

Fin de vie des boues de STEU : Création d'un Module d'ACV simplifié « Epannage »



15 octobre 2012

Rapport Technique Interne RTI-06

Eva RISCH
Marilys PRADEL
Catherine BOUTIN
Philippe ROUX



L'objet du présent rapport concerne les scénarios de fin de vie des boues de stations d'épuration Françaises, dont la majorité est épanchée à des fins de valorisation agricole. Un module ACV d'épannage y est proposé, et les hypothèses retenues pour sa modélisation sous SimaPro y sont détaillées. Ce module ACV sera intégré au Modèle ACV d'une filière de traitement des eaux usées afin d'en renseigner le devenir des boues co-produites lors de l'épuration.

Confidentiel

Commanditaire de l'étude :

55 Chemin Mas ma Tour
34790 Grabels
Tél. 04 67 10 76 76

**Avertissement, concernant les RAPPORTS TECHNIQUES INTERNES (RTI)**

Ce Rapport Technique a été rédigé dans le cadre de la convention ONEMA-Cemagref 2010. Il s'agit d'un rapport INTERNE au projet dont l'objet est de formaliser l'avancement des travaux sur une période donnée ainsi que de fournir une traçabilité minimale des hypothèses retenues à la date de sa diffusion. Ce type de rapport a donc par définition un caractère NON FINALISE et CHRONOLOGIQUE avec pour objectif de partager l'information ainsi que les résultats intermédiaires entre les partenaires du projet au fil du déroulement de celui-ci. Par exemple dans ce type de document il est possible de faire des hypothèses empiriques dans l'attente de l'avancement de certains autres travaux engagés dans le projet (celles-ci devront être clairement identifiées comme telles). Ces hypothèses pourront (devront) bien évidemment être révisées lorsque des informations ou des données auront été validées dans les autres tâches ou par d'autres travaux scientifiques. Ce type de rapport est en quelque sorte la « photographie » de l'état d'avancement de la réflexion et des connaissances disponibles à l'instant « t » du projet.

Les résultats présentés dans le présent rapport ne sauraient en aucune manière être utilisés tels quels à des fins scientifiques ou commerciales quelles qu'elles soient sans l'accord écrit du Cemagref. Dans tous les cas, l'utilisation de ces résultats est faite sous l'entière responsabilité de l'utilisateur et ne peuvent en aucune manière engager la responsabilité du Cemagref.



Environmental Lifecycle and Sustainability Assessment

| RAPPORT TECHNIQUE INTERNE | | RTI-06 v03 |
|--|--|------------|
| Date de création du rapport : | 02 Mars 2011 | |
| TITRE | Fin de vie des boues de STEU | |
| Sous titre | Création d'un Module ACV « Epannage » | |
| Période de travail concernée : | Février 2010 à Avril 2011 | |
| Résumé | Description de l'inventaire d'émissions/ressources utilisées pour la filière d'épandage de boues de STEU. Modélisation sous SimaPRO des différents scénarios proposés. | |
| Rapports précédents en lien direct avec le sujet | ➤ RTI 04 | |

Sommaire

| | |
|--|----|
| AVANT PROPOS | 4 |
| 1. PREAMBULE..... | 4 |
| 2. DESCRIPTION DES FILIERES DE TRAITEMENT DES BOUES D'EPURATION..... | 5 |
| 3. PANORAMA DES OPTIONS POTENTIELLES DE FIN DE VIE DES BOUES | 8 |
| 4. ANALYSE DES HYPOTHESES ACV LIEES A L'EPANDAGE | 9 |
| 4.1. IDENTIFICATION DES HYPOTHESES POTENTIELLES..... | 9 |
| 4.2. HYPOTHESES RETENUES POUR LES ETUDES ONEMA EN COURS..... | 13 |
| 5. EMISSIONS (N,P) POUR DIFFERENTS TYPES DE BOUES D'EPURATION..... | 17 |
| 5.1. TYPOLOGIE DES BOUES D'EPURATION CONSIDEREES | 17 |
| 5.2. CONDITIONNEMENT DES BOUES D'EPURATION | 18 |
| 5.3. CALCUL DES EMISSIONS LORS DE L'EPANDAGE – MODELE ECOINVENT (DOKA, 2007) | 19 |
| 5.4. CALCUL DES EMISSIONS LORS DE L'EPANDAGE – MODELE ECODEFI (PRADEL, 2010) | 21 |
| 6. EVALUATION DE SCENARIOS D'EMISSIONS..... | 21 |
| 6.1. MODELE ECOINVENT | 21 |
| 6.2. MODELE ECODEFI | 23 |
| 7. EVALUATION DES IMPACTS (LCIA)..... | 25 |
| 7.1. METHODE DE CALCUL UTILISEE : RECIPE MID/ENDPOINT METHOD, VERSION JAN. 2010..... | 25 |
| 7.2. ANALYSE DES RESULTATS SUR LES EMISSIONS (N,P)..... | 27 |
| 7.3. AUTRES EMISSIONS – ETM, CTO, REACTIFS DE CONDITIONNEMENT, ETC. | 34 |
| 8. CONCLUSION, PERSPECTIVES | 35 |
| 9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 36 |
| 10. LEXIQUE, VOCABULAIRE SPECIFIQUE | 36 |
| 11. ANNEXES..... | 37 |

Avant Propos

Cette étude se donne l'objet de réaliser l'inventaire des impacts environnementaux (LCI) survenant lors de la fin de vie des boues issues de stations d'épuration d'eaux usées (STEU). Ces données seront ensuite exploitées pour définir une série de scénarios adaptés aux types de boues rencontrés et à la fin de vie choisie de ces boues. Cela permettra de compléter l'étude ACV d'une STEU en renseignant le devenir des boues produites par celle-ci.

1. Préambule

Jusqu'en 1997, le devenir des boues en France était réparti comme suivant (OTV 1997) :

- 60% en valorisation agricole (soit en épandage direct, soit en compostage)
- 20 à 25% en décharge
- 15 à 20% en oxydation thermique (incinération)

Mais depuis la nouvelle législation sur les déchets entrée en vigueur en 2002, les décharges sont transformées en centres de stockage où l'admission des boues se fait plus restreinte. Ceci a pour but de favoriser la valorisation agricole ou l'oxydation thermique suivie d'une valorisation ou d'un stockage des sous produits. En France, les surfaces concernées par l'épandage représentent une infime partie de la surface agricole utile. Si on se base sur un apport moyen de 2.5 tMS/ha/an, l'épandage mobilise 216 000 ha sur 30 millions d'hectares de terrains cultivés en métropole, soit moins de 1%. On observe des taux différents de valorisation agricole des boues résiduelles selon les bassins versants français, tels que relevés par les Agences de l'Eau. Cela est vraisemblablement dû à une gestion différente par bassin, mais aussi à une variabilité des données collectées au niveau de chaque SATESE (Enquêtes Cemagref par Reverdy et Pradel, 2010). Le parc français est composé à 85% de STEU de moins de 5000 EH situées en milieu rural, ce qui fait de l'épandage une solution réaliste du fait de la proximité de terres agricoles.

Le Tableau 1 présente les filières d'élimination des boues en France et en Suisse à partir de données générales assez récentes. Dans le rapport Ecoinvent¹, Doka (2007) évalue une distribution des options de fin de vie des boues en 2000 à partir de données de 1994 extrapolées. Celles-ci sont représentées au Tableau 2.

Tableau 1. Evolution des filières d'élimination des boues en France et en Suisse (% de tonnage MS)

| | Source | Année | Epandage Agricole | Décharge | Incinération |
|--------|---------------------------------------|-------|-------------------|----------|--------------|
| France | ADEME 2000 | 2000 | 60% | 25% | 15% |
| | APCA (Enquête Cemagref ²) | 2007 | 70% (*) | 12% | 18% |
| Suisse | BUWAL ³ | 2000 | 38.6% | 2.4% | 59% |

(*) dont 46% en épandage direct et 23% après compostage préalable

¹ Doka, 2007- Ecoinvent report No.13 – part IV – Wastewater Treatment, pp. 37-38

² Cité dans Reverdy et Pradel, 2010 – Partie 2 : Etat de la production des boues en France. p. 18.

³ Cité dans Doka, 2007

Tableau 2. Estimation des filières des boues digérées pour différentes classes de capacité de STEU en 2000 (% de tonnage MS) (Doka, 2007)

| Source | Classe de capacité (*) | Epandage Agricole | Décharge | Incinération |
|--|------------------------|-------------------|----------|--------------|
| Zimmermann et al., 1996 et BUWAL ⁴ : Extrapolation en 2000 à partir de données 1994 | 1 | 28% | 0% | 71,70% |
| | 2 | 38,67% | 0% | 61,30% |
| | 3 | 46,86% | 0% | 53,10% |
| | 4 | 71,40% | 0% | 28,60% |
| | 5 | 70,65% | 0% | 29,30% |
| Teneur en eau, %massique | | 93,30% | 92% | 63% |

(*) Les STEU sont regroupées en classes de capacité, en Equivalent-Habitants (EH), traduisant la capacité de traitement annuelle des effluents d'un certain nombre d'EH.

Classe 1 : + de 100 000 EH/an; Classe 2 : de 100 000 à 50 000 EH/an ; Classe 3 : de 50 000 à 10 000 EH/an ; Classe 4 : de 10 000 à 2000 EH/an ; Classe 5 : de 2000 à 30 EH/an.

On remarque que les données retenues par (Doka, 2007) pour les STEU de Classe 4 (5320 EH) sont proches des chiffres de l'enquête Cemagref, pour ce qui concerne l'épandage (~70%) ceci est attendu avec un parc français de STEU dominé par des stations de moins de 5000 EH.

Nous proposons de retenir pour la suite des études les valeurs suivantes:

- **70% de valorisation agricole** des boues d'épuration dont :
 - 46% sont épandues directement,
 - 23% compostées⁵
- **10% de mise en décharge,**
- **20% d'incinération.**

2. Description des filières de traitement des boues d'épuration

Les boues d'épuration constituent des résidus du traitement des eaux usées, et sont de composition et de valeur agronomique variables dépendant de plusieurs paramètres dont :

⁴ Cité dans Doka, 2007: Ecoinvent report No.13 – part IV – Wastewater Treatment, p37

⁵ Dans l'attente de la finalisation du module de Compostage, on considèrera 70% de valorisation agricole par épandage direct, les boues types définies dans la suite de ce document (Chap. 5, 5.1 Typologie des boues d'épuration considérées) et utilisées pour les modélisations sous SimaPro n'ayant pas besoin d'être compostées au préalable.

- la composition et la nature (domestique ou industrielle) des effluents entrants dans la station d'épuration,
- le type de traitement de la filière eau.

Les boues issues de la filière de traitement des eaux sont à la base liquides, et peuvent être éliminées directement (notamment pour les STEU de faible capacité), ou suivre les différentes phases de traitement des boues décrites dans la suite.

On distingue **trois phases principales** dans le traitement des boues :

- i. La **réduction de la teneur en eau** des boues, visant à diminuer la quantité de boues à stocker et à épandre, ou améliorer leurs caractéristiques physiques (tenue en tas notamment).
- ii. La **stabilisation**, dont l'objectif est de réduire la fermentescibilité des boues afin de générer le moins d'odeurs possibles;
- iii. L'**hygiénisation** vise à éradiquer la charge en micro-organismes pathogènes des boues d'épuration, et limiter ainsi les risques sanitaires pour une utilisation sur les sols agricoles. Elle n'est mise en œuvre que dans des contextes particuliers.

Les procédés mis en jeu pour la phase **(i)** de réduction de la teneur en eau sont l'épaississement, la déshydratation, et le séchage. Les boues peuvent être conditionnées au préalable avant cette phase, de manière à favoriser la séparation liquide-solide.

Le conditionnement peut être de type :

- Chimique : floculants⁶ organiques de synthèse (ou polyélectrolytes), ou minéraux (chaux, sels de fer ou d'aluminium).
- Thermique⁷ : par montée en température (150 – 220°C) pendant un certain temps.

Pour les phases **(ii)** et **(iii)**, les procédés de stabilisation et d'hygiénisation incluent la digestion aérobie ou anaérobie, le compostage, le chaulage et le séchage.

Le chaulage et le compostage modifient profondément la vocation fertilisante des boues :

- les boues chaulées sont utilisées comme **amendement basiques** sur les sols trop acides,
- dans le compostage, les boues sont généralement mélangées à un substrat (paille, sciure, écorces, déchets verts,...), qui leur donne les propriétés d'un **amendement organique**.

⁶ Floculant : substance qui a la propriété de flocculer, c'est-à-dire d'agréger sous forme de flocons, des particules de colloïdes en suspension dans un solvant.

⁷ Technique encore peu répandue en France du fait de 3 inconvénients principaux, notamment la nécessité d'un système de traitement des odeurs, d'un problème de séchage des boues dans les canalisations, et de la formation de retours en tête de station chargés.

En dehors des aspects stockage/déstockage du carbone, ces aspects d'amendement ne peuvent pas être pris en compte avec les indicateurs classiques d'ACV (il faudrait créer un indicateur du type « fertilité » des sols, prenant en compte les matières humiques apportées par les boues).

Les principaux types de boues proposés au recyclage en agriculture sont les suivants :

- boues liquides issues de traitements aérobies,
- boues pâteuses issues de traitements aérobies ou anaérobies,
- boues chaulées, pâteuses ou solides,
- boues compostées,
- boues physico-chimiques (très souvent il s'agit aussi de boues chaulées),
- boues de lits de séchage,
- boues de lagunage (catégorie particulière de boues liquides ; le traitement de ces boues se fait de façon extensive, selon un mode anaérobie, au fond des bassins).

