

Partenariat 2010 – Domaine : Ecotechnologies et pollutions
Action 28-1 « Analyse environnementale de cycle de vie du système assainissement »

Modèle ACV – Filière de traitement des eaux usées par filtres plantés de roseaux à flux verticaux (FPRv)

Rapports d'ACV et données d'inventaire

Rapport d'étape



Eva RISCH, Catherine BOUTIN, Philippe ROUX et Alain HEDUIT

Cemagref

Octobre 2011

Contexte de programmation et de réalisation

L'efficacité d'une station de traitement des eaux usées se mesure classiquement par la qualité de ses rejets dans les milieux aquatiques. Mais ce traitement est obtenu au prix d'autres impacts environnementaux qui se produisent lors de la construction, de l'exploitation, du fonctionnement et du démantèlement du système d'assainissement dans sa globalité. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) environnementale est la seule méthode d'évaluation, capable de quantifier ces impacts sur l'ensemble du cycle de vie du système. Associée à des approches plus locales telles que les études d'impacts qui prennent mieux en compte les spécificités du site, l'ACV permet d'éviter les transferts de pollution.

Afin que l'ACV puisse devenir progressivement un indicateur supplémentaire décisionnel d'un choix objectif, il convient de l'appliquer progressivement aux différents systèmes d'assainissement tout en améliorant la méthodologie. C'est dans ce contexte que l'ONEMA a confié au Cemagref cette action visant à développer les connaissances et à proposer des outils et des méthodes autour de l'approche ACV des systèmes d'assainissement.

Ce rapport doit être considéré comme un « Rapport d'étape » présentant l'avancé des travaux réalisés en 2010 dans le cadre de l'action 28-1. Les travaux présentés ici se poursuivent dans le cadre d'une action Onema-Cemagref 2011. Ils permettront la réalisation de rapports consolidés et de communications scientifiques ou techniques diffusables en externe.

Les auteurs

Eva RISCH¹, Catherine BOUTIN², Philippe ROUX¹ et Alain HEDUIT³

1. Cemagref Montpellier (34), UMR ITAP, pôle ELSA (www.elsa-lca.org)
2. Cemagref Lyon (69), UR MALY, Milieux Aquatiques, Ecologie et Pollutions
3. Cemagref Antony (92), UR HBAN, Hydrosystèmes et bioprocédés

Les correspondants

Onema : Stéphane Garnaud stephane.garnaud@onema.fr

Cemagref : Philippe Roux, Cemagref ITAP, pôle ELSA, philippe.roux@cemagref.fr

| | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| Droits d'usage : | Accès libre |
| Couverture géographique : | France |
| Niveau géographique : | National |
| Niveau de lecture : | Public Onema – Cemagref et Copil |
| Nature de la ressource : | Rapport d'étape |

ERRATA- 20 Juin 2013

Au paragraphe 8.3 *Bilan matière du système FPRv*, la quantité de carbone entrant précédemment 45 g de C-org et 5 g de C-minéral, devient égale à 50 g répartis en 43.13 g de C-org et 1,875 g de C-minéral. Le raisonnement est explicité pp.34-35 et les hypothèses de répartition des différentes formes carbonées sont explicitées à la Figure 15.

Tableau 12 (p.31) modifié : Les dernières versions de la méthode ReCiPe (v1.07 & v1.08) ne permettent pas la caractérisation de la DCO (ou de la DBO5) ni des ions carbonates.

Le bilan matière au Tableau 15 (p.33) est modifié en conséquence.

Modèle ACV – Filière de traitement des eaux usées par filtres plantés de roseaux à flux verticaux (FPRv)

