

# Analyses de cycle de vie (ACV) appliquées au traitement des boues d'épuration : état de l'art, bilan des connaissances et des impacts environnementaux

Marilys Pradel

**D**ans le contexte européen actuel, la question des déchets prend une importance toute particulière au regard des enjeux du développement durable, de la préservation de l'environnement et du changement climatique. La gestion des boues issues du traitement des eaux usées ne fait pas exception et revêt au contraire une grande importance du fait de l'augmentation des quantités traitées d'une part et d'une réglementation européenne rigoureuse vis-à-vis de la préservation de l'environnement d'autre part. Selon une estimation de l'Ademe<sup>1</sup> de 2001 (Ademe, 2001), la quantité de boues produites en France est passée de 850 000 tonnes de matière sèche à 1 100 000 tonnes de matière sèche entre 2000 et 2005. La réglementation européenne cible plus particulièrement certaines filières de traitement des boues, notamment l'épandage agricole, au regard des transferts potentiels de métaux lourds, composés-traces organiques (CTO) et pathogènes dans les sols pouvant migrer dans les aliments destinés à la consommation humaine.

Toutefois, aucune réglementation n'exige de construire des stations d'épuration réduisant l'ensemble des impacts environnementaux (impact de l'implantation sur les milieux naturels, la production de gaz à effet de serre...), ce qui est préconisé dans le cadre du développement durable. De même, aucun texte de loi n'indique quelle est la meilleure filière d'élimination des boues au regard des impacts environnementaux. Ainsi, au cours des dernières années, plusieurs

auteurs ont utilisé l'analyse de cycle de vie (ACV) pour connaître les impacts environnementaux des différentes filières de traitement des boues de stations d'épuration et des procédés d'élimination de ces boues (Suh et Rousseaux, 2002 ; Lundin *et al.*, 2004 ; Svanstrom *et al.*, 2004 ; Hospido *et al.*, 2005 ; Houillon et Jolliet, 2005 ; Vandebossche *et al.*, 2005 ; Renou, 2006 ; Tidaker *et al.*, 2006 ; Johansson *et al.*, 2007).

Notre étude essaie de répondre à deux questions sur le traitement des boues à travers l'ACV : quel est le meilleur procédé d'élimination d'un point de vue environnemental ? Quels sont les impacts environnementaux des différents procédés d'éliminations des boues ? Après avoir présenté dans un premier temps l'analyse de cycle de vie, ses atouts et ses limites, un état des lieux sur les ACV appliquées au traitement et à l'élimination des boues de STEP<sup>2</sup> et ses impacts environnementaux sera détaillé avant de conclure sur les perspectives et les attendus du projet ECODEFI<sup>3</sup>.

## La méthode ACV

L'ACV est une méthode normalisée (AFNOR<sup>4</sup> a, 2006 ; AFNOR b, 2006) étudiant les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un système à chaque étape de son cycle de vie. Le cycle de vie d'un produit ou d'un système comprend les étapes de fabrication, d'utilisation et d'élimination, autrement dit « du berceau jusqu'à la tombe ». Selon la norme, la réalisation d'une analyse de cycle de vie nécessite quatre

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

2. Station d'épuration.

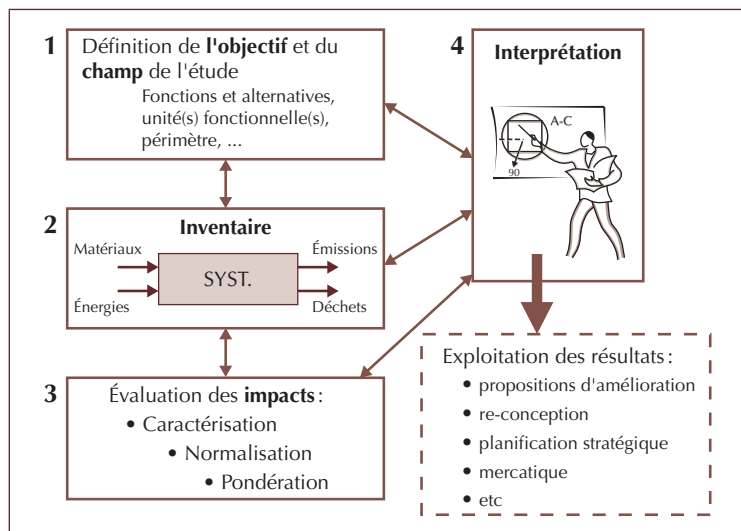
3. Éco-conception et développement de méthodologies de fabrication innovante de machines d'épandage.

4. Association française de normalisation.

## Les contacts

Cemagref Clermont-Ferrand, UR TSCF, Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes, Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre

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

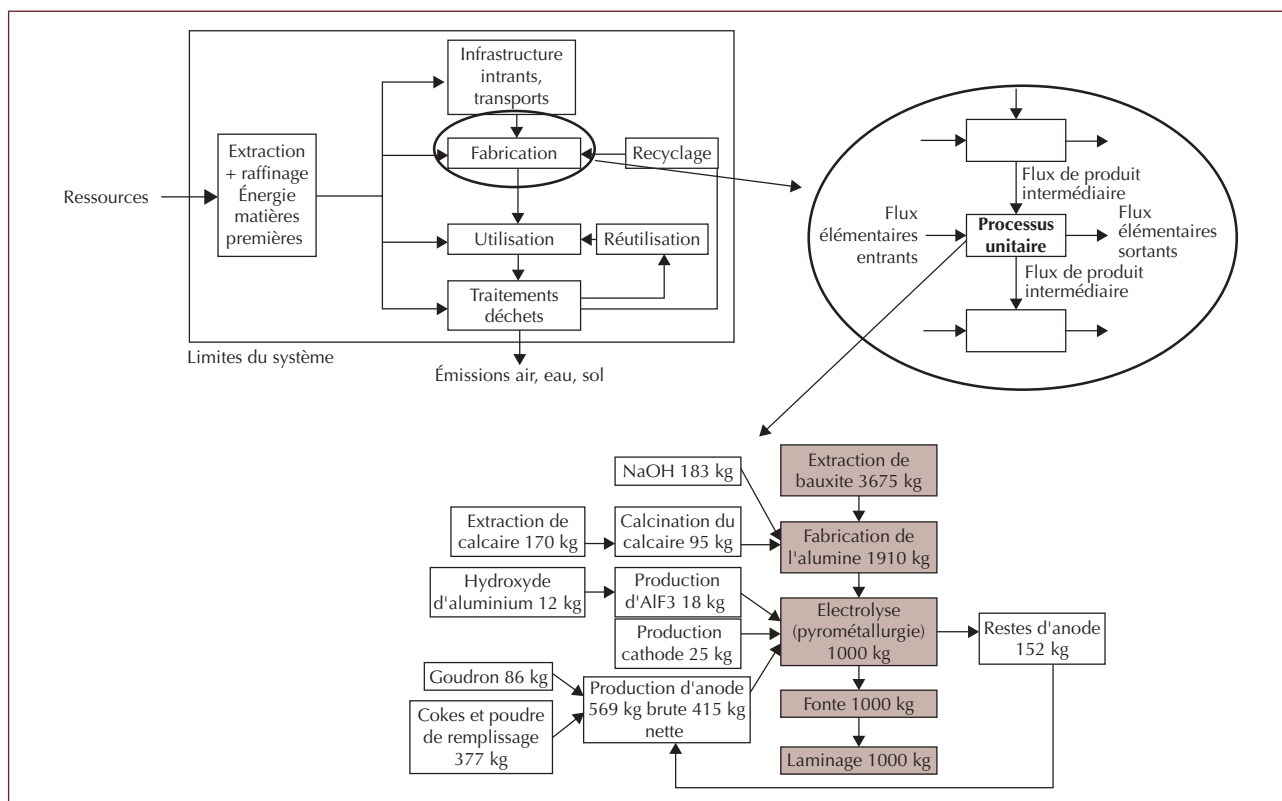


### Définition de l'objectif et du champ de l'étude

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 l'unité fonctionnelle, les frontières du système et la modélisation de ce dernier (figure 2), les catégories et types de données à collecter et les hypothèses de départ.

### Analyse de l'inventaire ou phase d'inventaire du cycle de vie (ICV)

L'analyse de l'inventaire est l'étape 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



▲ Figure 2 – Arbre des processus utilisé pour la modélisation d'un système et principales étapes du cycle de vie d'un produit : exemple de la fabrication d'aluminium primaire (Joliet, 2005).

global. La phase d'ICV consiste à réaliser le bilan des flux entrants (matière, énergie...) et sortants (émissions, déchets...) du système étudié.

### 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 sont convertis en quantité « équivalente » de substance de référence par un *coefficient de caractérisation* (encadré 1 : exemple du réchauffement climatique).

L'ACV propose une approche multicritère permettant d'étudier différentes catégories d'impacts environnementaux, *i.e.* des impacts orientés « problème » (*mid-point impact*) tels que l'eutrophisation, l'acidification, la toxicité humaine ou encore le réchauffement climatique, ou des impacts orientés « dommage » (*end-point impact*) tels que le changement climatique, la santé humaine ou la qualité des écosystèmes. La différence entre les deux types d'impacts réside dans le niveau d'agrégation des flux lors de la construction des modèles de caractérisation (encadré 2).

Cette étape de caractérisation des impacts peut être suivie par une étape de normalisation, permettant 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).

### Interprétation des résultats

Cette dernière phase de l'ACV permet d'analyser les hypothèses émises, les méthodes utilisées, les résultats obtenus au niveau de l'analyse de l'inventaire et de l'évaluation des impacts. Elle permet de présenter les conclusions et recommandations de l'étude après une revue critique réalisée par une personne extérieure indépendante.

### L'ACV appliquée au traitement des boues d'épuration

Afin de pouvoir réaliser l'état de l'art des connaissances des impacts environnementaux appliqués aux filières de traitement et d'élimination des boues, une étude bibliographique a été réalisée sur les articles scientifiques publiés au cours des dix dernières années. Seules les publications comparant différents scénarios d'élimination des boues ont été retenues pour l'étude. Huit articles ont pu ainsi être comparés entre 1999 et 2007.

L'état de l'art issu de cette synthèse a porté sur la méthode et les logiciels ACV utilisés, les frontières des systèmes étudiés et les unités fonctionnelles correspondantes, les résultats et les principales conclusions (tableau 1).

#### Encadré 1

##### Coefficient (ou facteur) de caractérisation des impacts

Pour évaluer les impacts environnementaux dans le cadre d'une ACV, les flux référencés lors de l'analyse de l'inventaire sont convertis en quantité « équivalente » de substance de référence par un *coefficient 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 et  $EF_i$  le facteur de caractérisation de l'impact.

**Exemple : réchauffement climatique** Le calcul de l'indicateur du réchauffement climatique (ou *Global Warming Potential*, GWP) est basé sur la mesure du forçage radiatif pour chaque gaz et mesuré en équivalent  $\text{CO}_2^5$  (substance de référence) pour une durée définie (100 ans dans la majorité des cas).

Ainsi, un procédé qui émettrait 1 tonne de  $\text{CO}_2$  et 0,17 tonne de  $\text{N}_2\text{O}^6$  aurait un impact « réchauffement climatique » équivalent à 51 tonnes d'équivalent  $\text{CO}_2$ , le  $\text{N}_2\text{O}$  ayant un pouvoir de réchauffement global 296 fois supérieur au  $\text{CO}_2$ .

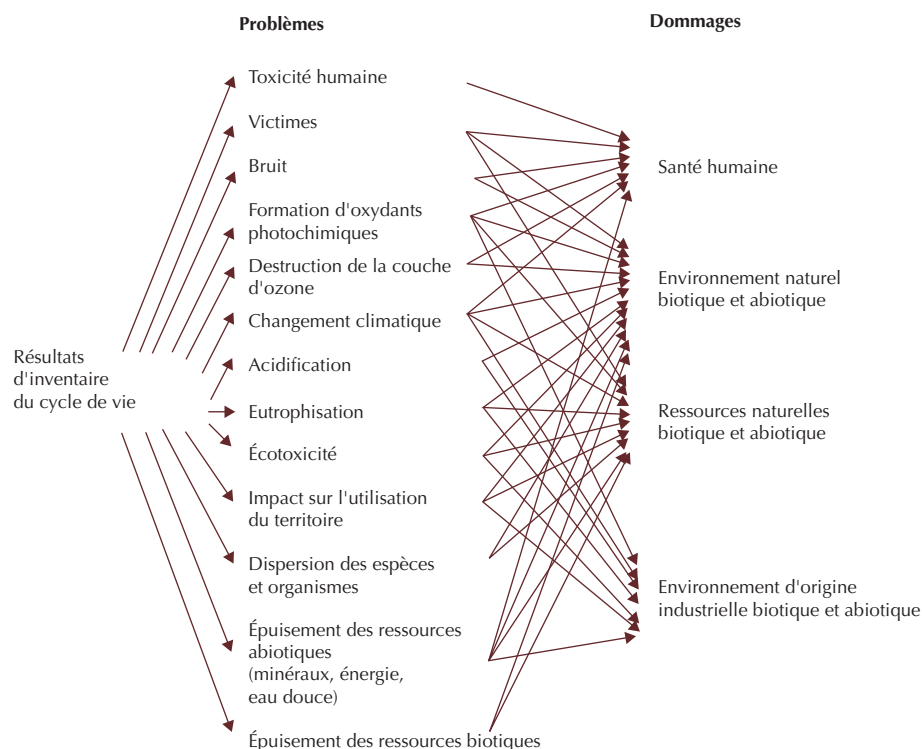
5. Dioxyde de carbone.