On peut regrouper ces types de boues par groupes de concentration en matière sèche (MS) ou siccité homogènes (Figure 1 et Figure 2) d'après Reverdy et Pradel, 2010:

- Boues liquides : 1 à 10% de siccité
- Boues pâteuses : 10 à 30% de siccité
- Boues solides : 30 à 90% de siccité
- Boues sèches : Plus de 90% de siccité

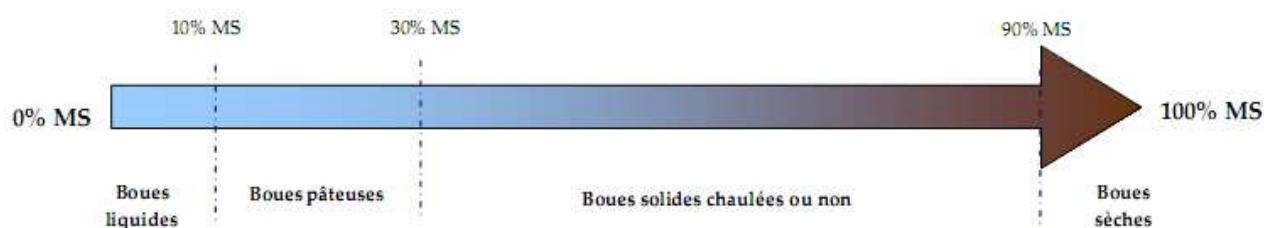


Figure 1. Evolution de la siccité des boues (Reverdy et Pradel, 2010)



Figure 2 : Exemples de boues de STEU (Source ADEME)

3. Panorama des options potentielles de fin de vie des boues

Il existe plusieurs options de fin de vie des boues issues des stations d'épuration.

1. **Épandage**, pouvant avoir deux objectifs assurés ou non:
 - a. Valorisation agronomique d'un déchet,
 - b. Épandage d'un déchet sans objectif de valorisation agronomique recherchée (par exemple sur des jachères, des taillis, en forêt⁸, etc..).

2. Compostage et valorisation agronomique

La phase de compostage est spécifique, la phase d'épandage des boues compostées nous ramène à l'option 1 (épandage) mais avec un contenu en matière organique supérieur.

3. Incinération

4. Mise en décharge

Dans la mesure où il s'agit de la pratique la plus courante, nous nous intéresserons ici plus spécifiquement à l'**épandage de boues** (solides chaulées, compostées) des filières de STEU considérées :

⁸ Suivant les législations en vigueur dans chaque pays, ces pratiques sont autorisées ou pas.

- Filière Filtres Plantés de roseaux (FPR),
- Filière « Boues Activées » (BA), conditionnement des boues par rhizocompostage (lits de séchage de roseaux, analogues aux FPR),
- Filière « Boues Activées », conditionnement physico-chimique.

NB. Rappel : Il est important de préciser qu'il s'agit de renseigner les impacts liés à la fin de vie des boues, afin de compléter l'étude ACV d'une STEU. Pour une étude ACV de STEU, se référer aux rapports ONEMA (**acv02_onema** pour la filière Boues Activées et **acv03_onema** pour la filière Filtres plantés de roseaux à flux verticaux). L'unité fonctionnelle retenue y est le kg de DBO5 traité par la STEU.

4. Analyse des hypothèses ACV liées à l'épandage

4.1. Identification des hypothèses potentielles

Ces hypothèses sont présentées aux Tableau 3 et Tableau 4 selon l'objectif d'épandage avec ou sans valorisation agronomique.

Tableau 3. Epandage d'un déchet avec valorisation agronomique : hypothèses d'ACV proposées

| OBJET | Impacts évités / à considérer | |
|--|--|---|
| | Hypothèses ACV en première approximation | Points à approfondir (travaux ultérieurs, stages ...) |
| 1. Emissions sur les lieux de stockage intermédiaires et pendant la phase logistique | ➤ Non pris en compte | A approfondir ultérieurement |
| 2. Substitution (impact évité) concernant les doses d'engrais évitées N,P (estimation des apports N,P des boues) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Prise en compte de l'Extraction, Fabrication et Transport à partir d'un centre d'approvisionnement « regional storage » d'engrais minéraux de base évités ➤ Pas de passages d'engins agricoles évités dans la mesure où l'apport de boue ne se substitue pas totalement à une fertilisation classique⁹ (il y aura donc un épandage pour une fertilisation minérale complémentaire) | A approfondir avec le Cemagref Montoldre : Evaluation de différentes options d'engrais minéraux de substitution (selon types de cultures, de terres...) |
| 3. Transport des boues | ➤ Pris en compte sur la base d'une distance de transport moyenne de 35km aller (+ retour à vide) | |
| 4. Apport de matières humiques au SOL (amendement) C _{org} , N _{org} | ➤ Non pris en compte du fait de l'absence d'indicateur de type « fertilité » des sols en ACV | |

⁹ La dose de boue apportée par hectare est calculée suivant la valeur d'usage agronomique ou les éventuelles limitations réglementaires quant aux substances contenues cette boue (ETM, CTO, etc.). Pour faire cette vérification, il est nécessaire d'évaluer les besoins agronomiques en N,P,K ainsi que les limites réglementaires d'épandage concernant les substances éventuellement présentes dans les boues telles que les métaux lourds. Cette vérification permet de définir quelle est l'élément limitant et ainsi de calculer la dose épandue par hectare. Notons que le Cemagref de Rennes a développé un outil d'aide à l'évaluation de la valeur d'usage des matières fertilisantes ELPremium. Celui-ci identifie le 'Premier Élément Limitant' parmi ceux qui sont mis en jeu et il calcule la dose moyenne annuelle d'utilisation correspondante, ainsi que la période de retour optimum des épandages sur la parcelle considérée.

| | | |
|--|---|---|
| 5. Stockage/déstockage carbone | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Carbone contenu dans les boues considéré à 100% comme biogénique car issu d'un métabolisme microbiologique | Vérifier si des substances contenues dans les eaux usées (lessives, produits ménagers ...) ne contiendraient pas une part significative de carbone fossile. |
| 6. Emissions au champ – N ₂ O, NH ₃ , nitrates, phosphates ... | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Option A. Pour une même dose (N,P) apportée, les émissions d'une boue sont considérées comme identiques aux émissions liées aux engrais minéraux évités: <ul style="list-style-type: none"> ○ i.e. pas d'émissions de NO₃, PO₄, N₂O et NH₃ | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Option B. Substitution Emissions (boues) aux Emissions (fertilisants minéraux) : Emissions = [Emissions boues calculées¹⁰] – [Emissions fertilisants minéraux évités] |
| 7. ETM | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Impérativement à prendre en compte si présence quantifiée dans les boues | Stage en cours sur le sujet (2011) |
| 8. CTO | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Pas de prise en compte ou prise en compte partielle pour de nombreux CTO (dans la mesure où la plupart des CTO ne sont pas caractérisés en ACV) | Stage en cours sur le sujet (2011) |

¹⁰ Emissions calculées par acv3E, logiciel d'ACV simplifié issu du projet ECODEFI (Pradel et al, 2010)

Tableau 4. Epandage d'un déchet sans valorisation agronomique recherchée : hypothèses d'ACV proposées

| OBJET | Impacts évités / à considérer | |
|--|---|--|
| | Hypothèses ACV en première approximation | Points à approfondir (travaux ultérieurs, stages ...) |
| 1. Emissions sur les lieux de stockage intermédiaires et pendant la phase logistique | ➤ Non pris en compte | A approfondir ultérieurement |
| 2. Substitution (impact évité) concernant les doses d'engrais évitées N,P (estimation des apports N,P des boues) | ➤ Pas de substitution | |
| 3. Transport des boues | ➤ Pris en compte sur la base d'une distance de transport moyenne de 35km aller (+ retour à vide) | |
| 4. Apport de matières humiques au SOL (amendement) Corg, Norg | ➤ Non pris en compte du fait de l'absence d'indicateur de type « fertilité » des sols en ACV | |
| 5. Stockage/déstockage carbone | ➤ Carbone contenu dans les boues considéré à 100% comme biogénique car issu d'un métabolisme microbiologique | Vérifier si des substances contenues dans les eaux usées (lessives, produits ménagers ...) ne contiendraient pas une part significative de carbone fossile |
| 6. Emissions au champ – N ₂ O, NH ₃ , nitrates, phosphates | ➤ Option C. 100% des émissions au champ (N, P) dues aux boues prises en compte | |
| 7. ETM | ➤ Impérativement à prendre en compte si présence quantifiée dans les boues | Stage en cours sur le sujet (2011) |
| 8. CTO | ➤ Pas de prise en compte ou prise en compte partielle pour de nombreux CTO (dans la mesure où la plupart des CTO ne sont pas caractérisés en ACV) | Stage en cours sur le sujet (2011) |

4.2. Hypothèses retenues pour les études ONEMA en cours

Les Options A et B concernent les cas d'épandage de boues d'épuration avec valorisation agronomique attendue. Dans ces cas, les boues sont considérées comme produits valorisables, et non comme déchets.

L'Option A suppose que les émissions dues à l'épandage de boues d'épuration sont comparables, pour une même dose (N,P) apportée, à celles d'une fertilisation minérale. Elles sont donc considérées comme nulles (identiques à celles obtenues lors de fertilisation par les engrais minéraux utilisés habituellement). Dans l'Option A, si des scénarios sont retenus c'est pour l'aspect utilisation de machines agricoles, relatif à la dose de boue épandue par hectare.

Avec l'Option B, les émissions dues à l'épandage de boues d'épuration sont supposées, pour une même dose (N,P) apportée, significativement différentes d'avec une fertilisation minérale. Ces différences au niveau des émissions au champ peuvent s'expliquer par la disponibilité relative (et les formes chimiques) des éléments azotés apportés¹¹, ainsi que par une technique d'incorporation différente selon l'état physique (boue liquide, solide, pâteuse, ou engrais sous forme de granulés, etc..).

Ces émissions sont calculées par des modèles d'émissions au champ, dont les résultats de simulation pour certains scénarios ont été exploités dans le cadre du projet Ecodefi (ANR PRECODD¹²), ou ceux qui sont retenus dans la base de données Ecoinvent.

Dans ce cas, on calcule la différence résultante :

Emissions = [Emissions, boues calculées par modèle] – [Emissions, engrais minéraux substitués]

Pour l'Option C, il est clair que l'épandage est réalisé sans valorisation agronomique attendue, sur des terres en jachères, où la fertilisation minérale n'est pas demandée. Les boues sont alors considérées comme un déchet pouvant être accepté jusqu'à une certaine dose selon les teneurs en éléments traces métalliques. Il n'y aura donc pas de substitution d'engrais minéraux.

Dans ce cas, les émissions liées à l'épandage de boues d'épuration sont allouées en totalité aux boues, du fait de l'absence d'engrais minéraux substitués.

Quelques notions sur les formes azotées rencontrées dans les boues et engrais :

- Azote des Boues

La disponibilité de l'azote des boues dépend de plusieurs paramètres physico-chimiques des boues : richesse en azote, forme d'azote, rapport C/N, stabilité de l'azote organique. Ensuite la disponibilité réelle de l'azote (efficacité) va dépendre pour une part non négligeable, des conditions d'utilisation des boues : contexte pédo-climatique, système de culture et conditions d'épandage. Ces paramètres conditionnent les fournitures en azote des boues aux cultures mais aussi les risques de pertes : volatilisation, dénitrification, lixiviation. Pour plus de détails sur l'estimation de la valeur azotée des boues, se référer à (Grimaud, L. 1996).

¹¹ Les formes à dominante nitrrique sont en général plus efficaces et d'action rapide (mais aux importants risques de lessivages car non retenues dans le sol) que les formes ammoniacales (très peu assimilées par les plantes) ou uréiques (non assimilées directement par la plante)

¹² Programme ANR Ecotechnologies et Développement Durable (PRECODD)

Dans les boues liquides, l'azote est souvent présent sous forme minérale (nitrate ou ammonium) directement assimilable par les plantes. Dans les boues pâteuses, solides ou sèches, l'azote contenu dans les matières en suspension est essentiellement organique : la fraction disponible est donc plus faible et la minéralisation plus lente (OTV, 1997).

- Azote des Engrais Minéraux

Les engrais azotés simples couramment utilisés (ammonitrate, solution azotée, urée) en grandes cultures n'ont pas tous la même composition chimique (nitrique, ammoniacale ou uréique) et/ou présentation physique (liquide, solide). Les différentes formes azotées se retrouvant dans les engrais simples habituellement utilisés sont présentées au Tableau 5. De ces différences résultent des écarts d'efficacité agronomique.

Tableau 5. Formes azotées des engrais simples

| Engrais | Ammonitrate | Solution azotée | Urée |
|---|--------------------|------------------------|-------------|
| Forme de l'azote | | | |
| <i>Nitrique (NO₃⁻)</i> | 50% | 25% | |
| <i>Ammoniacale (NH₄⁺)</i> | 50% | 25% | |
| <i>Uréique (CO(NH₂)₂)</i> | | 50% | 100% |

Dans les ACV réalisées dans le cadre du projet ONEMA, les Options A ou C pourront être considérées. L'Option C est la plus conservatrice puisque aucune substitution d'engrais évité n'est prise en compte. L'Option B nécessite la finalisation d'un modèle de Fertilisation Minérale, qui pourra faire l'objet d'un stage ou d'un livrable, les émissions dues à ces fertilisants minéraux restant à être déterminées¹³.