Rapports d'ACV et données d'inventaire

Rapport d'étape

Eva RISCH, Catherine BOUTIN, Philippe ROUX et Alain HEDUIT

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. RESUME | 5 |
| 2. ABSTRACT | 6 |
| 3. SYNTHÈSE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE | 7 |
| 4. GLOSSAIRE | 8 |
| 5. ABREVIATIONS | 8 |
| 6. INTRODUCTION | 9 |
| 6.1. AVANT PROPOS | 9 |
| 6.2. DESCRIPTION D'UNE FILIERE DE TRAITEMENT DES EAUX USEES DOMESTIQUES PAR FILTRES PLANTES DE ROSEAUX..... | 9 |
| 7. OBJECTIFS ET CHAMP DE L'ETUDE | 11 |
| 7.1. DESCRIPTION DE L'ETUDE..... | 11 |
| 7.2. UNITE FONCTIONNELLE ET FUTURE BASE DE COMPARAISON INTER-CLASSES DE CAPACITE | 12 |
| 7.3. FRONTIERES DU SYSTEME ETUDIE | 12 |
| 7.4. DESCRIPTION DES AFFLUENTS ET EFFLUENTS DES STEU | 13 |
| 7.5. BOUES GENEREES EN SORTIE DE STEU..... | 16 |
| 7.6. FIN DE VIE DES BOUES..... | 17 |
| 7.7. DESCRIPTION ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME FPRV | 17 |
| 8. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE DE LA STEU | 23 |
| 8.1. DECOUPAGE DU SYSTEME FPRV | 23 |
| 8.2. INVENTAIRE (LCI) DE LA STEU FPRV 806 EH | 26 |
| 8.3. BILAN DE MATIERE DU SYSTEME FPRV | 32 |
| 8.4. FIN DE VIE DES BOUES : MODULE EPANDAGE/COMPOSTAGE..... | 38 |
| 9. EVALUATION DES IMPACTS (LCIA) | 41 |
| 10. CONCLUSIONS..... | 46 |
| 11. ANNEXES..... | 48 |
| 11.1. REFERENCES | 48 |
| 11.2. ANNEXES TECHNIQUES..... | 49 |

Modèle ACV – Filière de traitement des eaux usées par filtres plantés de roseaux à flux verticaux (FPRv)

Rapports d'ACV et données d'inventaire

Rapport d'étape

Eva RISCH, Catherine BOUTIN, Philippe ROUX et Alain HEDUIT

1. Résumé

RESUME

Le présent rapport d'étape concerne l'analyse environnementale de cycle de vie (ACV) d'une filière de traitement des eaux usées domestiques par Filtres plantés de roseaux à flux verticaux (FPRv). Les données d'inventaire relatives à la construction et opération d'une station d'épuration mettant en œuvre ce procédé de traitement sont compilées dans ce document. Cette action a nécessité une collaboration étroite entre les spécialistes de l'évaluation environnementale et les experts des filières d'épuration des eaux usées du Cemagref.

MOTS CLES

Analyse du cycle de vie, ACV, filtres plantés de roseaux à flux verticaux, station d'épuration, eaux usées, France rurale

**LCA model – Wastewater treatment plant with Constructed Wetland technology
(using vertical flow reed beds)**

LCA study and inventory data

Progress report

Eva RISCH, Catherine BOUTIN, Philippe ROUX and Alain HEDUIT

2. Abstract

ABSTRACT

The present document scopes the LCA (Life Cycle Assessment) of a Constructed Wetland (CW) treatment technology designed for domestic sewage. Inventory data relative to construction and operation of such a wastewater treatment plant are described in this document. This action required a close collaboration between Cemagref specialists in environmental assessment and experts in sanitation.

KEY WORDS

Life Cycle Assessment, LCA, constructed wetland, vertical flow reed beds, wastewater treatment plant, sewage, rural France

Modèle ACV – Filière de traitement des eaux usées par filtres plantés de roseaux à flux verticaux (FPRv)

Rapports d'ACV et données d'inventaire

Rapport d'étape

Eva RISCH, Catherine BOUTIN, Philippe ROUX et Alain HEDUIT

3. Synthèse pour l'action opérationnelle

L'action 28-1 engagée en 2010 sur l'analyse environnementale de cycle de vie (ACV) du système assainissement a permis de réaliser les premières ACV du système. Elle a ainsi permis d'identifier les trous de connaissances et les manques méthodologiques pour mener à bien ce type d'approche. Cette action se poursuit en 2011 (action 24) en y incluant les travaux complémentaires suivants.

A1 – Finalisation de l'interprétation des résultats obtenus en 2010.

A2 – Rédaction d'un avant projet de recommandations pour la conduite des ACV de systèmes d'épuration.

A3 – Etablissement d'un cahier des charges de calculateur simplifié d'ACV de systèmes d'assainissement.

A4 – Réalisation d'ACV complémentaires de STEU (FPRv et BA) pour enrichir le calculateur simplifié (A3) et évaluer certains effets (échelle, qualité des rejets, ...) sur les performances environnementales des STEU.

A5 – Présentation lors d'un colloque.