6. Protoxyde d'azote.

## Encadré 2

## Typologie des méthodes de caractérisation utilisées en ACV

Les méthodes de caractérisation des flux en impacts potentiels peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes orientées « problème » et les méthodes orientées « dommage ». La figure 3 (Olivier Jolliet *et al.*, 2004) montre la structure générale de la construction des catégories d'impact et le passage de l'une à l'autre.



▲ Figure 3 – Structure générale de la construction des catégories d'impact.

### Frontières du système et unités fonctionnelles

Parmi les études publiées entre 1999 et 2007, la majorité utilise la tonne de matière sèche de boue. L'ensemble des articles délimitait leur système depuis la production de boues mixtes épaissies jusqu'à la voie d'élimination finale.

### Comparaison de scénarios et méthode de caractérisation des impacts utilisée

La méthode de caractérisation des impacts la plus utilisée par les auteurs est la méthode CML (Guinée, 2001) ; certains auteurs ont également utilisé la méthode Eco-indicator99 (Goedkoop,

2000), EPS2000 (Steen, 1999) ou un modèle spécifique conçu par les auteurs tel que le modèle ORWARE (Eriksson *et al.*, 2002).

Les catégories d'impacts les plus étudiées concernent le réchauffement climatique, l'acidification, l'eutrophisation et la consommation des ressources naturelles.

Trois à dix scénarios étaient étudiés pour chaque étude et les principales filières d'élimination des boues concernées étaient :

- l'épandage agricole,
- l'incinération (sur lit fluidisé, avec déchets ménagers ou en cimenterie),

▼ Tableau 1 – Synthèse des études utilisant les ACV pour l'évaluation environnementale des filières de traitement des boues.

Auteurs	Tidaker et al.	Svanstrom et al.	Suh et Rousseaux	Hospido et al.	Houillon et Jolliet	Arthur Andersen	Johansson et al.	Lundin et al.
Titre de l'article	Wastewater management integrated with farming – an environmental systems analysis of a Swedish country town	Environmental assessment of supercritical water oxidation of sewage sludge	An LCA of alternative wastewater sludge treatment scenarios	Environmental Evaluation of Different Treatment Processes for Sludge from Urban Wastewater Treatments: Anaerobic Digestion versus Thermal Processes	Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge : energy and global warming analysis	Audit environnementale et économique des filières d'élimination des boues d'épuration urbaines – Pré-étude de définition, analyse environnementale	Sewage sludge handling with phosphorus utilization – life cycle assessment of four alternatives	Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options
Date de publication	2006	2004	2002	2005	2005	1999	2007	2004
Systèmes étudiés	– Système 1 : compost d'ordures ménagères (alimentaires) et compost de boues de STEP, utilisation d'engrais minéraux sur les sols agricoles. – Système 2 : boues d'épurations issues de STEP épandues sur les sols agricoles. – Système 3 : boues du système de traitement déchets organiques + eaux noires épandues sur sols agricoles.	– Système 1 : oxydation par voie humide.	– Système 1 : boues mixtes (épaississement + déshydratation) – stockage/incinération – transport/mise en décharge. – Système 2 : boues mixtes (épaississement + déshydratation) – chaulage – transport/mise en décharge. – Système 3 : boues mixtes (épaississement + déshydratation) – chaulage – transport/mise en décharge. – Système 4 : boues mixtes (épaississement + déshydratation) – chaulage – transport/mise en décharge. – Système 5 : boues mixtes (épaississement + déshydratation) – compostage – transport/mise en décharge. – Système 6 : boues mixtes (épaississement + déshydratation) – digestion anaérobie – transport/mise en décharge.	– Système 1 : boues mixtes – digestion anaérobie – déshydratation – épandage. – Système 2 : boues mixtes – déshydratation – épandage. – Système 3 : boues mixtes – incinération. – Système 3a : boues mixtes – épandage. – Système 3b : boues mixtes – épandage. – Système 4 : séchage thermique (réutilisation de gaz de synthèse). – Système 5 : boues mixtes – épandage. – Système 6 : séchage thermique – épandage. – Système 7 : séchage thermique – épandage. – Système 8 : séchage thermique – épandage. – Système 9 : toutes les fractions produites).	– Système 1 : boues mixtes épaissies – déshydratation – épandage. – Système 2 : boues mixtes épaissies – déshydratation – incinération – transport/stockage résidus. – Système 3 : boues mixtes épaissies – stockage – OVH – transport/stockage résidus. – Système 4 : boues mixtes épaissies – séchage – pyrolyse – stockage résidus. – Système 5 : boues mixtes épaissies – déshydratation – séchage – pyrolyse – stockage résidus. – Système 6 : boues mixtes épaissies – déshydratation – séchage – pyrolyse – stockage résidus. – Système 7 : boues mixtes épaissies – déshydratation – séchage – pyrolyse – stockage résidus. – Système 8 : boues mixtes épaissies – déshydratation – séchage – pyrolyse – stockage résidus. – Système 9 : boues mixtes épaissies – déshydratation – séchage – pyrolyse – stockage résidus. – Système 10 : boues mixtes épaissies – déshydratation – séchage – pyrolyse – stockage résidus.	– Système 1 : mise en décharge de boues solides (moyenne station). – Système 2 : épandage de boues liquides d'une petite station. – Système 3 : épandage de boues pâteuses non chaulées d'une moyenne station. – Système 4 : épandage de boues pâteuses chaulées d'une moyenne station. – Système 5 : épandage de boues compostées d'une grande station. – Système 6 : épandage de boues solides d'une grande station. – Système 7 : épandage de boues sèches d'une grande station. – Système 8 : incinération spécifique (grande station). – Système 9 : co-incinération de boues sèches avec OM (grande station). – Système 10 : co-incinération de boues pâteuses avec OM (moyenne station).	– Système 1 : réhabilitation des exploitations minières (Boliden). – Système 2 : compostage avec d'autres biomatériaux et utilisation sur terrain de golf (Econova). – Système 3 : hygrénisation avant épandage agricole (Ragnsells). – Système 4 : OVH avec récupération du phosphore (Aqua recil).	– Système 1 : utilisation agricole. – Système 2 : co-incinération avec d'autres déchets (principalement des ordures ménagères). – Système 3 : incinération avec récupération du phosphore (Bio-Con). – Système 4 : fractionnement par hydrolyse et acidification pour récupérer le phosphore (Cambi- KREPRO).