Le Tableau 6 propose une synthèse des hypothèses retenues pour la présente étude.

¹³Le rapport N°15 ecoinvent (pp. 29-36) (Nemecek et al, 2007) fait état des modèles SALCA-N, SALCA-P, IULIA (N₂O), qui sont utilisés pour calculer les émissions au champ lors d'une fertilisation minérale spécifique à l'engrais choisi, ainsi que le type de culture et la période de culture.

Tableau 6. Synthèse des hypothèses ACV

| | Utilisation machines pour l'épandage de la boue | Substitution d'engrais minéraux (Emissions dues au process de fabrication) | Apport de matière organique aux sols | Prise en compte des émissions totales au champ: $E_{total} = EB - EM$ | |
|---|---|--|--------------------------------------|--|---|
| | | | | Emissions Boues (EB) | Emissions évitées Engrais Minéraux (EM) |
| Option A | | | | | |
| Emissions lors de l'épandage de boues d'épuration comparables à celles d'une fertilisation minérale | Oui | Oui (1) | Non | bilan nul (Hyp. EB = EM) i.e. $E_{total} = 0$ | |
| Option B | | | | | |
| Emissions lors de l'épandage de boues d'épuration significativement différentes d'avec une fertilisation minérale (pour le même apport N,P) | Oui | Oui | Non | Oui | Oui (2) |
| Option C | | | | | |
| Emissions uniquement dues aux boues: Epandage d'un « déchet » sans valorisation agronomique "voulue" | Oui | Non | Non | Oui | N/A |

(1) L'analyse comparative d'un épandage de boues d'épuration "déchets agronomiques" et d'une fertilisation minérale doit tenir compte des ressources utilisées par le process de fabrication des engrais minéraux.

- (2) Les modèles utilisés pour le calcul des émissions d'engrais minéraux doivent être intégrés ultérieurement dans un module "Fertilisation Minérale" afin de pouvoir faire la comparaison Epandage vs Fertilisation.

5. Emissions (N,P) pour différents types de boues d'épuration

5.1. Typologie des boues d'épuration considérées La désignation des boues suivante (B01, B02 et B03) reprend celle définie dans le rapport ECODEFI par (Pradel et al, 2010).

B02 : Solide chaulée, 34%MS. Correspond à une boue de STEU filière BA ayant subi un conditionnement physico-chimique.

B03 : Compostée, 64%MS. Correspond à une boue de STEU filière FPR extraite lors d'un curage des filtres remplis. Correspond aussi à une boue de STEU filière BA ayant subi un rhizocompostage. Bien que les boues extraites des lits de roseaux aient une siccité de 25% en MS généralement, elles se comportent comme des boues compostées (et donc non chaulées)¹⁴ mais n'ont cependant pas le même amendement organique (apport d'humus).

Les boues liquides (B01) ne sont pas modélisées dans la suite de cette étude. En effet, pour les filières de STEU considérées (FPR et BA+rhizocompostage ou BA+conditionnement physico-chimique), les boues ne sont pas liquides. De plus, il faut un épandage spécifique pour ces dernières. Les caractéristiques des boues épandues définies dans le projet Ecodefi sont données en **Annexe I** de ce document.

Teneur en éléments nutritifs primaires des boues et engrais substitués

Un premier choix d'engrais minéraux couramment rencontrés pour les cultures françaises parmi ceux existant dans la base ecoinvent¹⁵ a été fait. Il faut néanmoins faire valider ce choix par des experts en agriculture/épandage, pour s'assurer de la bonne représentativité de ces engrais. En effet, le choix des engrais va dépendre du type de cultures souhaitées, les plants ayant des besoins agronomiques différents. Il faudrait également réaliser une enquête sur les engrais les plus communément utilisés ces dernières années par les agriculteurs Français.

Le Tableau 7 propose de prendre comme premières bases de calcul, les engrais minéraux suivants, tels que proposés dans la base de données ecoinvent :

Tableau 7. Composition en éléments nutritifs primaires des engrais minéraux sélectionnés (Nemecek et al, 2007)

| Engrais | Désignation | Description | Composition |
|------------------|--|--|-----------------------------------|
| Monoélément N | ammonium nitrate, as N, at regional storehouse | Nitrate d'ammonium, produit à partir d'ammoniac et d'acide nitrique | 35% N |
| Monoélément P | triple superphosphate, as P ₂ O ₅ , at regional storehouse | superphosphate triple, produit à partir d'acide phosphorique (70%) et de roche (30%) | 48% P ₂ O ₅ |

¹⁴ Communication personnelle avec Marilyns Pradel, Cemagref Montoldre, 2 Décembre 2010

¹⁵ Ecoinvent report No.15a, pp. 66-88

| | | | |
|------------------|---|---|----------------------|
| Monoélément K | potassium sulphate, as K ₂ O, at regional storehouse | sulphate de potassium, produit par réaction de chlorure de potassium avec de l'acide sulphurique ou des composés sulfatés | 50% K ₂ O |
|------------------|---|---|----------------------|

D'après les compositions des boues établies dans le projet Ecodefi par (Pradel, 2010) données en **Annexe I**, on peut remonter à l'apport « théorique » d'une boue épandue en élément(s) nutritif(s) d'intérêt.

Ces quantités sont exprimées en kg de MS épandue et sont définies au Tableau 8. La quantité d'engrais substituée pour chaque élément nutritif apporté par la boue épandue est déterminée pour les engrais sélectionnés (aux teneurs en éléments nutritifs primaires précisées au Tableau 7).

Tableau 8. Apports des boues en éléments nutritifs primaires et engrais substitués

| Ref. boues | Type de boues | Elément apporté | Proportion kg élément/kg MS | Quantité d'engrais substituée (kg/T MS) |
|------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|
| B03 | Compostée, 64%MS | N | 2,18% | 62,29 |
| | | P ₂ O ₅ | 1,81% | 37,71 |
| | | K ₂ O | 1,22% | 24,40 |
| B02 | Solide chaulée, 34%MS | N | 2,89% | 82,63 |
| | | P ₂ O ₅ | 2,50% | 52,17 |
| | | K ₂ O | 0,28% | 5,64 |
| B01 (*) | Liquide, 6% MS | N | 6,60% | 188,51 |
| | | P ₂ O ₅ | 7,11% | 148,21 |
| | | K ₂ O | 0,79% | 15,76 |

(*) Non utilisée dans cette étude. Cette boue figure dans ce tableau à titre d'information.

5.2. Conditionnement des boues d'épuration

Dans cette étude, le conditionnement des boues d'épuration proposé peut être de type **physique**, avec la filière de rhizocompostage (sur lits de séchage plantés de roseaux). Dans le cas de la STEU de 5200 EH, il y aura pré-épaississement statique des boues. Ces filières de conditionnement sont schématisées à la Figure 3.

L'autre variante de conditionnement des boues est de type **physico-chimique** :

1. Epaissement sur grille d'égouttage avec floculation préliminaire (polymères)
2. Coagulation, par ajout d'une solution de chlorure de Fer (FeCl_3)
3. Floculation, par ajout de chaux ou de polymères floculants
4. Déshydratation sur filtre presse

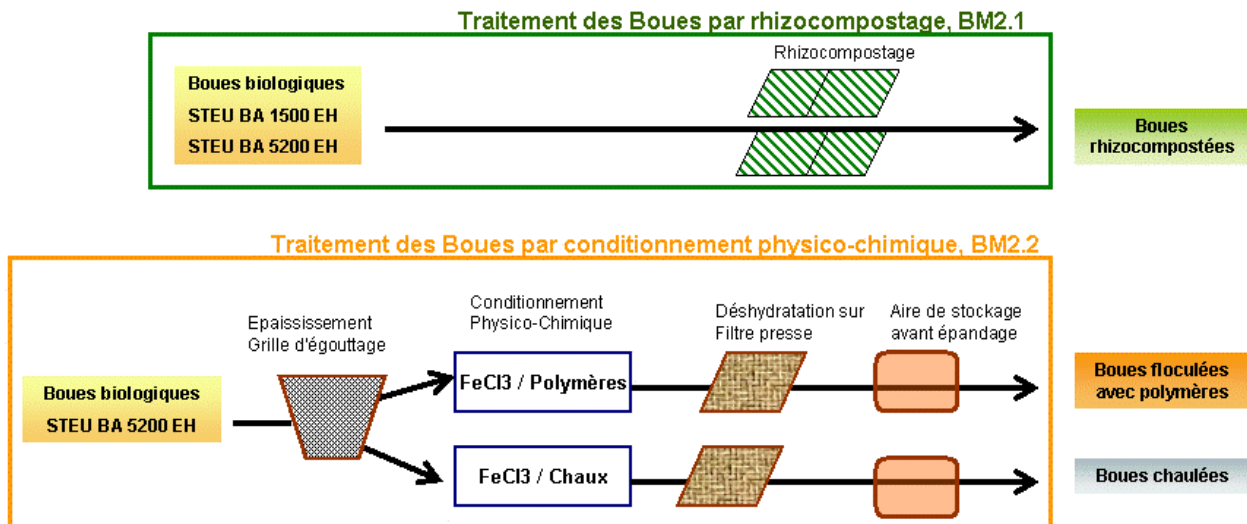


Figure 3. Filières de conditionnement des boues modélisées

Les quantités de réactifs utilisées pour le conditionnement des boues issues de la filière « Boues Activées » dont le traitement des boues se fait par voie physico-chimique sont renseignées dans l'inventaire (LCI) de la STEU¹⁶. Ainsi, l'inventaire LCI du module Epandage ne prend pas en compte ces réactifs. La filière de traitement de boues par rhizocompostage ne nécessite pas de chaulage, les boues curées étant de siccité suffisante (~25% de MS).

5.3. Calcul des émissions lors de l'épandage – Modèle ecoinvent (Doka, 2007)

L'épandage de boues dans ecoinvent comporte :

- Un aspect machine pour l'utilisation de matériel agricole au champ qui est représenté par le procédé « Slurry spreading, by vacuum tanker », comprenant la consommation de carburant, l'usage des machines, les émissions dues à l'usure des pneus.
- Un aspect émissions, par le process « to soil, agricultural » dont les sorties sur l'écosphère (coefficients de transfert) sont définies pour les composés azotés et phosphorés présents dans la boue à épandre¹⁷ rejoignant les compartiments Air et Eau.

Voir le Tableau 9 pour les composés azotés et le Tableau 10 pour les composés phosphorés.

Ces coefficients de transfert s'appliquent aux quantités totales en N et P de la boue épandue.

¹⁶ Voir rapport document acv02_onema : Modèle ACV – Filière de traitement des eaux usées par par Boues Activées (BA) - Rapports d'ACV et données d'inventaire

¹⁷ Coefficients de transfert, voir Ecoinvent report No.13 – part IV- Wastewater Treatment, pp. 42-43

Tableau 9. Coefficients de transfert des composés azotés à l'épandage de boues (Doka, 2007)

| Substance | Compartiment | kg/kg N | Observations |
|--------------------|--------------|---------|---|
| N-NH ₃ | air | 25,80% | Une fraction de l'azote ammoniacal est émise à l'air, dont une partie est transformée en protoxyde d'azote |
| N-N ₂ O | air | 1,18% | Emissions directes (à partir du N-NH ₃) et indirectes (activité de dénitrification microbienne) |
| N-NO ₃ | eau | 0% | Hypothèse qu'il n'y a pas de nitrates en excès lessivés |
| N-N ₂ | plante/air | 73% (*) | Une petite quantité de diazote peut être émise pendant la dénitrification microbienne mais n'est pas quantifiée. Hypothèse retenue qu'il n'y a pas d'accumulation d'azote dans le sol, et donc pas d'émissions au sol, ou aux eaux de surface/souterraines. L'azote restant est supposé retenu et assimilé par la plante. |

(*) Non considéré en LCIA (Life Cycle Impact Assessment) – méthodes de conversion des flux de substances dans les compartiments environnementaux en termes d'impacts.

Tableau 10. Coefficients de transfert des composés phosphorés à l'épandage de boues (Doka, 2007)

| Substance | Compartiment | kg/kg P | Observations |
|-------------------|-------------------|------------|---|
| P-PO ₄ | eau (rivière) | 2,005% | Une petite fraction du phosphore est assumée lessivée des champs vers les cours d'eau lors d'évènements pluvieux intenses et du fait de l'érosion des sols. Il y a aussi percolation des phosphates soluble dans les nappes phréatiques souterraines. |
| P-PO ₄ | eau (souterraine) | 0,57% | |
| P | plante | reste% (*) | Hypothèse retenue qu'il n'y a pas d'accumulation de phosphore dans le sol, et donc pas d'émissions au sol. Le phosphore restant est supposé retenu et assimilé par la plante. |

(*) Non considéré en LCIA

NB. Ces coefficients de transfert sont différents de ceux définis par Nemecek et al, 2007 pour les fertilisants minéraux ou des déjections animales des filières d'élevage (lisiers, fumiers) dans le cadre d'application de la *production agricole*. Par exemple, pour les émissions d'ammoniaque à l'air à partir de nitrate d'ammonium, le facteur d'émission est de 2% de la teneur en azote total de l'engrais, contre 26% dans le cas des boues d'épuration.