Les premiers acquis transférables (implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, limites de l'utilisation) ne pourront donc être obtenus qu'en 2011. Dans ce contexte, le présent rapport d'étape a un caractère confidentiel.

Autres rapports concernant cette action :

| Rapports ONEMA | | Date | STATUT de diff. | Actions concernées, Commentaires |
|----------------|--|--------------------|---------------------|-------------------------------------|
| acv01_onema | Rapport de synthèse Action 28-1 (2010) – version non diffusable en externe | 9 Mars 2011 | CONFIDENTIEL | Regroupement des RTI 01 à 05 |
| acv02_onema | Modèle ACV – Filière de traitement des eaux usées par par Boues Activées (BA) - <i>Rapports d'ACV et données d'inventaire</i> | Août 2011 | CONFIDENTIEL | |

4. Glossaire

Charge hydraulique : débit journalier reçu par la station sous forme de hauteur d'eau (exprimée en m³/jour).

Charge organique : masse journalière de pollution reçue par la station (exprimée en kg/jour). La charge organique peut être calculée à partir de la DBO₅ ou de la DCO.

Equivalent-Habitant (EH) : défini par la Directive Européenne Eaux Résiduaires Urbaines (DERU) comme une charge journalière correspondant à 60 g de DBO₅. On dérive ensuite la DCO de la DBO₅ des eaux brutes par le ratio DCO/DBO₅, qui peut varier entre 1,5 et 3 selon la biodégradabilité des eaux brutes. D'après (Doka, 2007), en ce qui concerne les eaux brutes Suisses, le ratio DCO/DBO₅ utilisé est pris égal à 1,5 ; ce qui est très différent des ratios habituellement utilisés pour les EH Français, entre 2 et 2,4.

Habitant (hab.) : définit une charge de pollution journalière d'un Français moyen en milieu rural, ce qui correspond d'après (Canler et Perret, 2007) à : 50 g de DBO₅ et 120 g de DCO dans 150 L d'eau consommée. Ceci correspond à un ratio DCO/DBO₅ de 2,4.

5. Abréviations

ACV : Analyse de Cycle de Vie

BA : Boues Activées

CTO : Composés Traces Organiques

DBO₅ : Demande Biochimique en Oxygène, mesurée sur 5 jours

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DERU : Directive Européenne Eaux Résiduaires Urbaines. Directive n°91/271/CEE du 21 mai 1991.

ETM : Eléments Traces Métalliques

FPRv : Filtres Plantés de Roseaux à flux verticaux

STEU : Station d'Épuration des Eaux Usées

6. Introduction

6.1. Avant Propos

Cette étude se donne l'objet de réaliser l'inventaire des impacts environnementaux (LCI) de la filière de traitement par filtres plantés de roseaux. Ces données seront ensuite intégrées en une suite logicielle de modules permettant de reconstituer le ou les système(s) d'assainissement d'intérêt, afin de les comparer par l'approche Analyse de Cycle de Vie (ACV).

6.2. Description d'une filière de traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés de roseaux

Les filtres plantés de roseaux se classent parmi les filières de *traitement biologique à cultures fixées sur supports fins* (gravier, sable) alimentés à l'air libre.

DESCRIPTIF D'ENSEMBLE

Les stations de traitement des eaux usées (STEU) par filtres plantés de roseaux sont le plus souvent constituées au minimum de deux étages en série. Un premier étage, constitué d'au moins 3 filtres en parallèle, et d'un deuxième étage constitué de 2 filtres eux aussi en parallèle.

Le premier étage est constitué de 3 couches de gravier (Figure 1) :

- une couche filtrante (gravier fin), retenant les matières en suspension (MES) formant des boues,
- une couche de transition qui évite la migration du gravier vers la couche inférieure,
- une couche drainante avec des graviers plus gros, permettant un drainage des eaux qui percolent au sein du massif filtrant.