▼ Tableau 1 – Synthèse des études utilisant les ACV pour l'évaluation environnementale des filières de traitement des boues. (suite)

Auteurs	Tidaker <i>et al.</i>	Svanstrom <i>et al.</i>	Suh et Rousseaux	Hospido <i>et al.</i>	Houillon et Jolliet	Arthur Andersen	Johansson <i>et al.</i>	Lundin <i>et al.</i>
Impact étudiés	Utilisation d'énergie, eutrophisation, GWP, acidification	GWP, POCP, consommation des ressources	Consommation de ressources, GWP, HT, écotoxicité terrestre, écotoxicité marine, écotoxicité aquatique, acidification, eutrophisation, POCP	Eutrophisation, ozone stratosphérique, réchauffement global, acidification, formation de photo-oxydant, consommation de ressources abiotiques, toxicité humaine, toxicité terrestre	Ressources énergétiques, changement climatique	POCP, dispersion de substances toxiques dans l'air, utilisation de ressources naturelles, GWP, acidification, impact des toxiques sur les écosystèmes aquatiques, impact des toxiques sur les écosystèmes terrestres	Eutrophisation, réchauffement global, acidification, consommation de ressources et d'énergie primaire	Acidification, eutrophisation, réchauffement climatique, consommation de ressources
Méthode utilisée	Modèle ORWARE	Ecoindicator99, EPS2000	CML	CML	Non précisé	CML	Non précisé	<i>Environmental themes</i> (CML), EPS2000
Logiciel utilisé	Modèle ORWARE	LCAit 4.0	Non précisé	Simapro 5.1	Non précisé	Non précisé	LCAit 4.1.7	Non précisé
Durée	1 an	Non précisé	Non précisé	Non précisé	Non précisé	Non précisé	Non précisé	Non précisé
Unité fonctionnelle	Fournir un traitement des eaux pour 8 830 EH, produire 2 100 tonnes d'avoine sur 486 ha	1 000 kg de boue liquide	1 tonne MS de boue mixte issue d'un traitement de station d'épuration municipale en France	Gestion de 1 tonne de matière sèche de boue mixte épaisse	Tonne de MS de boues récupérée (recyclée ?)	Éliminer une tonne de boue brute (matière sèche + eau en sortie de clarificateur) par la filière associée	Traitement d'une tonne MS de boue digérée	Traitement d'une tonne de boues en MS
Émissions considérées	NO (IPCC), modèle pour compaction des sols, N <sub>2</sub> , O, NH <sub>4</sub> , NOx	Ressources, émissions vers l'air (CO <sub>2</sub> , Dioxine, PAH, NOx, SO <sub>2</sub> ), émissions vers l'eau (COD, solides dissous, solides suspendus, huile), déchets	Non précisé	VOC, CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O	Énergie non renouvelable, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , ETM, H <sub>2</sub> S, COV, HPA	N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , ETM, H <sub>2</sub> S, COV, HPA	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , métaux lourds, SOx, pétrole, gaz naturel, phosphore, soufre

- la mise en décharge,
- la pyrolyse,
- l'oxydation par voie humide.

### Principaux résultats observés

La comparaison d'étude d'évaluation environnementale à l'aide de l'ACV (quel que soit le système) ne peut être réalisée que si les mêmes unités fonctionnelles sont utilisées pour étudier des systèmes délimités de façon identique. Seules quatre études (Arthur Andersen Environnement, 1999 ; Suh et Rousseaux, 2002 ; Hospido *et al.*, 2005 ; Houillon et Jolliet, 2005) ont donc pu être comparées assez aisément puisqu'elles étudiaient les mêmes systèmes à l'aide des mêmes unités fonctionnelles.

#### ÉTUDE ARTHUR ANDERSEN ENVIRONNEMENT (1999)

L'étude d'Arthur Andersen Environnement a permis de comparer dix systèmes homogènes représentatifs de filières de traitement des boues urbaines couramment utilisées en France (figure 4). Pour chaque système, le périmètre étudié couvre l'ensemble des processus de traitement des boues depuis leur sortie du clarificateur

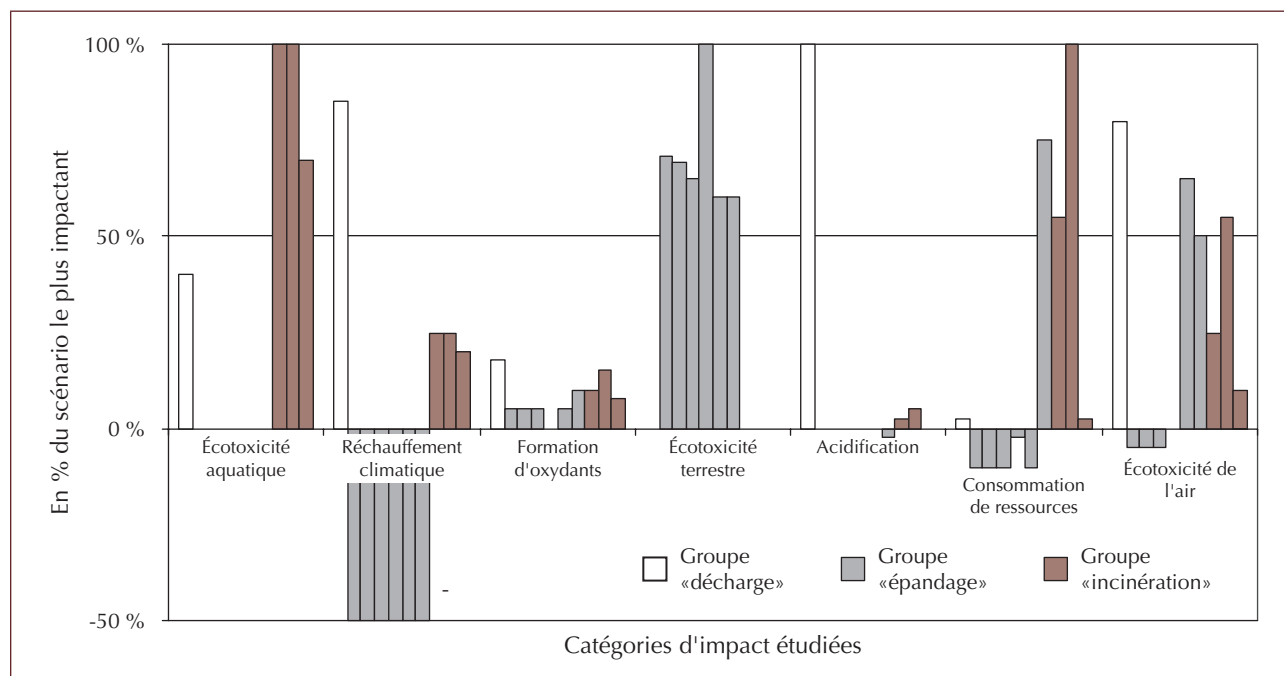
jusqu'à leur élimination (épandage, incinération ou mise en décharge). L'étude a abouti à l'évaluation des impacts sur l'environnement du traitement de la quantité de boues produites par une personne pendant environ six mois (sur la base de 20 kg de MS<sup>7</sup> produite annuellement par