5.4. Calcul des émissions lors de l'épandage – Modèle Ecodefi (Pradel, 2010)

Dans le cadre du projet Ecodefi¹⁸, les simulations des émissions azotées sont proposées pour les deux types de boue étudiés par des modèles de simulation agronomiques : STICS (pour l'ammoniaque NH₃ et le protoxyde d'azote N₂O) et DEAC (pour les nitrates NO₃⁻). L'estimation des phosphates lessivés est réalisée à l'aide de paramètres d'épandage comme l'orniérage, qui va déterminer un indicateur de perte défini dans le calculateur simplifié acv3E.

6. Evaluation de scénarios d'émissions

Dans ce qui suit, les scénarios sont basés sur un épandage de boues d'épuration de types B02 et B03. Ce sont les deux types de boues attendues en sortie des STEU étudiées dans le cadre de ce projet.

6.1. Modèle ecoinvent

Pour appliquer le modèle d'émissions au champ lors d'un épandage de boues de types B02 et B03, il suffit de reprendre les compositions de ces boues en N et P totaux, que l'on peut retrouver à l'**Annexe I** de ce document et appliquer les coefficients de transfert ou « fate factors » définis par le modèle (cf. Tableau 9 et Tableau 10).

Les émissions estimées dans ce modèle sont présentées aux Tableau 11 et Tableau 12, où la désignation des substances disponibles dans ecoinvent pour l'étape d'Analyse des Impacts Environnementaux (LCIA – Life Cycle Impact Assessment) est renseignée.

¹⁸ Se référer au Livrable T3d, pp. 28-38. Pradel, M., 2010 – Analyses du Cycle de Vie de chantiers d'épandage de boues de stations d'épuration, Livrable T3d du projet Ecodefi, Cemagref (Programme ANR PRECODD)

Tableau 11. Inventaire des Emissions lors de la Valorisation agronomique des boues Solides Chaulées B02

| Désignation LCIA | Compartiment | Quantité élémentaire | | Quantité massique | |
|------------------|-------------------|----------------------|-------|-------------------|-------|
| | | kg/T MS | | kg/T MS | |
| Ammonia | air | N-NH ₃ | 7,461 | NH ₃ | 9,060 |
| Nitrous oxide | air | N- N ₂ O | 0,341 | N ₂ O | 0,536 |
| Nitrate | eau | N-NO ₃ | 0,000 | NO ₃ | 0,000 |
| nc (*) | plante/air | N-N ₂ | nc | N ₂ | nc |
| Phosphate | eau (rivière) | P-PO ₄ | 0,502 | PO ₄ | 1,539 |
| Phosphate | eau (souterraine) | P-PO ₄ | 0,103 | PO ₄ | 0,437 |
| nc | plante | P | nc | P | nc |

(*) nc : non connu

Tableau 12. Inventaire des Emissions lors de la Valorisation agronomique des boues Compostées B03

| Désignation LCIA | Compartiment | Quantité élémentaire | | Quantité massique | |
|------------------|-------------------|----------------------|-------|-------------------|-------|
| | | kg/T MS | | kg/T MS | |
| Ammonia | air | N-NH ₃ | 5,624 | NH ₃ | 6,830 |
| Nitrous oxide | air | N-N ₂ O | 0,257 | N ₂ O | 0,404 |
| Nitrate | eau | N-NO ₃ | 0,000 | NO ₃ | 0,000 |
| nc | plante/air | N-N ₂ | nc | N ₂ | nc |
| Phosphate | eau (rivière) | P-PO ₄ | 0,363 | PO ₄ | 1,112 |
| Phosphate | eau (souterraine) | P-PO ₄ | 0,103 | PO ₄ | 0,306 |
| nc | plante | P | nc | P | nc |

6.2. Modèle Ecodefi

Dans ce qui suit, les résultats de simulations du Livrable T3d (Pradel, 2010) sont utilisés. Un test de cohérence avec les valeurs données par le logiciel acv3E sera également effectué.

Dans un second temps, il sera possible de se baser sur les résultats calculés à partir des formules mathématiques, afin de s'affranchir du « flux de référence » F0 relatif à un épandage antérieur à l'application de la dose étudiée. L'intérêt de calculer à partir des modèles mathématiques est de pouvoir distinguer la contribution « Epandage Parfait » ou $\Delta F1$, de celle de l'effet « machine » ou $\Delta F2$ (représentant une application réelle imparfaite de la dose théorique).

On s'intéresse ici aux émissions liées à l'épandage d'une dose de boue d'épuration (kg substance / tonne de MS épandue).

Les résultats de simulations pour quelques scénarios¹⁹ choisis convenant aux deux types de boues considérés sont donnés au Tableau 13 :

- **Scénarios avec épandage idéal** : choix des scénarios les moins émissifs;
- **Scénarios avec épandage sans enfouissement** : choix des scénarios sans enfouissement.

NB. Afin de pouvoir comparer ces scénarios, il a été pris soin de prendre les mêmes conditions pédoclimatiques pour les deux types de boues

Pour rappel, les types de boues considérés ici sont :

B02 : Boue compostée, 64% MS

B03 : Boue solide chaulée, 34% MS

¹⁹ A chaque scénario une dose différente de boue est épandue à l'hectare.

Tableau 13. Emissions générées par l'épandage (kg/T de MS épandue) (Annexe 5 au Livrable T3d Ecodefi)

| Type | Boue épandue | Scénario N° (*) | Flux estimés totaux (kg / T MS) | | | |
|----------------|--------------|-----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
| | | | NH3 | NO3 | N2O | P2O5 |
| Epandage idéal | B02 | 19 | 2,539 | 0,000 | 0,001 | 0,000 |
| | B03 | 28 | 1,777 | 22,19 | 0,000 | 9,509 |

| | | | | | | |
|-----------------------------|-----|----|-------|-------|-------|-------|
| Epandage sans enfouissement | B02 | 20 | 0,141 | 53,78 | 1,187 | 0,000 |
| | B03 | 29 | 0,480 | 61,22 | 0,123 | 9,509 |
| | B02 | 22 | 0,141 | 148,9 | 2,133 | 0,000 |
| | B03 | 31 | 0,265 | 75,15 | 0,258 | 9,509 |

(*) Scénarios développés par Pradel, 2010 (Livrable T3d du projet Ecodefi). En **grisé** les scénarios retenus pour représenter un épandage « idéal » et un épandage sans enfouissement.

Le Tableau 14 récapitule à titre d'information, les émissions calculées par le modèle ecoinvent et le modèle Ecodefi acv3E.

Tableau 14. Synthèse des émissions calculées par les simulations du Livrable T3d (Ecodefi), du logiciel acv3E et du modèle ecoinvent

| Type | Boue épandue | Scénario N° | Flux estimés totaux (kg / T MS) | | | |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
| | | | NH3 | NO3 | N2O | P2O5 |
| Epandage idéal | Ecodefi (L.T3d) | | | | | |
| | B02 | Scénario N°19 | 2,539 | 0,000 | 0,001 | 0,000 |
| | B03 | Scénario N°28 | 1,777 | 22,19 | 0,000 | 9,509 |
| | Ecoinvent | | | | | |
| | B02 | "to soil, agricultural" | 9,06 | 0 | 0,54 | 2,95 |
| | B03 | "to soil, agricultural" | 6,83 | 0 | 0,40 | 2,12 |
| Epandage sans enfouissement | B02 | Scénario N°20 | 0,141 | 53,78 | 1,187 | 0,000 |
| | B03 | Scénario N°29 | 0,480 | 61,22 | 0,123 | 9,509 |
| | B02 | Scénario N°22 | 0,141 | 148,9 | 2,133 | 0,000 |
| | B03 | Scénario N°31 | 0,265 | 75,15 | 0,258 | 9,509 |

*** Rajouter calculs par acv3E pour scénarios retenus par même type de condition pédoclimatique

NB. On convertira les lessivages de composés phosphorés en prenant la forme phosphates (PO4) disponible dans ecoinvent. Ainsi, 9,51 g de P₂O₅ lessivés correspondra à un rejet en rivière de :

$$9,51 * (31 + 4 * 16) / (2 * 31 + 5 * 16) = 6,36 \text{ g PO}_4$$

On notera que les scénarios concernant les boues compostées (B02) ne font pas état de phosphates (P_2O_5) lessivés suite à des orniérages (indicateur de perte Perte=0).

Autre remarque : les scénarios d'Épandage « Parfait » avec enfouissement ont des émissions d'azote ammoniacal plus importantes que dans les scénarios sans enfouissement, mais en contrepartie, n'ont pas beaucoup de dégagement de N_2O , et des lessivages de nitrates et phosphates très inférieurs.

7. Evaluation des impacts (LCIA)

8.1.Méthode de calcul utilisée : ReCiPe Mid/Endpoint method, version Jan. 2010

Sous le logiciel SimaPro 7, il existe plusieurs méthodes de calcul d'analyses d'impacts environnementaux (LCIA), pour un même inventaire établi. Par le calcul des résultats d'indicateur (phase de caractérisation), les données d'inventaire sont converties en unités communes. Celles-ci sont ensuite agrégées au sein d'une même catégorie d'impact. Cette conversion utilise des facteurs de caractérisation. Le résultat obtenu est un indicateur numérique (norme ISO 14044, 2006).

Des éléments et des informations facultatifs tel que la normalisation, peuvent être utilisés en fonction des objectifs et du champ de l'étude ACV (norme ISO 14044, 2006). La normalisation est le calcul de l'importance des résultats d'indicateur de catégorie (en les divisant par des valeurs de référence choisies) par rapport à certaines informations de référence. L'objectif de la normalisation consiste à mieux comprendre l'importance relative de chaque résultat d'indicateur du système de produits étudié.

Dans le cadre de la méthode ReCiPe, il y a 18 catégories d'impacts « midpoint » et 3 catégories d'impacts « endpoint », illustrées à la Figure 4.

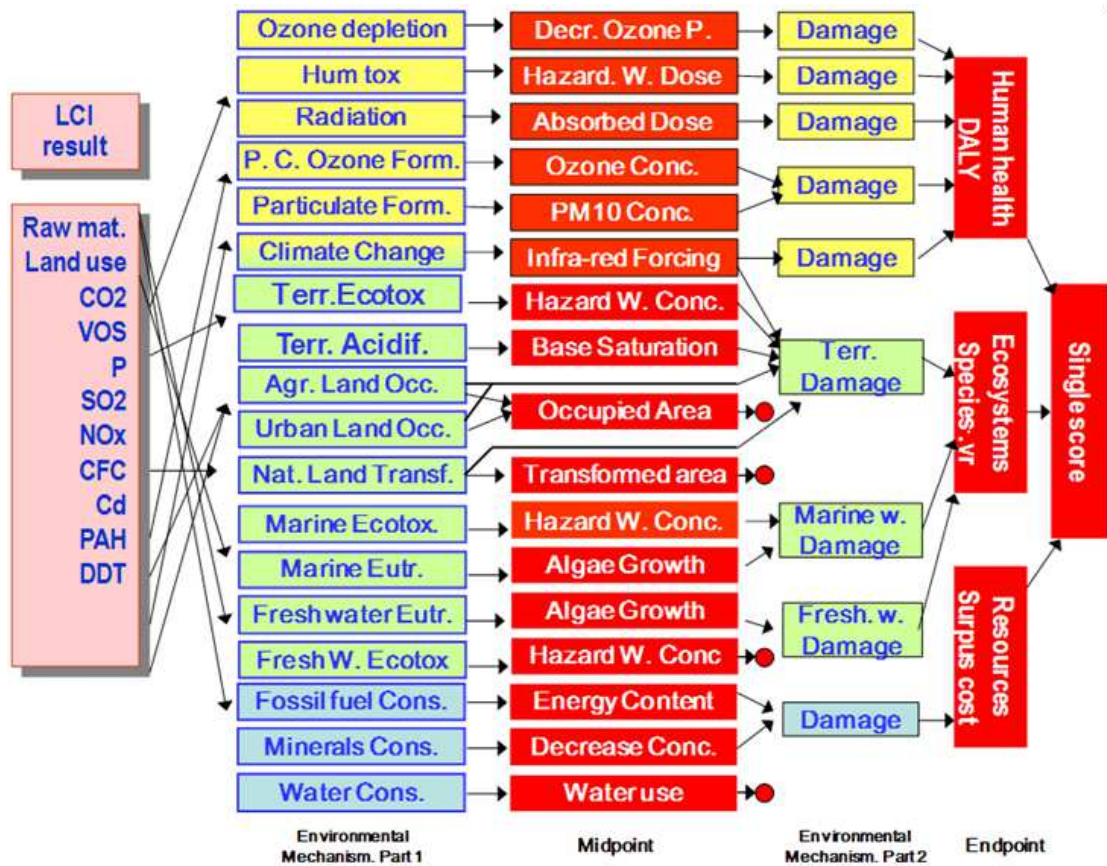


Figure 4. Relations entre Données d’inventaires, indicateurs mid/end-point dans ReCiPe 2008 (Handbook ReCiPe 2008, 1st ed. Report I)

Cette méthode a l’avantage de pouvoir être utilisée en approche «midpoint» uniquement, mais également avec une approche « endpoint ». Dans la suite nous nous limiterons à l’approche «midpoint» dont les catégories sont référées au Tableau 15.