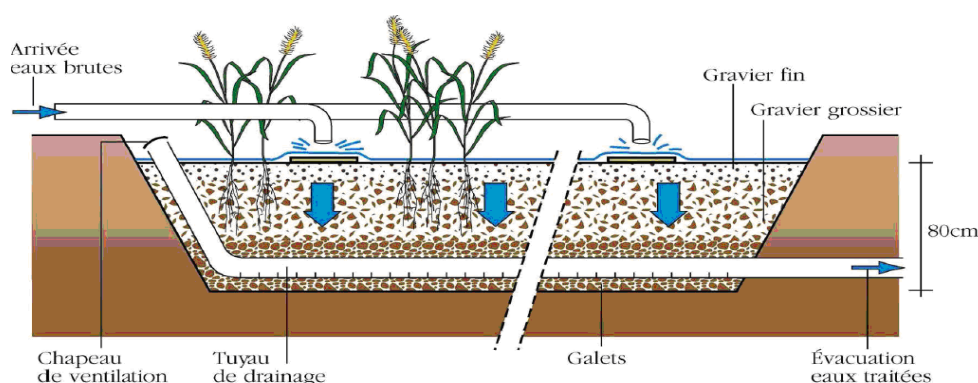


Figure 1. Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement vertical

Au deuxième étage, on retrouve aussi une couche filtrante (sable), une couche de transition ainsi qu'une couche drainante. L'évacuation de l'eau traitée s'effectue dans cette dernière par un réseau de drains à fentes.

Les 2 étages sont plantés des mêmes espèces de roseaux *Phragmites Australis*. Ces derniers ont une densité respective de 4 plants/m² et 2 plants/m². Il est conseillé de planter la totalité de la surface. Les roseaux faucardés sont généralement broyés et associés à d'autres végétaux pour du compost végétal ou brûlés sur place.

Le rôle des roseaux est principalement mécanique. Le développement dense des tiges de roseaux qui partent des nœuds des rhizomes (tiges souterraines) et viennent percer la couche de dépôts superficiels, crée des cheminements d'air (et d'eau) qui se prolongent jusque dans la couche drainante, permettant ainsi le traitement direct des eaux usées domestiques brutes, c'est-à-dire non décantées.

On conseille de prévoir un curage des boues lorsqu'elles atteignent une hauteur supérieure à 20 cm, ce qui correspond à un fonctionnement de 14 ans pour une STEU à charge maximale. L'évacuation peut se faire à l'aide d'une pelleteuse ou d'un tractopelle équipé d'un godet assez large et tranchant pour éviter de déstabiliser le massif filtrant en arrachant le système racinaire des roseaux.

L'étanchéité des bassins est généralement réalisée à l'aide d'une géomembrane qui couvre le fond et les abords du filtre, remontant sur les talus. Un géotextile de protection est placé de chaque côté de la géomembrane. Cette dernière pouvant être percée à long terme par des rhizomes, un écran anti-racinaire est conseillé entre le géotextile et la géomembrane.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les principaux mécanismes de traitement s'appuient sur la combinaison de plusieurs processus en conditions aérobies, qui se déroulent successivement sur les deux étages de traitement en série.

PRINCIPE PHYSIQUE DE FONCTIONNEMENT DES FILTRES PLANTES A FLUX VERTICAL

Le premier étage reçoit les eaux usées par bâchées. Il est fractionné en 3 filtres parallèles et est soumis alternativement à deux phases. La première phase, dite d'alimentation dure 3-4 jours, où les eaux alimentent un seul filtre sur trois, puis s'ensuit une phase de repos, dont la durée est deux fois supérieure à celle de la phase d'alimentation.

Les eaux percolent verticalement à travers les filtres. L'effluent subit alors une première étape de filtration permettant une rétention physique des matières en suspension (MES) à la surface du 1^{er} étage. On observe ainsi une accumulation de boues en surface.

Pour le deuxième étage, les temps de repos et de fonctionnement sont équivalents. La rotation s'effectue le plus souvent tous les 3-4 jours. Le principe de fonctionnement est le même qu'au premier étage, mais il n'y a pas accumulation de boues. Le deuxième étage joue un rôle de filtre plus puissant et son rôle principal est d'assurer la nitrification.

PRINCIPE BIOLOGIQUE DE FONCTIONNEMENT DES FILTRES PLANTES A FLUX VERTICAL

La pollution organique est dégradée par les bactéries hétérotrophes en milieu aérobie. Les substances sont d'abord hydrolysées en molécules simples. Celles-ci sont alors utilisées par les bactéries comme source d'énergie dans des réactions biologiques, nécessitant la présence d'un oxydant, le plus souvent l'oxygène.

La capacité d'oxygénation est telle que les filtres du premier étage dégradent une grosse partie de la fraction carbonée mais une nitrification partielle est également notée. Le deuxième étage vient alors affiner la dégradation de la fraction carbonée et complète la nitrification en fonction des conditions d'oxygénation, de la température et du pH.

