensemble des activités liées à ce système depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement des déchets (c'est-à-dire son cycle de vie). Pour les filières boues, tout ce qui précède le traitement des boues et donc les étapes de la filière eaux usées est exclu.

Outil conduisant à l'identification des principaux facteurs responsables des impacts environnementaux potentiels d'un système, l'ACV permet d'engager des démarches d'amélioration continue

des performances environnementales de filières industrielles, dans une logique d'écoconception ou de reconception. Par ailleurs, l'ACV permet d'asseoir une innovation technologique, en fournissant des informations sur les performances environnementales de nouveaux produits/services.

Pour les filières de gestion des boues, l'ACV est une démarche couramment mise en œuvre par les industriels, avec des objectifs et des ambitions différents. L'objectif de cet article est de présenter un état des lieux des pratiques et d'analyser en quoi l'ACV est un outil permettant de susciter ou de supporter l'innovation dans le domaine de la gestion des boues issues du traitement des eaux usées. Enfin, cet article soulève les questions méthodologiques classiquement rencontrées, sans toutefois avoir l'ambition d'y répondre, afin de mettre en évidence le besoin de transparence dans la communication et la nécessité de poursuivre les échanges pour les praticiens de l'ACV à la recherche de consensus.

## Abstract

### **M. PRADEL, J. SERRE, S. MEHIER, L. BENARD, C. TESSIER, S. BAPST, S. HOUOT** **Life Cycle Assessment as a tool for innovation in sewage sludge treatment and disposal routes : state-of-the-art and outlooks**

As part of discussions within the "Sludge" group of the Astee Water treatment commission, the group members began a process of reflection on the life cycle assessment (LCA) method applied to sewage sludge treatment and disposal routes. Life cycle assessment is an environmental multicriteria assessment method used to evaluate the potential impacts of a product, a service or a system including all the related activities from the raw materials extraction up to its end of life.

As a tool used to identify the main parameters responsible for the environmental impacts of a system, LCA is a way that can engage the company in continuous improvement of its performance in an ecodesign or reconception of the industrial

lines. LCA can also base a technological innovation by providing data on the environmental performances of new products.

For sewage sludge lines, LCA is a common used tool with different objectives and ambitions. This paper aims to provide a state-of-the-art of the possible uses of LCA applied to sludge treatment and disposal routes and identifies key issues which can be answered by the use of this method. Finally, this paper highlights the methodological questions commonly encountered in LCA applied to this topic (without given answers) in order to show the needs for transparency in communication and the needs to carry on discussion among LCA practitioners to find a consensus in LCA applied to sludge lines.