Tableau 15. Catégories "midpoint" de ReCiPe

| Abr. | Catégorie d’impact | Unité de l’indicateur |
|------|---------------------------------|-------------------------------|
| CC | Climate change | kg (CO ₂ to air) |
| OZ | Ozone depletion | kg (CFC-11 to air) |
| HT | Human toxicity | kg (14DCB to urban air) |
| POF | Photochemical oxidant formation | kg (NMVOC to air) |
| PMF | Particulate matter formation | kg (PM10 to air) |
| IR | Ionising radiation | kg (U235 to air) |
| TA | Terrestrial acidification | kg (SO ₂ to air) |
| F-Eu | Freshwater eutrophication | kg (P to freshwater) |
| M-Eu | Marine eutrophication | kg (N to freshwater) |
| TET | Terrestrial ecotoxicity | kg (14DCB to industrial soil) |

| | | |
|-----|------------------------------|---|
| FET | Freshwater ecotoxicity | kg (14DCB to freshwater) |
| MET | Marine ecotoxicity | kg (14DCB to marine water) |
| ALO | Agricultural land occupation | m ² . yr ⁻¹ (agricultural land) |
| ULO | Urban land occupation | m ² . yr ⁻¹ (urban land) |
| NLT | Natural land transformation | m ² (natural land) |
| WD | Water depletion | m ³ (water) |
| MD | Metal depletion | kg (Fe) |
| FD | Fossil depletion | kg (oil) |

Cette méthode combine les caractérisations calculées par une méthode « midpoint », CML 2000²⁰ et les caractérisations calculées par une méthode « endpoint », EcoIndicator 99²¹. Il existe trois perspectives principales disponibles dans ReCiPe, chacune représentant un ensemble d'hypothèses sur certains paramètres (comme l'horizon de temps choisi, ou sur les futurs développements technologiques ou choix de gouvernance adaptés pour éviter certains dommages) :

- Individualist: à court terme, hypothèse optimiste que les technologies pourront éviter de nombreux problèmes futurs.
- Hierarchist: Modèle de consensus, assez souvent rencontré dans les modèles scientifiques. Ce modèle est souvent considéré comme modèle par défaut.
- Egalitarian: à plus long terme, se base sur des choix centres sur le principe de précaution.

Dans la suite, la méthode choisie sera ReCiPe perspective Hierarchist (H).

8.2. Analyse des résultats sur les émissions (N,P)

Quelle est l'importance relative de la substitution des engrais minéraux (procédés de fabrication) par rapport aux émissions dues à un épandage de boues d'épuration ?

L'option A représente les engrais minéraux « évités » lors d'un épandage de boues d'épuration dont les émissions au champ sont du même ordre de grandeur que celles attendues lors d'une fertilisation minérale. De plus, cet épandage est supposé « parfait », i.e. avec un enfouissement (utilisation de covercrop). Les émissions de protoxyde d'azote N₂O sont limitées, ainsi que les lessivages de phosphates et nitrates.

L'option C représente le cas d'un épandage de boues d'épuration sans substitution d'engrais minéraux et sans enfouissement. Les impacts sont donc purement représentatifs des émissions dues à l'épandage et au machines agricoles utilisées pour une **dose de 1 T de MS par hectare** (choisie comme Unité Fonctionnelle dans les scénarios développés par Pradel, 2010).

Des différences sont attendues entre le cas d'un épandage dit « parfait » avec enfouissement correctement réalisé juste après l'épandage ; et le cas d'un épandage dit « imparfait » où l'enfouissement

²⁰ CML, University of Leiden, Netherlands. Guinée et al, 2002

²¹ PRé Consultants, Amersfoort, Netherlands. Goedkoop & Spriensma, 1999

n'est pas correctement réalisé et où des lessivages de nitrates NO_3 et de phosphates P_2O_5 surviennent, ainsi que des dégagements plus importants de protoxyde d'azote.

Les scénarios retenus pour la modélisation sous SimaPro sont :

- **Boues B02 : Scénario 19 (Option A) et Scénario 22 (Option C)**
- **Boues B03 : Scénario 28 (Option A) et Scénario 31 (Option C)**

Emissions vs Impacts évités

Les Figure 5 à Figure 8 montrent que la substitution des engrais minéraux par les boues de type B02 et B03 évitent des impacts non négligeables sur toutes les catégories d'impact, à l'exception de :

- l'Eutrophisation Marine (M-Eu), qui est dominée par le lessivage des nitrates ;
- l'Acidité Terrestre (TA) et la Formation de Particules Fines (PMF), justifiées par les émissions air d'ammoniac NH_3

Ces impacts évités sont représentés par les scores obtenus pour l'option A (en hachuré), alors que les impacts causés par les rejets et émissions calculés par les modèles d'épandage sont représentés par les scores obtenus pour l'option C.

Contributions de la phase de fabrication des engrais minéraux

En regardant en détail le procédé de fabrication de l'engrais minéral « Triple Superphosphate » au Tableau 20, des éléments traces métalliques (Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn et As) sont rejetés aux eaux de surface, ce qui contribue à l'Ecotoxicité aquatique (d'eau douce - FET d'après la Figure 11, ainsi que pour les eaux marines - MET). A noter également la quantité de phosphates relargués aux eaux de surface, qui contribuent majoritairement à l'Eutrophisation d'eau douce (F-Eu). Il s'agit de rejets liés à l'extraction du minerai de phosphate. La Figure 12 (en Annexe) présente une analyse globale des contributions des procédés de fabrication des engrais minéraux N, P, K choisis.

De même, les Tableau 21 et Tableau 22 font état de rejets inhérents aux procédés de fabrication des engrais minéraux « Nitrate d'ammonium » et « Sulphate de potassium ».

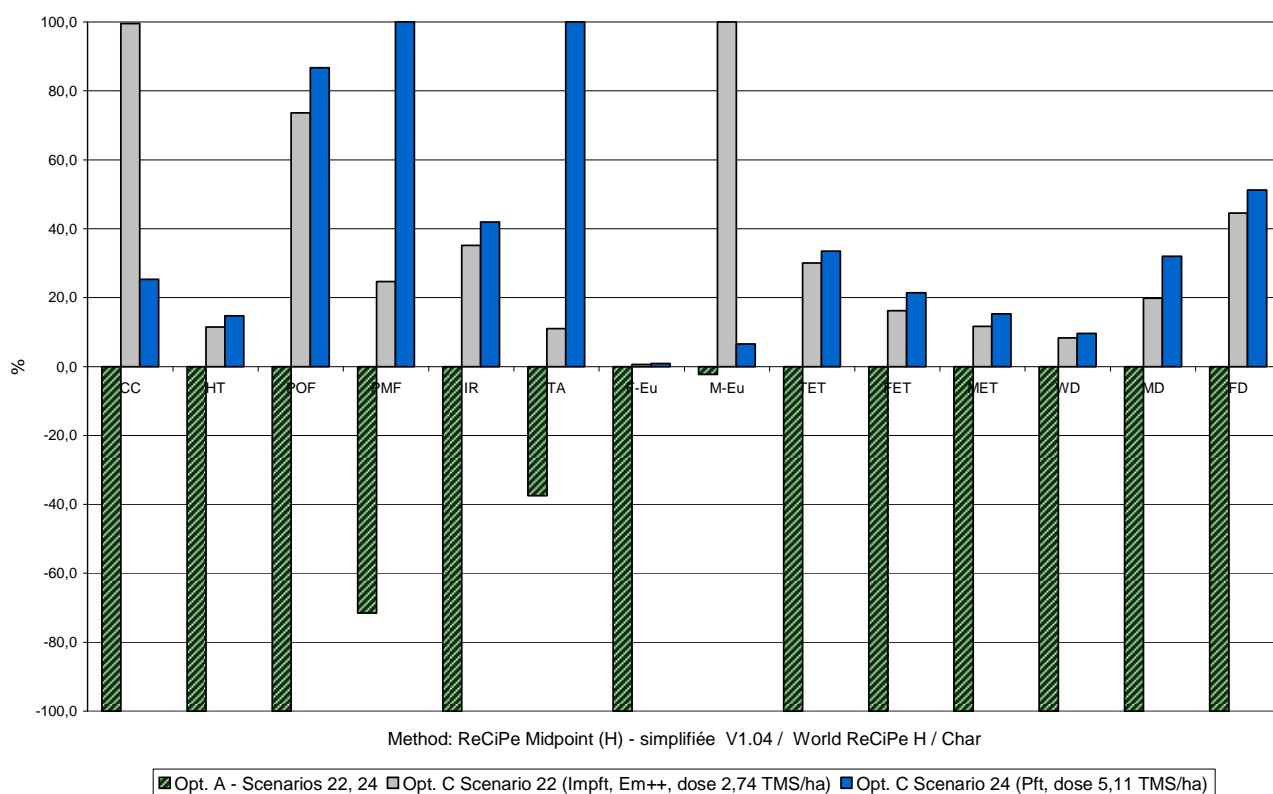


Figure 5. Comparaison Option A et Option C pour une boue de type B02 – Caractérisation

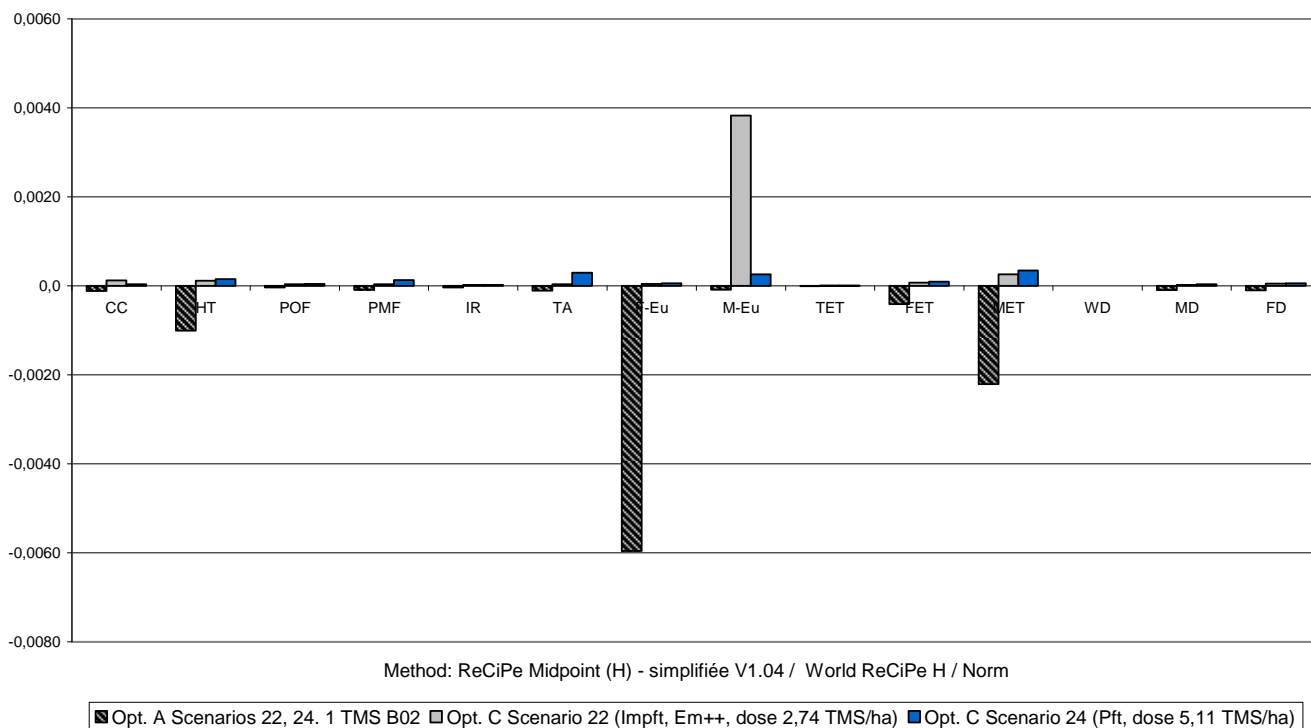


Figure 6. Comparaison Option A et Option C pour une boue de type B02 - Normalisation

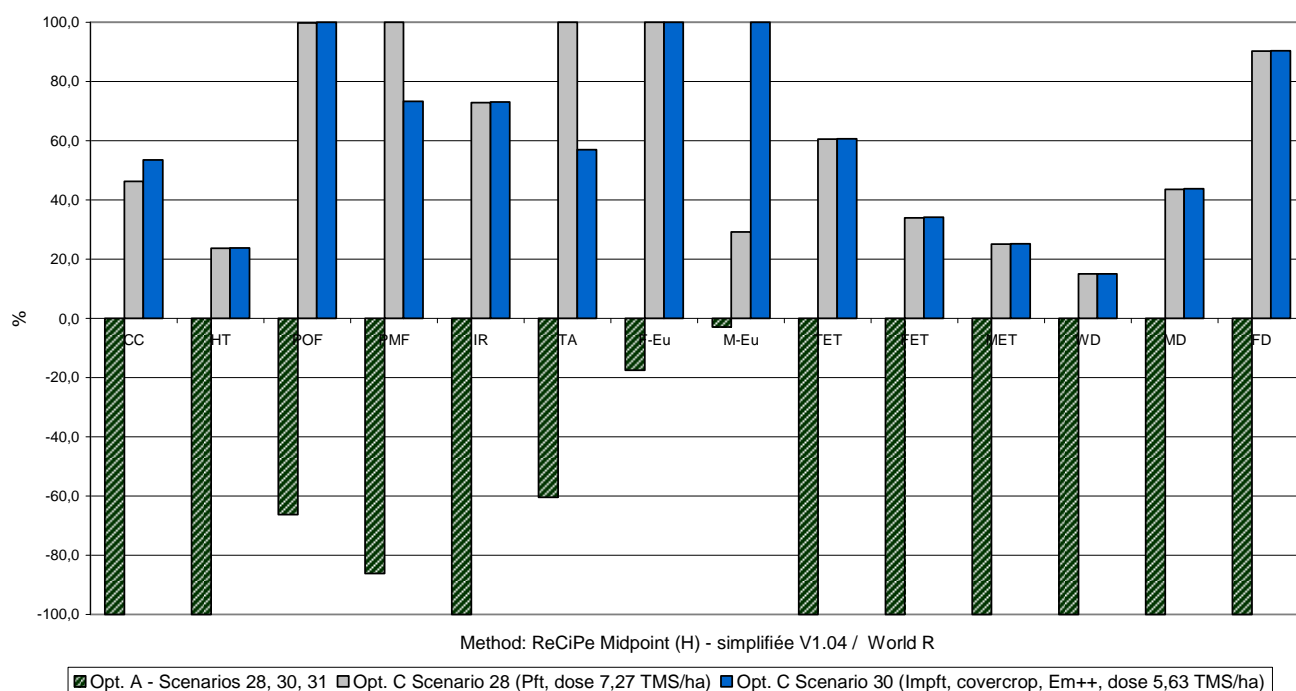


Figure 7. Comparaison Option A et Option C pour une boue de type B03 – Caractérisation