Les conditions aérobies n'autorisent pas la dénitrification dans ces dispositifs. La déphosphatation également, n'est pas un objectif atteignable du fait des faibles capacités d'adsorption des matériaux essentiellement siliceux et de l'assimilation négligeable des plantes au regard des charges appliquées. Sauf dispositions spéciales, la décontamination est quasi nulle au regard des faibles temps de séjour des effluents dans le système.

7. Objectifs et champ de l'étude

7.1. Description de l'étude

La présente étude reprend une évaluation ACV préliminaire (Dufour, 2009) des performances environnementales d'une filière « Filtres Plantés de Roseaux à écoulement Vertical » (FPRv). Cette étude s'appuie sur des données réelles de STEU françaises, pour le traitement des eaux usées domestiques.

Un grand nombre d'objectifs combinés peuvent être assignés à la réalisation d'une ACV de ce type de filière. Le Tableau 1 présente certains de ces objectifs.

Tableau 1. Objectifs potentiels assignés à une ACV de la filière FPRv

| | |
|----|--|
| O1 | Comparer la filière « Filtres plantés de roseaux à flux vertical » avec une filière de référence la plus utilisée en France (Boues activées) |
| O2 | Comparer une station type « Filtres plantés de roseaux à flux vertical » avec la référence « absolue » qui est le rejet direct des eaux usées dans le milieu naturel, sans traitement quelconque |
| O3 | Identifier au sein de la filière « Filtres plantés de roseaux à flux vertical » les impacts environnementaux les plus concernés |
| O4 | Identifier au sein de la filière « Filtres plantés de roseaux à flux vertical » les contributions respectives des différentes étapes du cycle de vie (construction, exploitation, démantèlement) et à l'intérieur de chacune des principaux postes concernés |
| O5 | Comparer une filière « Filtres plantés de roseaux à flux vertical » spécifique avec les autres variantes du système (flux horizontal, etc.) |
| O6 | Rechercher une filière optimum pour traiter les effluents domestiques pour différentes gammes de nombre d'habitants (par ex. < 500, 1 000 – 5 000, > 5 000) |
| O7 | Quantifier les contributions respectives de la collecte et du traitement des eaux usées domestiques |
| O8 | Comparer la filière « Filtres plantés de roseaux à flux vertical » avec toutes les autres filières |

Dans le cadre de la présente étude, les objectifs 1 à 4 (Tableau 1) sont retenus. Les objectifs 5 à 8 ont été placés en priorité 2 et feront l'objet d'une étude ultérieure (rapports en préparation).

Cette étude a pour but de poser les bases de l'inventaire (LCI) des émissions et extractions au cours du cycle de vie standard d'un module de traitement d'eaux usées domestiques par FPRv. Ce module pourra ensuite être incorporé au système « global » d'assainissement, et pourra être ultérieurement complété par un autre module de traitement tertiaire.

7.2. Unité Fonctionnelle et future base de comparaison inter-classes de capacité

Selon la norme EN ISO 14044, de juillet 2006, l'Unité Fonctionnelle est la performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une ACV.

Le principal service rendu de la filière FPRv est le traitement des eaux usées (de charge polluante définie) pour des petites collectivités.

Afin de pouvoir mener à bien par la suite, la comparaison inter-classes¹ entre différentes STEU de capacité variable, il est nécessaire d'identifier une base de comparaison fiable sur les capacités des systèmes étudiés.

Dans la base de données Ecoinvent, l'Unité Fonctionnelle retenue² est le m³ d'eau usée. Cependant, les volumes et les concentrations en polluants des eaux usées étant très différents selon le contexte géographique (la pollution organique est plus diluée en Suisse qu'en France), nous avons retenu d'établir une comparaison des deux STEU sur la base de la même charge polluante exprimée par le **kg de DBO₅ par jour**.

Le modèle représentant la STEU FPRv est défini pour le traitement d'une charge de pollution organique entrante en station de **48,36 kg DBO₅/j**. On considère un contexte français en milieu rural (50 g DBO₅/j³), dans lequel l'habitant génère une pollution journalière évaluée à 50 g DBO₅ dans 150 L d'eau.