7. Matières sèches.

Les dix scénarios étudiés sont la mise en décharge de boues solides (moyenne station), l'épandage de boues liquides d'une petite station, l'épandage de boues pâteuses non chaulées d'une moyenne station, l'épandage de boues pâteuses chaulées d'une moyenne station, l'épandage de boues compostées d'une grande station, l'épandage de boues solides d'une grande station, l'épandage de boues sèches d'une grande station, l'incinération spécifique (grande station), la co-incinération de boues sèches avec OM<sup>8</sup> (grande station) et la co-incinération de boues pâteuses avec OM (moyenne station).

8. Ordures ménagères.

Les résultats sont très sensibles aux pollutions engendrées par la consommation d'énergie et par le transport routier. Les filières les moins consommatrices d'énergie et celles qui limitent les distances de transport sont ainsi généralement favorisées (tableau 2).



▲ Figure 4 – Résultats des impacts environnementaux pour les dix systèmes homogènes étudiés regroupés en trois groupes : épandage, décharge et incinération (d'après Arthur Andersen Environnement, 1999).

Distance estimée	Décharge	Épandage	Incineration spécifique	Co-incineration
Petite station vers		5 km		
Moyenne station vers	50 km	15 km		50 km
Grande station vers		50 km	0 km (sur site)	50 km
Incineration vers	50 km			

▲ Tableau 2 – Distances utilisées pour le calcul des impacts environnementaux.

Le transport contribue alors de façon significative aux impacts environnementaux relatifs à l'air, notamment pour l'épandage de boues compostées et la co-incineration de boues pâteuses. La mise en décharge des boues solides est le scénario d'élimination le plus défavorable pour l'effet de serre, la dispersion de substances toxiques dans l'air et l'acidification. La contribution de l'incinération est liée à la dispersion de substances toxiques, à l'impact sur les écosystèmes aquatiques et l'utilisation des ressources naturelles et à l'effet de serre. L'épandage a un impact plus faible sur ces mêmes aspects et défavorable sur les écosystèmes terrestres (apports d'éléments trace métalliques sur les sols agricoles). La prise en compte de la substitution d'engrais par les boues induit un effet positif en termes d'effet de serre et d'impact sur les écosystèmes.

▼ Figure 5 – Impacts environnementaux pour chaque scénario étudié en comparaison au scénario 1 (Suh et Rousseaux, 2002).

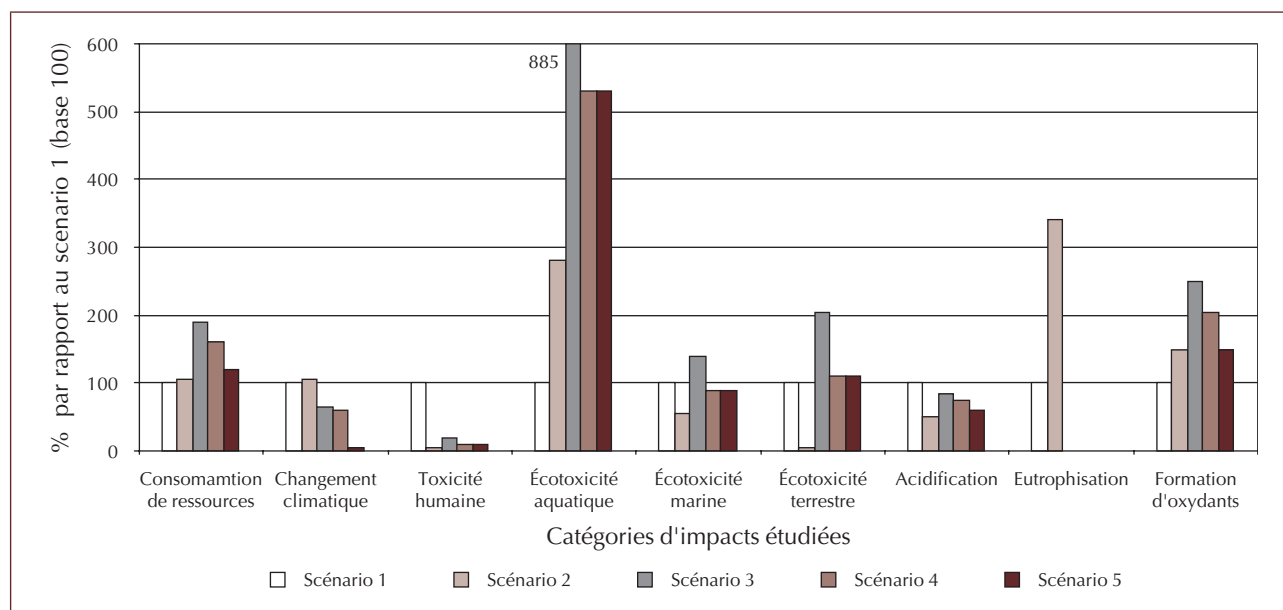
Selon les auteurs, l'incinération des boues est moins impactante que leur mise en décharge, mais génère des impacts plus importants par rapport à l'épandage agricole.

Cette filière de valorisation produit le moins d'impacts environnementaux excepté pour la toxicité terrestre, liée à la présence d'éléments trace métalliques dans les boues. L'épandage des boues sur les sols agricoles permet d'éviter l'utilisation d'engrais chimiques et les impacts environnementaux indirects qui y sont liés et se retrouve donc en positif dans le bilan final de l'ACV (cas pour le réchauffement climatique et la consommation des ressources).