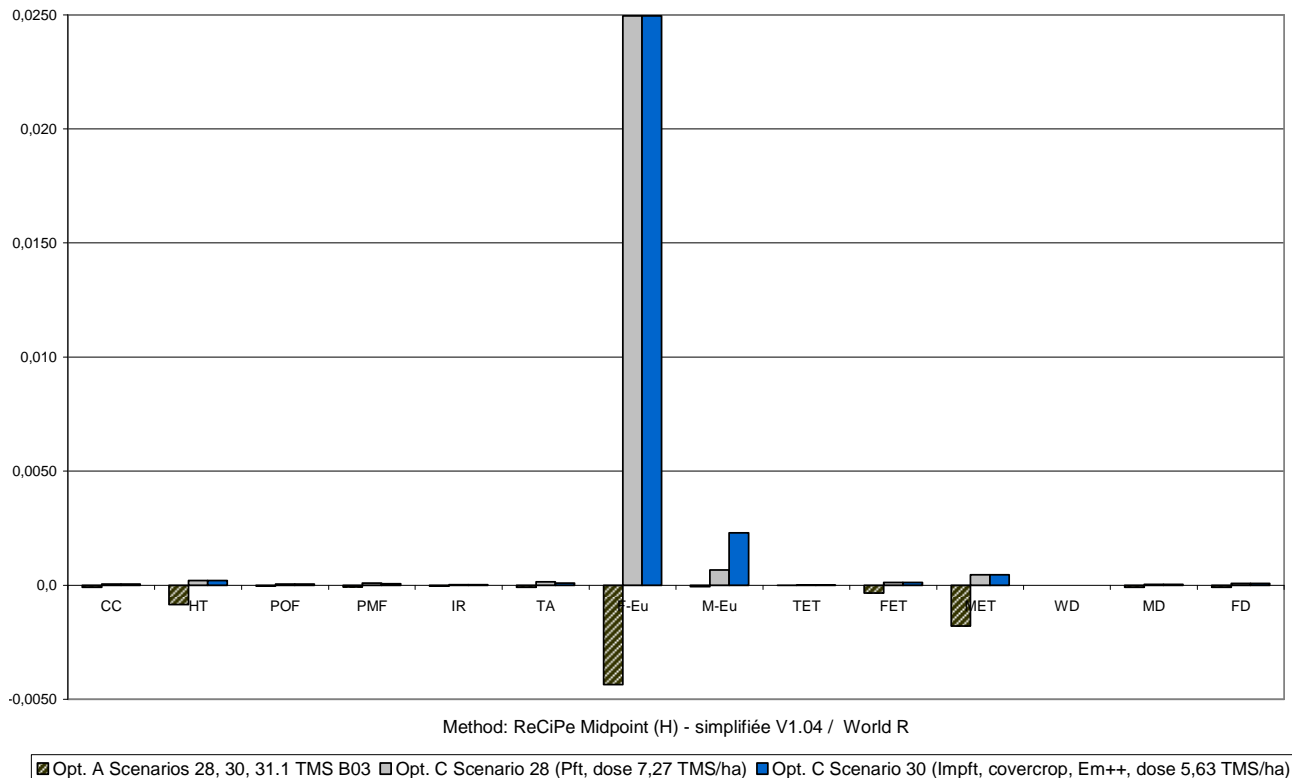


Figure 8. Comparaison Option A et Option C pour une boue de type B03 - Normalisation

Quelle est l'importance relative des émissions (N,P) aux champs pour des scénarii d'épandage choisis par rapport au transport des boues et à l'utilisation des machines ?

Une analyse de contribution de l'épandage des boues B03 et B02 respectivement aux Figure 9 et Figure 10 montre les impacts dominés par les émissions de composés azotés et phosphorés pour les scénarii d'épandage retenus dans la modélisation sous SimaPro.

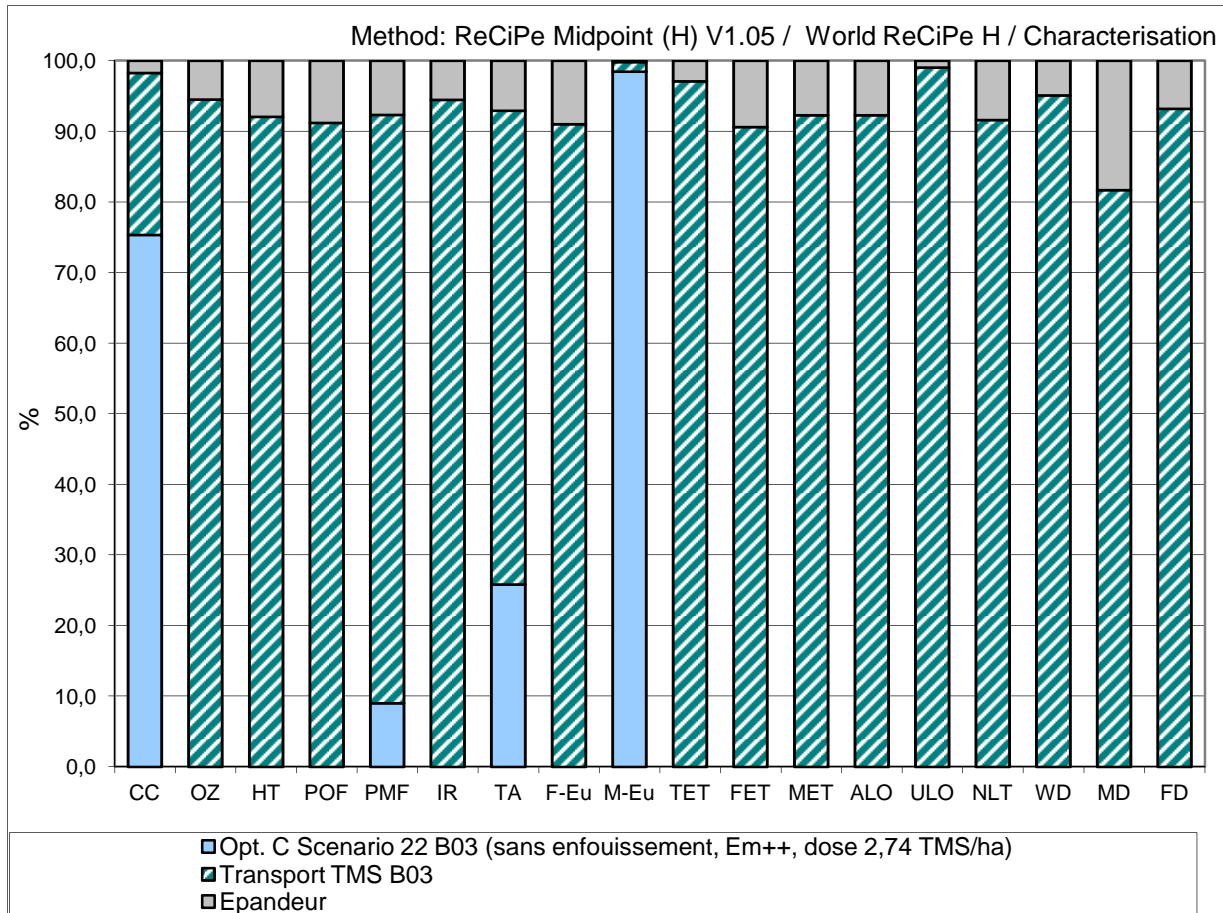


Figure 9. Diagramme de contribution Epandage d'une boue B03 (scen. 22)

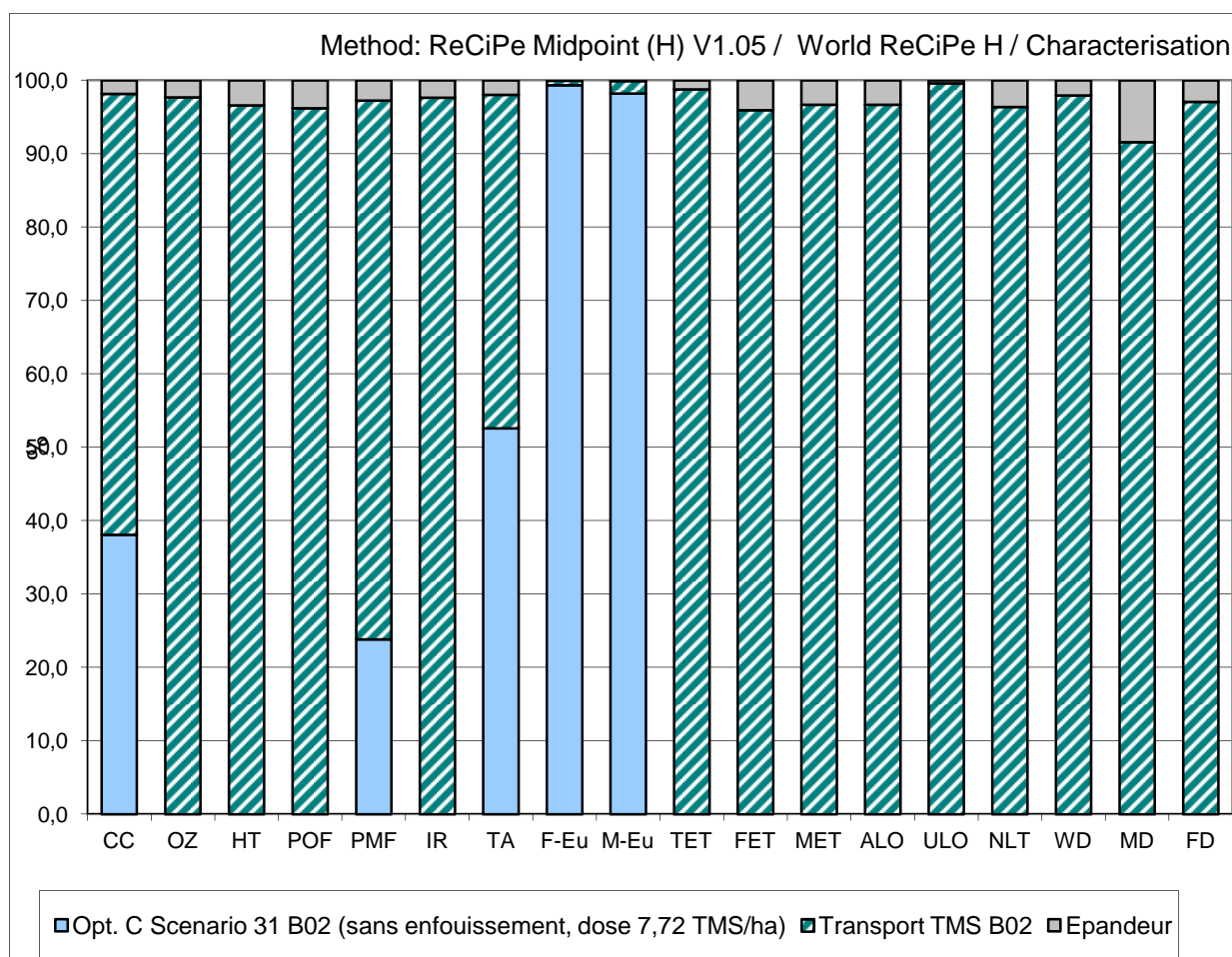


Figure 10. Diagramme de contribution Epandage d'une boue B02 (scen. 31)

Il est intéressant de retrouver ensuite les principales substances contributrices (Tableau 16 et Tableau 17) dans la décomposition des scores d'impact pour les catégories où les émissions (N,P) apparaissent avoir un poids remarquable (CC, PMF, TA, F-Eu & M-Eu). Dans la méthode LCIA ReCiPe, la catégorie midpoint d'Eutrophisation d'eau douce (Freshwater Eutrophication) a pour unité d'indicateur le kg de Phosphore. En effet, l'eutrophisation²² des eaux continentales (eaux douces) est assumée être limitée par le Phosphore. L'Eutrophisation Marine sera exprimée en unités de masse d'Azote.