Cette charge organique correspond à une capacité de $48,36 \cdot 10^3 / 50 = \mathbf{967,2 \text{ habitants}}$, ou de **806 Equivalents-Habitant (EH)**, si l'on prend le contexte suisse pour lequel sont définies les STEU à Boues Activées, disponibles dans Ecoinvent.

La charge hydraulique est égale à $967,2 \cdot 0,15 = \mathbf{145 \text{ m}^3/\text{j}}$, un Français consommant 150 L d'eau/j.

La valeur de la DBO₅ des eaux usées est donc donnée par le rapport Charge Organique (kg DBO₅) / Charge Hydraulique (m³/j), soit $48,36 \cdot 10^3 / 145 = \mathbf{333.5 \text{ mg/L}}$. Ceci est cohérent avec la valeur guide donnée par le Groupe Macrophytes et Traitement des Eaux⁴, pour un milieu rural / réseau séparatif.

La technologie utilisée dans la filière filtres plantés de roseaux, basée sur le traitement biologique à cultures fixées sur supports fins (gravier, sable) alimentés à l'air libre, peut être décrite par 3 étapes : filtration physique par percolation à travers le média filtrant, dégradation aérobie au 1^{er} étage (assimilation des matières organiques (M.O.) et nitrification partielle par les bactéries nitrifiantes), puis nitrification plus poussée des M.O. restantes sur le 2^e étage.

7.3. Frontières du système étudié

Le modèle de STEU FPRv reprend les mêmes frontières définies par Dufour (2009), qui permettent de réaliser une comparaison fidèle avec les STEU à Boues Activées disponibles dans Ecoinvent. Le périmètre retenu est illustré à la Figure 2 et comprend :

- la STEU et les activités qui lui sont associées (production de réactifs et d'énergie, transports, etc.) ;
- la stabilisation et l'élimination (épandage / incinération / mise en décharge) des boues.

¹ Ce sera l'objet du rapport acv04_onema « ACV comparative FPRv vs. BA ».

² Le rapport RTI.02 (Chapitre 4) avait présenté une discussion sur les Unités Fonctionnelles.

³ Recommandation Cemagref : hypothèse sur la charge organique retenue d'un E.H. générant 50 g de DBO₅/j en milieu rural, d'après des mesures Cemagref. La Directive ERU du 21/05/1991 propose une valeur plus conservatrice de 1 E.H. \equiv 60 g DBO₅/j.

⁴ Groupe Macrophytes et Traitement des Eaux (Ouvrage Collectif), 2005, Epuration des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes - Recommandations techniques pour la conception et la réalisation, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, pp.12-13.

Le réseau de collecte est exclu des périmètres d'étude des modèles ACV des STEU puisque l'objet de cette étude ACV est d'évaluer les performances environnementales de la STEU, et que pour cela nous pouvons poser l'hypothèse que le réseau de collecte sera le même quelle que soit la filière de traitement des eaux domestiques étudiée.