#### ÉTUDE SUH ET ROUSSEAU (2002)

L'objectif de l'étude de Suh et Rousseaux était d'évaluer les consommations de ressources, les émissions polluantes et les impacts environnementaux de scénarios de traitement alternatif de boues d'épuration pendant leur période opérationnelle en contexte européen (figure 5). Les auteurs ont ainsi comparé cinq scénarios de traitement de boues mixtes issus des processus les plus utilisés en France sur la base de la tonne de MS de boues mixtes épaissies et déshydratées :

– scénario 1 : boues mixtes épaissies et déshydratées – stockage/incinération – transport/mise en décharge ;





- scénario 2 : boues mixtes épaissies et déshydratées – chaulage – transport/mise en décharge ;
- scénario 3 : boues mixtes épaissies et déshydratées – chaulage – transport/stockage – épandage ;
- scénario 4 : boues mixtes épaissies et déshydratées – compostage – transport/stockage – épandage ;
- scénario 5 : boues mixtes épaissies et déshydratées – digestion anaérobie – transport/stockage – épandage.

Les éléments traces métalliques (ETM) contenus dans les boues épandues sur les sols agricoles (scénarios 3, 4 et 5) contribuent significativement à l'écotoxicité des milieux aquatiques et terrestres. Les teneurs en ETM contenus dans les boues sont basées sur les teneurs maximales autorisées par la réglementation française. Contrairement à l'étude d'Arthur Andersen Environnement, la substitution des engrais chimiques par les boues n'a pas été prise en compte dans cette étude.

Le scénario le moins impactant est le scénario 5 car il génère moins d'émissions et moins de

consommation d'énergie. En effet, l'énergie thermique issue de l'incinération ou de la digestion anaérobie est réutilisée, ce qui permet de faire apparaître des bilans positifs pour ces deux filières. Les substances étudiées les plus impactantes restent les éléments trace métalliques contenus dans les boues et relâchés par l'incinération et l'épandage sur les sols agricoles.

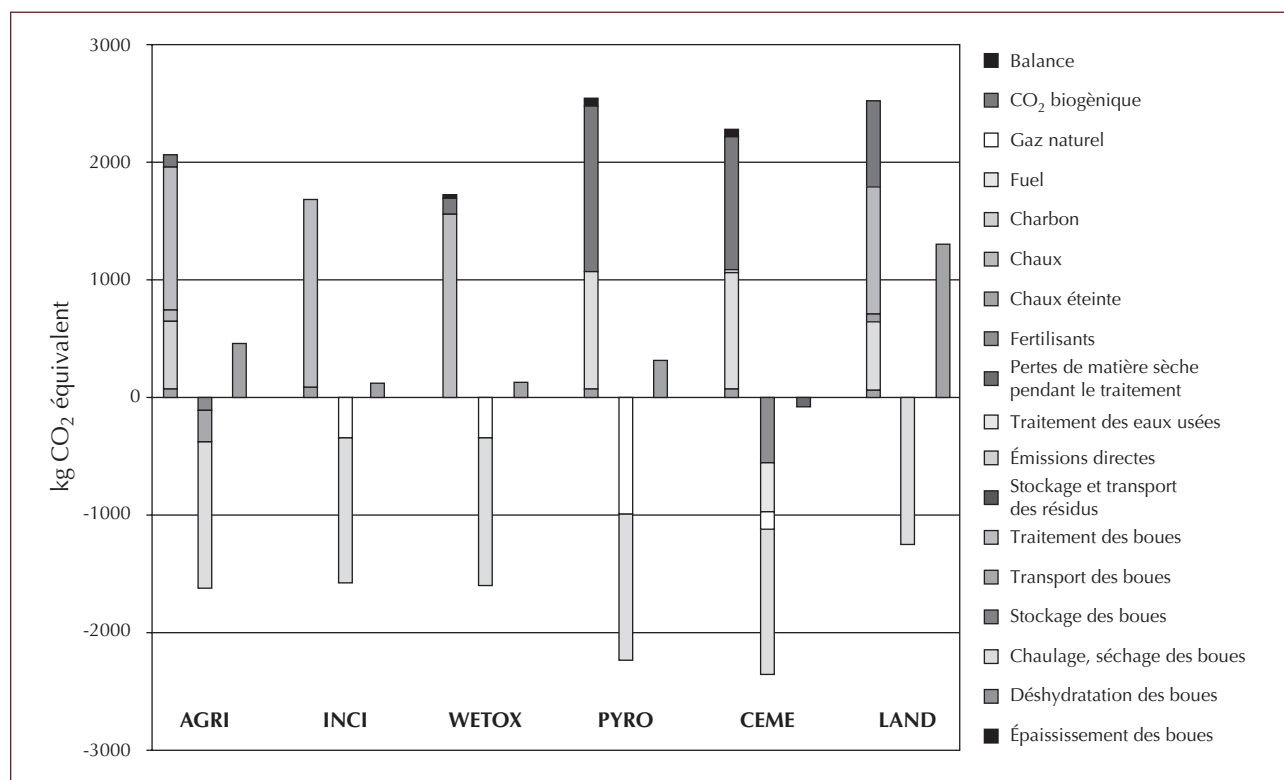
ÉTUDE HOUILLON ET JOLLIET (2005)

Cette étude est issue d'un projet industriel nommé « Écoboue ». L'objectif de ce projet était d'analyser l'impact environnemental de nouveaux procédés de traitement des boues (oxydation par voie humide, incinération en cimenterie, pyrolyse) par rapport à des procédés plus conventionnels tels que l'épandage agricole, la mise en décharge ou l'incinération sur lit fluidisé pour une STEP de 300 000 équivalent habitants et sur la base de la tonne de MS de boue rejetée.

Cette étude ne s'est focalisée dans un premier temps que sur les consommations énergétiques et la production de gaz à effet de serre (figure 6).

L'épandage et l'incinération sur lit fluidisé sont les deux filières les moins impactantes sur l'utilisation

▼ Figure 6 – Balance détaillée des six scénarios de traitement des boues étudiés pour l'impact « réchauffement climatique » (Houillon et Jolliet, 2005).



d'énergie primaire non renouvelable en comparaison des autres filières étudiées. La consommation la plus importante est celle de l'oxydation par voie humide (OVH). La mise en décharge est le système de traitement le plus impactant sur l'effet de serre tandis que l'incinération en cimenterie est le moins impactant. L'incinération en cimenterie et sur lit fluidisé et l'OVH sont les plus efficaces au regard de l'effet de serre. L'épandage agricole est équivalent à la pyrolyse.