Tableau 16. Principales substances contributrices aux catégories d'impact concernées par les émissions (N,P) suite à l'épandage d'une boue B02

| Label | Abbr. | Substances | | | | | | Impact score (%) Opt. C Scenario 22 B02 |
|---|-------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|--|
| | | Contributor 1 | Value | Contributor 2 | Value | Contributor 3 | Value | |
| Climate change (kg CO2 eq) | CC | N2O | 7.69E-02 | | | | | 38.1087 |
| Particulate matter formation (kg PM10 eq) | PMF | NH3 | 8.47E-05 | | | | | 23.8536 |
| Terrestrial acidification (kg SO2 eq) | TA | NH3 | 6.55E-04 | NOx | 4.37E-04 | SOx | 1.41E-04 | 52.6109 |
| Freshwater eutrophication (kg P eq) | F-Eu | PO4 | 2.11E-03 | | | | | 99.3456 |
| Marine eutrophication (kg N eq) | M-Eu | NO3 | 1.70E-02 | | | | | 98.2253 |

Tableau 17. Principales substances contributrices aux catégories d'impact concernées par les émissions (N,P) suite à l'épandage d'une boue B03

| Label | Abbr. | Substances | | | | | | Impact score (%) Opt. C Scenario 31 B03 |
|---|-------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|--|
| | | Contributor 1 | Value | Contributor 2 | Value | Contributor 3 | Value | |
| Climate change (kg CO2 eq) | CC | N2O | 6.36E-01 | | | | | 75.3326 |
| Particulate matter formation (kg PM10 eq) | PMF | NH3 | 4.50E-05 | | | | | 9.0078 |
| Terrestrial acidification (kg SO2 eq) | TA | NH3 | 3.44E-04 | NOx | 0.00E+00 | SOx | 0.00E+00 | 25.8376 |
| Freshwater eutrophication (kg P eq) | F-Eu | | | | | | | 0. |
| Marine eutrophication (kg N eq) | M-Eu | NO3 | 3.37E-02 | NH3 (air) | 1.29E-05 | | | 98.48 |

²² Eutrophisation : croissance indésirable de biomasse algale, ici pour les écosystèmes aquatiques. L'élément limitant est le Phosphore pour les eaux douces, alors que l'Azote est l'élément limitant des eaux marines (Handbook ReCiPe 2008, Report I : Characterization, pp. 63-67)

8.3. Autres émissions – ETM, CTO, réactifs de conditionnement, etc..

Dans cette première étude, les Eléments Traces Métalliques (ETM) et les Composés Traces Organiques (CTO) provenant des **eaux usées domestiques** ne sont pas pris en compte, ce sera l'objet d'un stage Master courant 2011.

Cependant, dans les boues définies dans le cadre du projet Ecodefi (Pradel, 2010) les teneurs de 8 ETM (Cadmium, Chrome, Cuivre, Mercure, Nickel, Plomb, Zinc et Sélénium) sont renseignées, ainsi que les concentrations en 4 CTO (PCB – PolyChloroBiphényle, Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, et Benzo(a)pyrène). Ceci afin de respecter les concentrations admissibles pour le calcul des doses applicables.

Pour la filière de traitement des boues par coagulation/floculation (voie physico-chimique), les réactifs de conditionnement listés dans l'inventaire LCI de la STEU sont les suivants :

Conditionnement polymère

L'étape de fabrication de ce polymère aux propriétés floculantes a été prise en compte en prenant de la base de données ecoinvent un polymère « proxy », le « methyl methacrylate, at plant/RER S ». Il n'y avait pas de comonomère cationique du type acrylate (ou methacrylate) ammonium quaternaire. Ce comonomère devrait permettre la synthèse du polymère floculant par une copolymérisation avec le N-méthylolacrylamide. Cet acrylamide, disponible dans ecoinvent est caractérisé en Toxicité Humaine (HT) seulement.

Dans les rares cas où il y aurait surdosage en floculants, où des polymères non liés seraient rejetés dans les effluents, il reste à identifier dans ecoinvent un autre polymère proxy pour rendre compte des impacts sur la santé de l'écosystème aquatique.

Conditionnement chaux

Pour ce conditionnement, de la chaux est disponible dans ecoinvent : « Lime, hydrated, packed, at plant ». Cependant il n'y a pas d'impact notoire avec la méthode LCIA ReCiPe.

Conditionnement Chlorure de fer

Le chlorure de fer (III) utilisé est répertorié dans ecoinvent « Iron (III) Chloride, 40% water ». Les ions Fe^{3+} excédentaires qui n'auraient pas formé de complexes $FePO_4$ (précipités de phosphates de fer dans les boues), n'ont pas d'impact notoire en toxicité (humaine ou écosystémique) dans ReCiPe.

Cependant, peu d'études ont été faites sur les effets toxiques des métaux contenus dans les boues d'épuration (Fe, Mn, Cr, Cu, Pb et Zn), et il est évident qu'il y a un certain manque d'information sur les effets toxiques possibles des composés ferriques sur les organismes aquatiques (Sotero-Santos et al, 2005). Un consensus général stipule que les composés du Fer peuvent être dangereux pour la faune aquatique (Randall et al, 1999 ; Dalzell et MacFarlane, 1999). C'est dans cette optique d'identification des polluants que des méthodes TIE (Toxicity Identification Evaluation) ont été développées par l'US EPA (USEPA, 2007).

9. Conclusion, perspectives

Ces ACV ont permis d'évaluer les conséquences de différentes hypothèses sur les résultats d'ACV d'un système STEU prenant en compte la fin de vie des boues d'épuration. Elles ont mis en évidence la grande importance de prendre en compte la substitution d'engrais évités (Option A), au niveau des émissions liées à l'épandage. L'Option C qui ne prend pas en compte cet effet représente l'hypothèse la plus conservative.

Dans le cas d'une comparaison de différents systèmes STEU avec les mêmes hypothèses de fin de vie des boues (70/20/10 en Epandage/incinération/décharge), nous recommandons donc de choisir l'Option C pour ne pas avoir d'effet de masque sur l'efficacité de la STEU elle-même. Par contre, lorsque l'on souhaitera comparer des systèmes de traitement des boues incluant une valorisation énergétique comme la méthanisation, il sera impératif de consolider et d'affiner ces hypothèses de fin de vie.

5. Références bibliographiques

- [1] ADEME. Accédé le 22/03/2011. <http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/f15.htm>
- [2] Doka, G. (2007) Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent report No.13, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Part IV, Wastewater Treatment – Final report of the project of a National Life Cycle Inventory Database “ecoinvent 2000”
- [3] Dalzell, D. and Macfarlane, N. (1999). The toxicity of iron to brown trout and effects on the gills: a comparison of two grades of iron sulphate. *Journal of Fish Biology*, 55: 301–315.
- [4] Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., van Zelm, R. (2009). Handbook ReCiPe 2008. 1st ed. Report I: Characterisation. Available at the following: http://www.leidenuniv.nl/cml/sppublications/recipe_characterisation.pdf (Accédé le 02/10/2011)
- [5] Grimaud, L. (1996). La valorisation des boues de stations d'épuration en agriculture. Mémoire D.U. « Eau et Environnement », D.E.P., Univ. Picardie, Amiens, 44p. Extrait « La valeur azotée des boues d'épuration » accessible sur le site : <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/du/grimaud.htm>
- [6] Nemecek, T., Kägi T., Blaser S. (2007). Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Final report ecoinvent v2.0 No.15. Agroscope FAL Reckenholz and FAT Taenikon, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. www.ecoinvent.ch
- [7] OTV (1997). Traiter et Valoriser les boues. Ouvrage Collectif, 457p. ISBN 2-9511059-0-8
- [8] Pradel, M. (2010). Analyse du Cycle de Vie des chantiers d'épandage de boues de station d'épuration, p.35. Livrable Projet EcoDefi T3d, Programme ANR Ecotechnologies et Développement Durable (PRECODD)
- [9] Randall, S., Harper, D., Brierley, B. (1999). Ecological and ecophysiological impacts of ferric dosing in reservoirs. *Hydrobiologia*, 395-396, pp. 355-364.
- [10] Reverdy, A.L., Pradel, M. (2010). Les filières de valorisation des boues d'épuration en France. Etat des lieux, Etat de l'art (Juin 2010).
- [11] Sotero-Santos, R., Rocha, O., Povinelli, J. (2005). Evaluation of water treatment sludges toxicity using the Daphnia bioassay. *Water Research* 39, pp. 3909-3917
- [12] USEPA (2007). Sediment Toxicity Identification Evaluation (TIE) Phases I, II, and III Guidance Document, Office of Research and Development. Washington, DC. Accédé le 25/04/2011 <http://www.epa.gov/nheerl/publications/files/Sediment%20TIE%20Guidance%20Document.pdf>

6. Lexique, vocabulaire spécifique

| | |
|-----|---|
| ACV | Analyse de Cycle de Vie |
| PR | Poste de Refoulement (station de pompage) |

STEU / STEU

STation d'EPuration des eaux Usées

7. Annexes

Annexe I. Caractéristiques des boues épandues (Ecodefi)

Tableau 18. Caractéristiques Boue Compostée, B03

| Boue compostée, 64% MS | | | Ref. Boue : B03 | | |
|------------------------------------|--------|-------------|--|------|-------------|
| Caractéristiques générales | | | | | |
| paramètre | valeur | unité | | | |
| MS | 640 | g/kg | Matière sèche en g/kg de boue | | |
| C/N | 11,7 | / | Rapport C _{org} / N _{org} : Potentiel de minéralisation. | | |
| N total | 21,8 | g/kg de MS | Azote total | | |
| N-NH4 | 0,48 | g/kg de MS | Azote ammoniacal | | |
| N org | 20 | g/kg de MS | Azote organique | | |
| C org | 233 | g/kg de MS | Carbone organique | | |
| P2O5 | 18,1 | g/kg de MS | Phosphore total | | |
| K2O | 12,2 | g/kg de MS | Potassium total | | |
| pH | 9,07 | / | | | |
| CaO | 63,6 | g/kg de MS | Calcium total | | |
| MgO | 9,4 | g/kg de MS | Magnésium total | | |
| Eléments Traces Métalliques | | | Composés traces Organiques | | |
| Cd | NC | mg/kg de MS | PCB | NC | mg/kg de MS |
| Cr | 50,59 | mg/kg de MS | Fluoranthène | 0,8 | mg/kg de MS |
| Cu | 152,14 | mg/kg de MS | Benzo(b)fluoranthène | 0,5 | mg/kg de MS |
| Hg | NC | mg/kg de MS | Benzo(a)pyrène | 0,25 | mg/kg de MS |
| Ni | 25,81 | mg/kg de MS | | | |
| Pb | 61,81 | mg/kg de MS | | | |
| Zn | 404,92 | mg/kg de MS | | | |
| Se | NC | mg/kg de MS | | | |

Tableau 19. Caractéristiques Boue solide chaulée B02

| Boue solide chaulée, 34% MS | | | Ref. Boue : B02 | | |
|------------------------------------|--------|-------------|--|------|-------------|
| Caractéristiques générales | | | | | |
| paramètre | valeur | unité | | | |
| MS | 327,1 | g/kg | Matière sèche en g/kg de boue | | |
| C/N | 5,8 | / | Rapport C _{org} / N _{org} : Potentiel de minéralisation. | | |
| N total | 28,92 | g/kg de MS | Azote total | | |
| N-NH4 | 0,93 | g/kg de MS | Azote ammoniacal | | |
| N org | 27,99 | g/kg de MS | Azote organique | | |
| C org | 163 | g/kg de MS | Carbone organique | | |
| P2O5 | 25,04 | g/kg de MS | Phosphore total | | |
| K2O | 2,82 | g/kg de MS | Potassium total | | |
| pH | 11,1 | / | | | |
| CaO | 260,95 | g/kg de MS | Calcium total | | |
| MgO | NC | g/kg de MS | Magnésium total | | |
| Eléments Traces Métalliques | | | Composés traces Organiques | | |
| Cd | NC | mg/kg de MS | PCB | NC | mg/kg de MS |
| Cr | 50,74 | mg/kg de MS | Fluoranthène | 0,39 | mg/kg de MS |
| Cu | 207 | mg/kg de MS | Benzo(b)fluoranthène | 0,3 | mg/kg de MS |
| Hg | NC | mg/kg de MS | Benzo(a)pyrène | 0,19 | mg/kg de MS |
| Ni | 22,41 | mg/kg de MS | | | |
| Pb | 43 | mg/kg de MS | | | |
| Zn | 433 | mg/kg de MS | | | |
| Se | NC | mg/kg de MS | | | |