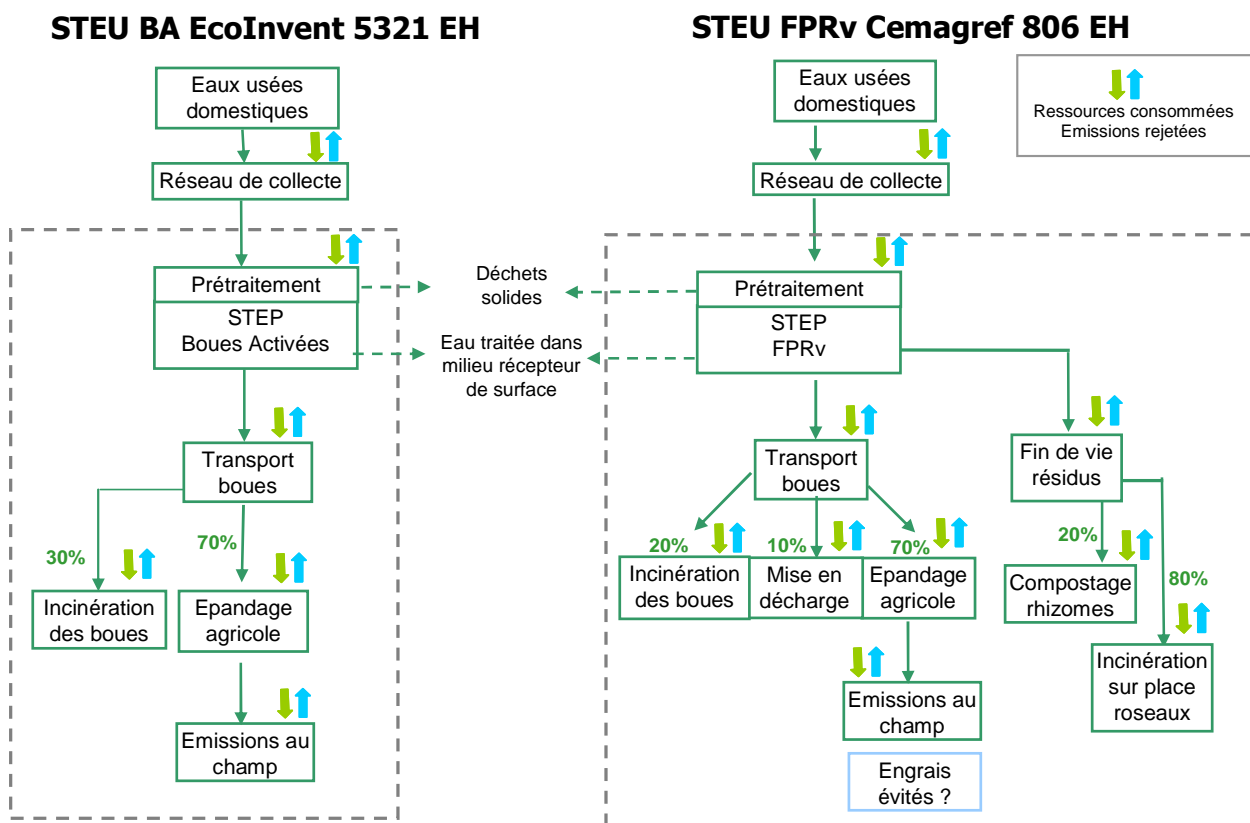


Figure 2. Frontières considérées pour les modèles ACV de STEU

Le Chapitre 5 de la partie IV de la base de données Ecoinvent sur les traitements des eaux usées (Doka, 2007) renseigne sur les fins de vie estimées des boues de STEU suisses de différentes classes. Ainsi, pour une Classe 5 (d'après une extrapolation des données de 1994), les boues digérées sont en majorité (70.65 % en matière sèche) utilisées en fertilisants pour l'agriculture.

7.4. Description des affluents et effluents des STEU

Le but principal d'une station est de traiter un certain volume d'eau usée avec une performance épuratoire déterminée. Or, cette performance dépend :

- de la qualité de l'eau brute en entrée de station. Celle-ci est composée d'une matrice de polluants (DCO, azote, phosphore, ...) caractérisée par une charge et une concentration ;
- du niveau de rejet exigé qui dépend des objectifs de qualité imposés par la sensibilité du cours d'eau.

La principale fonction d'une STEU, la fonction épuratoire, est donc conditionnée par la qualité de l'eau en entrée de station, et par la sensibilité du milieu naturel récepteur de l'effluent traité.

Les compositions moyennes des affluents et effluents (en g/m³) des STEU modélisées sont renseignées aux Tableau 2 et Tableau 3.

Tableau 2. Compositions moyennes des affluents/effluents d'une STEU BA de référence Ecoinvent

| Entrée et sortie de la STEU de référence Ecoinvent, Doka (2007) | | | | | |
|--|-------------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-------|
| Affluent moyen (g/m3) | | | Effluent moyen (g/m3) | | |
| | DBO ₅ | 103,6 | | DBO ₅ | 8,29 |
| | DCO | 155,4 | | DCO | 27,97 |
| | COD | 45,75 | | COD | 6,52 |
| | COT | 67,3 | | COT | 6,52 |
| | N-NH ₄ | 14,95 | | N-NH ₄ | 8,75 |
| Noxy | N-NO ₂ | 0,40 | Noxy | N-NO ₂ | 0,20 |
| | N-NO ₃ | 1,05 | | N-NO ₃ | 11,12 |
| Norg | Norg, solv. | 8,39 | Norg | Norg, solv. | 0,00 |
| | Npart | 3,28 | | Npart | 0,50 |
| | Norg, total | 11,67 | | Norg, total | 0,50 |
| P | P-PO ₄ solv. | 2,459 | P | P-PO ₄ solv. | 1,273 |
| | P-Part | 0,615 | | P-Part | 0,00 |
| | PT | 3,074 | | PT | 1,273 |