Les auteurs de cette étude concluent que d'un point de vue énergétique, l'incinération spécifique sur lit fluidisé et l'épandage agricole sont les procédés les plus attractifs. L'incinération a toutefois de meilleurs résultats que l'épandage agricole où la part importante d'éléments trace métalliques augmente l'impact environnemental de la filière.

#### ÉTUDE HOSPIDO ET AL. (2005)

Cette étude est centrée sur l'utilisation de l'analyse de cycle de vie pour comparer les performances environnementales potentielles de trois systèmes d'élimination des boues impliquant des processus biologiques (digestion anaérobie/épandage agricole) et des processus thermiques (incinération et pyrolyse). Trois scénarios ont donc été étudiés sur la base d'une tonne de MS de boue mixte épaissie, le dernier étant scindé en deux sous-scénarios :

– scénario 0 : boues mixtes épaissies – digestion anaérobie – déshydratation – épandage ;

– scénario 1 : boues mixtes épaissies – déshydratation – incinération ;

– scénario 2a : boues mixtes épaissies – déshydratation – séchage thermique – pyrolyse (réutilisation de gaz de synthèse) ;

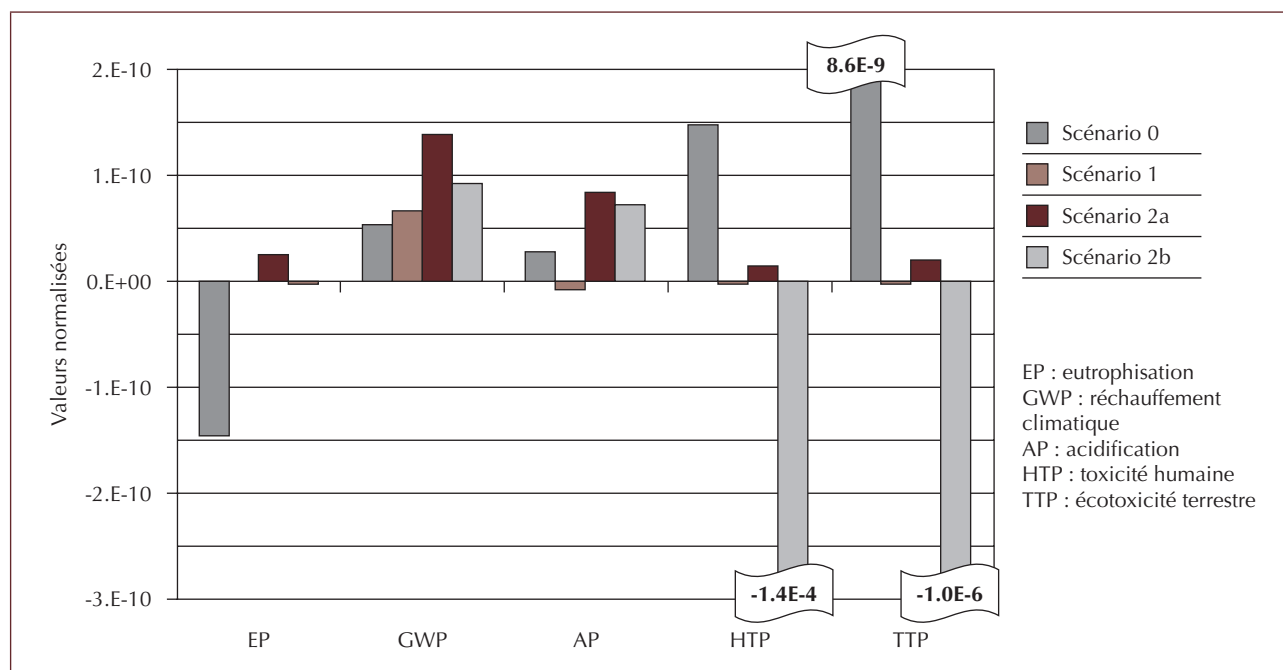
– scénario 2b : boues mixtes épaissies – déshydratation – séchage thermique – pyrolyse (réutilisation de toutes les fractions produites).

D'après les résultats obtenus (figure 7), le scénario 0 semble le moins impactant sur l'environnement excepté pour la toxicité humaine et terrestre (présence d'éléments traces métalliques dans les boues). Selon les auteurs, il n'y a pas de solution universelle au problème de la gestion des boues et sur sa durabilité à long terme. L'épandage agricole de boues digérées est une option acceptable pour l'élimination des boues à condition que des efforts soient portés sur la minimisation du contenu des boues en éléments trace métalliques dans le gâteau final.

#### Principales conclusions

La comparaison d'études environnementales basées sur la méthodologie ACV est souvent peu aisée du fait des divergences entre les principales

▼ Figure 7 – Résultats de normalisation par rapport à la situation en l'Europe de l'Ouest en 1995 pour chaque catégorie d'impact étudiée (Hospido *et al.*, 2005).



études réalisées (Ademe/Écobilan, 2006). En effet, pour être facilement comparables, les études ACV doivent présenter au minimum le même système étudié ainsi que les mêmes unités fonctionnelles. La comparaison des études ACV sur le traitement des boues d'épuration s'est donc avérée délicate d'un point de vue méthodologique puisque chaque étude recensée pour la synthèse était très spécifique, la méthode utilisée elle-même différait (règles d'allocation différentes, absence ou présence de processus de substitution...) et chaque résultat d'ACV dépendait fortement des unités fonctionnelles et des limites du système étudié (les études ACV sont des études *goal dependent*).

Enfin la difficulté de pouvoir comparer des études ACV était également liée au fait que les méthodes de caractérisation choisies différaient ainsi que les catégories d'impacts étudiées : les études prenaient en compte une seule ou plusieurs catégories d'impacts orientées « problème » ou « dommage ». Ainsi, très peu d'études (quatre seulement sur les huit études référencées) ont pu être comparées.

À la lecture de l'ensemble des références citées, on peut conclure que la mise en décharge des boues (officiellement interdite depuis 2002) n'est pas une bonne voie d'élimination d'un point de vue environnemental. L'incinération et l'oxydation thermique sont des bons moyens d'élimination des boues à condition que l'énergie et la chaleur puissent être récupérées et réutilisées dans le système. L'épandage agricole est également une bonne voie d'élimination des boues au regard de la plupart des catégories d'impact étudiées excepté pour l'écotoxicité terrestre et aquatique, du fait de la présence d'éléments trace métalliques dans les boues épandues et au regard des effets indirects liés à la substitution des engrais minéraux par les boues.

## Perspectives et attendus pour le projet de recherche ECODEFI

Soutenu par l'ANR<sup>9</sup> – programme « Écotecnologies et développement durable », le projet ECODEFI porte sur l'éco-conception appliquée aux technologies de l'épandage de boues de stations d'épurations.