Annexe II. Contributions de la phase de fabrication des engrais minéraux

Tableau 20. Inventaire de l'étape de fabrication du triple superphosphate

| Unit process inventory for: triple superphosphate, as P2O5, at regional storehouse, RER | | | | | | |
|---|-----------------------------|------|----------|-------------|--------|-------------------|
| Exchanges | Location/Category | Unit | Value | Uncert Type | SD 95% | Uncert Scores |
| heat, natural gas, at industrial furnace >100kW | RER | MJ | 1.46E+00 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| electricity, medium voltage, production UCTE, at grid | UCTE | kWh | 7.52E-01 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| transport, transoceanic freight ship | OCE | tkm | 1.08E+01 | 1 | 2.09 | (4,5,na,na,na,na) |
| transport, freight, rail | RER | tkm | 1.25E+00 | 1 | 2.09 | (4,5,na,na,na,na) |
| transport, lorry 32t | RER | tkm | 1.93E+00 | 1 | 2.09 | (4,5,na,na,na,na) |
| phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant | MA | kg | 9.86E-01 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| phosphate rock, as P2O5, beneficiated, dry, at plant | MA | kg | 3.00E-01 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| chemical plant, organics (I) | RER | unit | 8.33E-10 | 1 | 3.01 | (2,1,1,2,1,3) |
| Zinc, ion | water/river | kg | 2.60E-05 | 1 | 5.11 | (2,3,2,3,3,5) |
| Lead | water/river | kg | 1.90E-05 | 1 | 5.11 | (2,3,2,3,3,5) |
| Nickel, ion | water/river | kg | 1.70E-05 | 1 | 5.11 | (2,3,2,3,3,5) |
| Mercury | water/river | kg | 4.20E-06 | 1 | 5.11 | (2,3,2,3,3,5) |
| Copper, ion | water/river | kg | 2.20E-05 | 1 | 5.11 | (2,3,2,3,3,5) |
| Chromium, ion | water/river | kg | 2.20E-05 | 1 | 5.11 | (2,3,2,3,3,5) |
| Cadmium, ion | water/river | kg | 4.40E-06 | 1 | 5.11 | (2,3,2,3,3,5) |
| Arsenic, ion | water/river | kg | 4.40E-06 | 1 | 5.11 | (2,3,2,3,3,5) |
| Phosphate | water/river | kg | 4.42E-03 | 1 | 1.63 | (2,3,2,3,3,5) |
| Hydrogen fluoride | air/high population density | kg | 1.05E-04 | 1 | 1.63 | (2,3,2,3,3,5) |
| Particulates, > 10 um | air/high population density | kg | 5.42E-04 | 1 | 1.63 | (2,3,2,3,3,5) |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | air/high population density | kg | 5.42E-04 | 1 | 2.10 | (2,3,2,3,3,5) |
| Particulates, < 2.5 um | air/high population density | kg | 2.71E-04 | 1 | 3.10 | (2,3,2,3,3,5) |
| Heat, waste | air/high population density | MJ | 2.71E+00 | 1 | 1.31 | (2,3,2,3,3,5) |
| triple superphosphate, as P2O5, at regional storehouse | RER | kg | 1.00E+00 | | | |

Tableau 21. Inventaire de l'étape de fabrication de l'ammonium nitrate

| Unit process inventory for: ammonium nitrate, as N, at regional storehouse, RER | | | | | | |
|---|-----------------------------|------|-----------|-------------|--------|-------------------|
| Exchanges | Location/Category | Unit | Value | Uncert Type | SD 95% | Uncert Scores |
| transport, freight, rail | RER | tkm | 1.71E+00 | 1 | 2.09 | (4,5,na,na,na,na) |
| transport, lorry 32t | RER | tkm | 2.86E-01 | 1 | 2.09 | (4,5,na,na,na,na) |
| ammonia, steam reforming, liquid, at plant | RER | kg | 6.09E-01 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| nitric acid, 50% in H2O, at plant | RER | kg | 2.25E+00 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| chemical plant, organics (I) | RER | unit | 1.14E-09 | 1 | 3.01 | (2,1,1,2,1,3) |
| Ammonium, ion | water/river | kg | 7.36E-04 | 1 | 1.63 | (2,3,2,3,3,5) |
| Ammonia | air/high population density | kg | 5.71E-04 | 1 | 1.63 | (2,3,2,3,3,5) |
| Particulates, > 10 um | air/high population density | kg | 5.71E-04 | 1 | 1.63 | (2,3,2,3,3,5) |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | air/high population density | kg | 2.86E-04 | 1 | 2.10 | (2,3,2,3,3,5) |
| Particulates, < 2.5 um | air/high population density | kg | 5.71E-04 | 1 | 3.10 | (2,3,2,3,3,5) |
| Heat, waste | air/high population density | MJ | -2.40E+00 | 1 | 1.31 | (2,3,2,3,3,5) |
| ammonium nitrate, as N, at regional storehouse | RER | kg | 1.00E+00 | | | |

Tableau 22. Inventaire de l'étape de fabrication du sulfate de potassium

| Unit process inventory for: potassium sulphate, as K2O, at regional storehouse, RER | | | | | | |
|---|-----------------------------|------|----------|-------------|--------|-------------------|
| Exchanges | Location/Category | Unit | Value | Uncert Type | SD 95% | Uncert Scores |
| heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW | RER | MJ | 5.76E+00 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| electricity, medium voltage, production UCTE, at grid | UCTE | kWh | 1.22E-01 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| transport, freight, rail | RER | tkm | 1.20E+00 | 1 | 2.09 | (4,5,na,na,na,na) |
| transport, lorry 32t | RER | tkm | 2.00E-01 | 1 | 2.09 | (4,5,na,na,na,na) |
| potassium chloride, as K2O, at regional storehouse | RER | kg | 1.03E+00 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| sulphuric acid, liquid, at plant | RER | kg | 1.13E+00 | 1 | 1.09 | (2,1,1,2,1,3) |
| chemical plant, organics (I) | RER | unit | 8.00E-10 | 1 | 3.01 | (2,1,1,2,1,3) |
| Particulates, > 10 um | air/high population density | kg | 3.76E-08 | 1 | 1.63 | (2,3,2,3,3,5) |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | air/high population density | kg | 1.65E-08 | 1 | 2.10 | (2,3,2,3,3,5) |
| Particulates, < 2.5 um | air/high population density | kg | 1.19E-08 | 1 | 3.10 | (2,3,2,3,3,5) |
| Heat, waste | air/high population density | MJ | 4.40E-01 | 1 | 1.31 | (2,3,2,3,3,5) |
| potassium sulphate, as K2O, at regional storehouse | RER | kg | 1.00E+00 | | | |

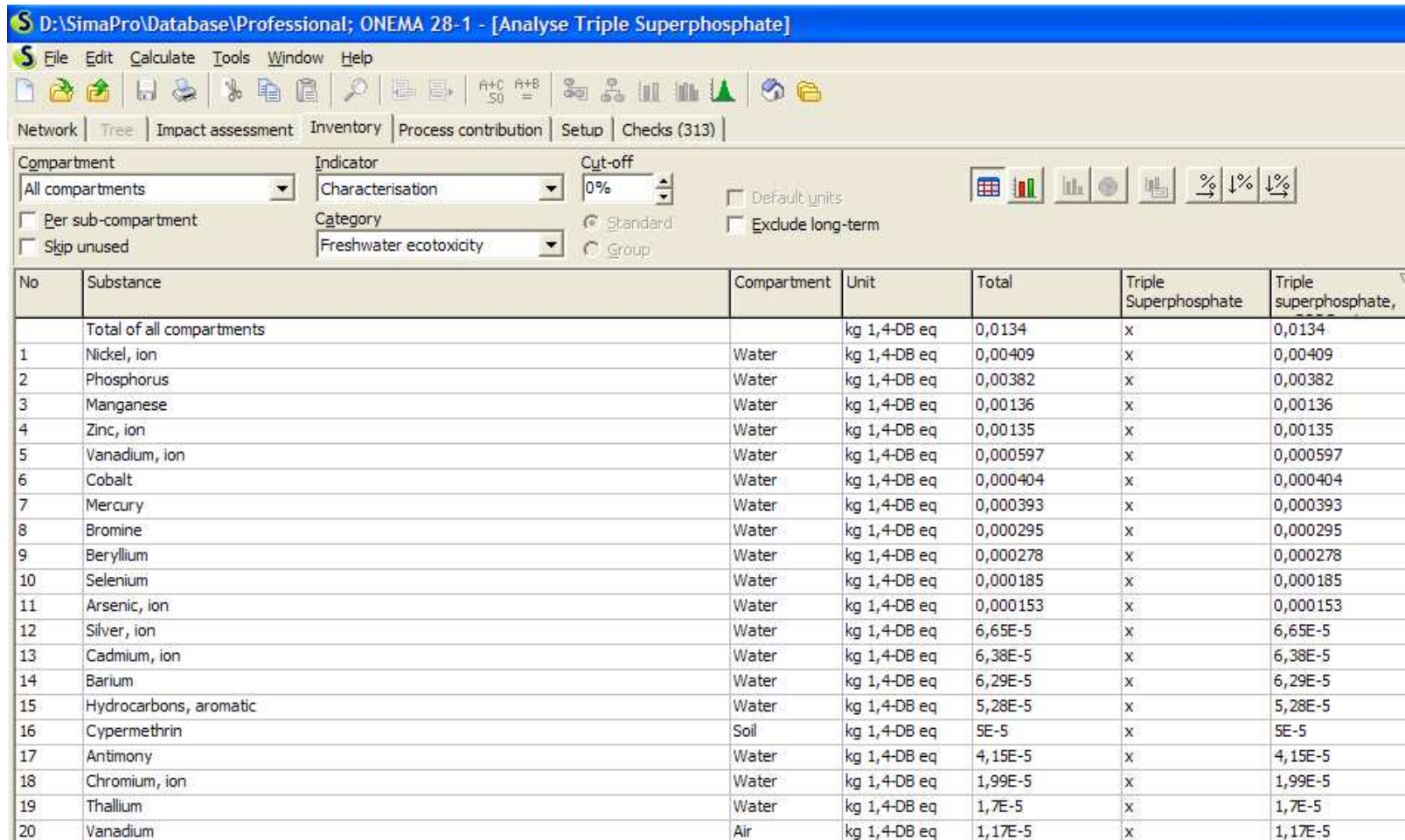


Figure 11. Détail de la contribution à l'impact Ecotoxicité d'Eau douce de la fabrication du Triple Superphosphate. ReCiPe (H)

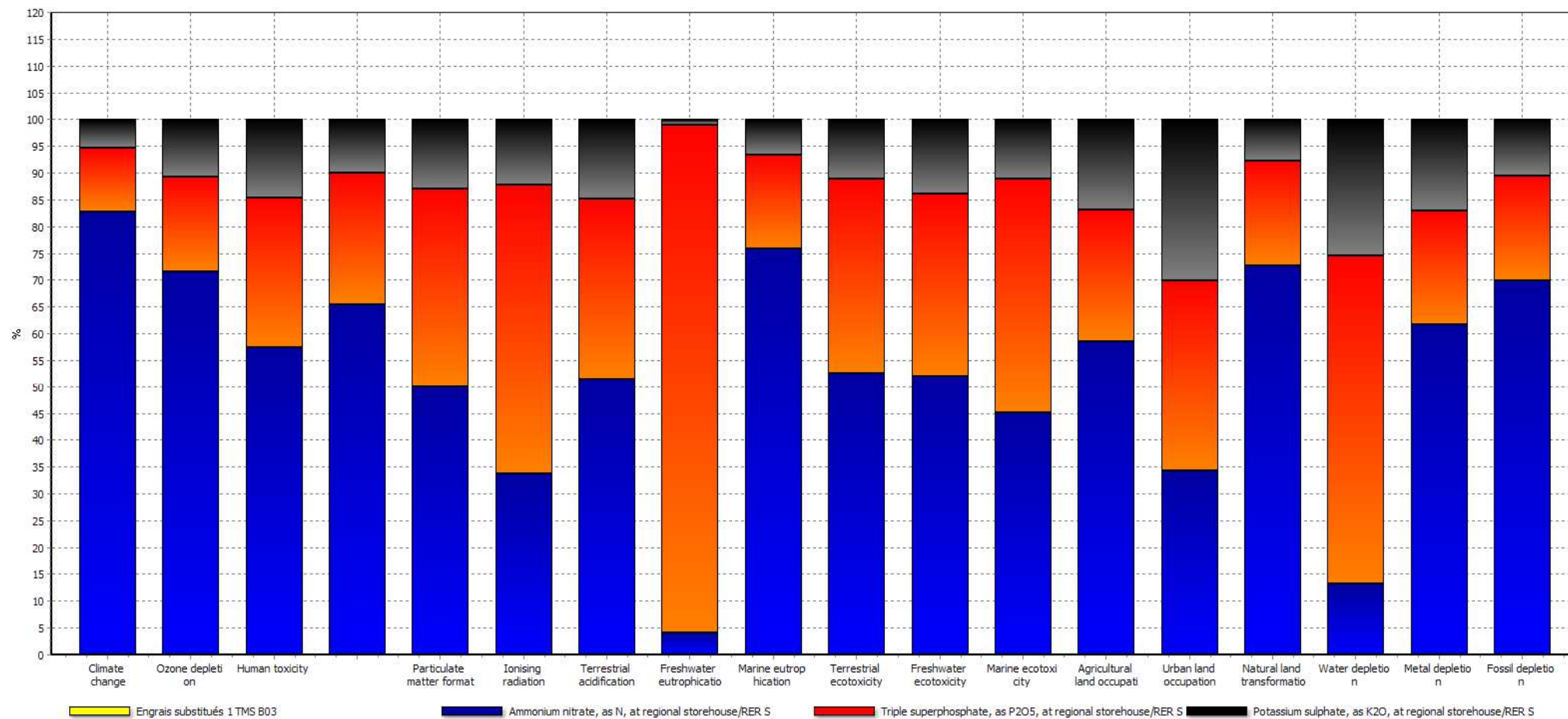


Figure 12. Analyse globale des contributions (étape de fabrication) des engrais minéraux N, P, K substitués par une boue de type B03



Les auteurs du présent rapport sont membres du pôle ELSA (www.elsa-lca.org). Ils remercient à ce titre tous les autres membres du pôle pour leurs conseils éclairés.

Cemagref, UMR ITAP

361, rue J.F. Breton - BP 5095
34196 Montpellier Cedex 5, France

Tél. : +33 (0)4 67 04 63 00 - Fax. +33 (0)4 67 16 64 40