9. Agence nationale de la recherche.

Le projet a pour objectif principal d'améliorer les performances environnementales des technologies d'épandage à l'aide de l'analyse de cycle de vie et de permettre l'éco-conception de ces technologies afin de répondre à quatre enjeux majeurs liés à quatre types d'acteurs :

- la réduction de l'impact environnemental des filières amont pour les producteurs de boues industrielles et domestiques,
- la réduction des apports d'engrais minéraux chimiques, coûteux en émissions de CO<sub>2</sub> pour les utilisateurs finaux,
- la construction de machines plus « propres » et respectueuses de l'environnement pour les fabricants de matériels d'épandage,
- la réduction à la source des risques de pollution dus aux pratiques agricoles, en réponse aux attentes sociétales.

Les résultats de l'étude sur l'état de l'art des impacts environnementaux des filières d'élimination des boues conforte le projet ECODEFI. Elle a montré l'intérêt environnemental de l'épandage agricole des boues d'épuration. L'objectif maintenant est d'améliorer les technologies existantes en éco-évaluant les machines d'épandage existantes et en éco-innovant afin de produire de nouvelles machines beaucoup plus respectueuses de l'environnement (meilleure répartition du produit épandu, ajustement plus précis de la dose à apporter et au plus près des besoins des cultures...), et c'est ce à quoi s'attachent les chercheurs et les industriels du projet ECODEFI. □

### Résumé

L'objectif de cet article est de présenter l'état de l'art des analyses de cycle de vie appliquées au traitement des boues d'épuration et de faire un bilan des impacts environnementaux en fonction des scénarios d'élimination des boues (épandage, incinération...). Cette étude est un pré-requis au programme de recherche ECODEFI (Écoconception et développement de méthodologies de fabrication innovante de machines d'épandage – programme ANR – 2007-2010) mené par le Cemagref dont l'un des objectifs est de mettre en place une méthodologie simplifiée d'analyse de cycle de vie appliquée aux épandages de boues résiduaires urbaines.

### Abstract

The goal of this paper is to present a state of the art of life cycle assessment of different sewage sludge treatment and to analyse the environmental impacts of different scenario of disposal and recycling routes of sewage sludge (landspreading, incineration...). This study is a pre-necessary to a research project called ECODEFI (Ecodesign and development of assessment methods for innovative spreading technologies– NRA program – 2007-2010) conducted by Cemagref whose aim is to build a LCA simplified methodology for sewage sludge landspreading.

### Bibliographie

- ADEME, 2001, *Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture*, Paris, ADEME Éditions.
- ADEME/ECOBILAN, 2006, *Bilan énergétique et émissions de GES des carburants et biocarburants conventionnels - Convergences entre les principales études reconnues*, Synthèse, ADEME Éditions, 18 p.
- AFNOR a, 2006, *Management Environnemental - Analyse du cycle de Vie - Principes et cadre*, Association française de normalisation, NF EN ISO 14040, 23 p.
- AFNOR b, 2006, *Management Environnemental - Analyse du cycle de Vie - Exigences et lignes directrices*, Association française de normalisation, NF EN ISO 14044, 49 p.
- ARTHUR ANDERSEN ENVIRONNEMENT, 1999, *Audit environnemental et économique des filières d'élimination des boues d'épuration urbaines - Pré-étude de définition, analyse environnementale*, Les Études de l'agence de l'eau n° 70, Paris, ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 153 p.
- ERIKSSON, O., FROSTELL, B. *et al.*, 2002, ORWARE - a simulation tool for waste management, *Resources, Conservation and Recycling*, 36 (4), p. 287-307.
- GOEDKOOP, M., SPRIENSMA, R., 2000, *The Eco-Indicator 99, a Damage Oriented Method for Life Cycle Assessment*, Pré Consultants, Amersfoort.
- GUINÉE, J.-B., GORRÉE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., DE KONING, A., VAN OERS, L., WEGENER SLEESWIJK, A., SUH, S., UDO DE HAES, H.-A., DE BRUIJN, H., VAN DUIN, R., HUIJBREGTS, M.-A.-J., 2001, *Life cycle assessment - An Operational Guide to the ISO Standards*, Leiden, The Netherlands, Centre of Environmental Science, Leiden University.
- HOSPIDO, A., MOREIRA, T. *et al.*, 2005, Environmental Evaluation of Different Treatment Processes for Sludge from Urban Wastewater Treatments : Anaerobic Digestion versus Thermal Processes, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(5), p. 336-345.

HOUILLON, G., JOLLIET, O., 2005, Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge : energy and global warming analysis, *Journal of Cleaner Production*, 13(3), p. 287-299.

JOHANSSON, K., PERZON, M. *et al.*, 2007, Sewage sludge handling with phosphorus utilization - life cycle assessment of four alternatives, *Journal of Cleaner Production*, in press, corrected proof.

JOLLIET, O., SAADE, M., CRETAAZ, P., 2005, *Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, Collection Gérer l'environnement n° 23, Presses Polytechniques et universitaires romandes.

LUNDIN, M., OLOFSSON, M. *et al.*, 2004, Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options, *Resources, Conservation and Recycling*, 41(4), p. 255-278.

JOLLIET, O., MÜLLER-WENK, R. *et al.*, 2004, The LCIA Midpoint-Damage Framework of the UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(6), p. 394-404.

RENOU, S., 2006, *Analyse de cycle de vie appliquée aux systèmes de traitement des eaux usées*, Ingénieur Génie des procédés et des produits, Institut national Polytechnique de Lorraine, 258 p.

STEEN, B., 1999, *A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS), Version 2000. General system characteristics*, CPM report n° 4, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems.

SUH, Y.-J., ROUSSEAU, P., 2002, An LCA of alternative wastewater sludge treatment scenarios, *Resources, Conservation and Recycling*, 35(3), p. 191-200.

SVANSTROM, M., FROLING, M. *et al.*, 2004, Environmental assessment of supercritical water oxidation of sewage sludge, *Resources, Conservation and Recycling*, 41(4), p. 321-338.

TIDAKER, P., KARRMAN, E. *et al.*, 2006, Wastewater management integrated with farming - an environmental systems analysis of a Swedish country town, *Resources, Conservation and Recycling*, 47(4), p. 295-315.

VANDEBOSSCHE, H., THOMAS, J.-S. *et al.*, 2005, Impact environnemental du traitement des eaux usées et de la dévolution des boues, *Techniques sciences méthodes, génie urbain génie rural*, n° 11, p. 57-66.