Tableau 3. Compositions moyennes des affluents/effluents d'une STEU FPRv

| Entrée et sortie de la STEU FPRv Cemagref (2010) | | | | | |
|---|-------------------------|-------|-----------------------|-------------------------|-------|
| Affluent moyen (g/m3) | | | Effluent moyen (g/m3) | | |
| | DBO ₅ | 333 | | DBO ₅ | 12,47 |
| | DCO | 800 | | DCO | 80,0 |
| | COD | NC | | COD | NC |
| | COT | NC | | COT | NC |
| | N-NH ₄ | 50,00 | | N-NH ₄ | 1,67 |
| Noxy | N-NO ₂ | 0,00 | Noxy | N-NO ₂ | 0,00 |
| | N-NO ₃ | 0,00 | | N-NO ₃ | 41,53 |
| Norg | Norg, solv. | 10,00 | Norg | Norg, solv. | 12,00 |
| | Npart | 6,67 | | Npart | 0,50 |
| | Norg, total | 16,67 | | Norg, total | 12,00 |
| P | P-PO ₄ solv. | 10,67 | P | P-PO ₄ solv. | 10,00 |
| | P-Part | 2,67 | | P-Part | 0,00 |
| | PT | 13,33 | | PT | 10,00 |

Lors d'une comparaison ACV de deux procédés de traitement, il est important que les systèmes de traitement considérés remplissent les mêmes fonctions notamment en ce qui concerne le traitement des eaux usées entrantes, dont les qualités viennent d'être décrites aux Tableau 2 et Tableau 3.

Ces compositions d'affluents et effluents sont converties en g/j/EH (ou /hab si on considère un contexte français rural) en multipliant les valeurs en g/m³ par la consommation journalière en eau d'un habitant Suisse et Français, respectivement 0.553 m³/j et 0,150 m³/j. Elles sont détaillées aux Tableau 4 et Tableau 5.

Il est prévu d'intégrer des paramètres de suivi en éléments traces métalliques (ETM), et d'en tenir compte dans les bilans de matière lorsque des données sur leurs concentrations moyennes dans les eaux usées seront disponibles. Un stage (Florent Boulier, Cemagref ELSA 2011) est en cours

sur la caractérisation des micropolluants (ETM et Composés Traces Organiques), et va faire le point sur la prise en compte de ces composés dans les futures ACV de STEU.

Tableau 4. Descriptif des eaux usées en entrée de station

| INPUT | | STEU BA (données Ecoinvent, Doka, 2007) | STEU FPRv (données Cemagref) |
|-------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|
| Charges | organique DBO ₅ (kg/j) | 48,36 | |
| | hydraulique (m ³ /j) | 446 | 145 |
| Capacité de traitement | | 806 EH (1) | 967 habitants |
| Concentrations (mg/L) | DBO ₅ | 108,43 | 333 |
| | DCO (2) | 162,64 | 800 |
| Charges massiques (g/j) | | Par EH | Par hab. |
| NK | DBO ₅ | 60,00 | 50,00 |
| | DCO | 90,00 | 120,00 |
| | N-NH ₄ | 8,27 | 7,50 |
| | Norg | 6,46 | 2,50 |
| | N-NO ₂ | 0,22 | 0,00 |
| | N-NO ₃ | 0,58 | 0,00 |
| | Ntot | 15,53 | 10,00 |
| P-org | P-Part | 0,34 | 0,40 |
| | P-PO ₄ | 1,36 | 1,60 |
| | Ptot | 1,70 | 2,00 |

(1) Il existe plusieurs classes de STEU BA disponibles dans Ecoinvent, de capacités différentes mais ayant les mêmes charges massiques entrantes et les mêmes performances de traitement puisque la technologie mise en œuvre, de type boues activées, reste identique.

(2) On dérive la DCO du rapport DCO/DBO=1.5 (Doka, 2007). Rapport différent pour les données Cemagref: DCO/DBO=2,4; degré de dégradation biochimique plus élevé (il y aurait plus de composés non dégradables biochimiquement).

Les STEU n'ont pas des rendements d'élimination de 100 % et les eaux traitées véhiculent une masse résiduelle de polluants renvoyée au milieu naturel (Tableau 5).

Tableau 5. Descriptif des eaux épurées en sortie de station

| OUTPUT | | STEU BA (données Ecoinvent, Doka, 2007) | STEU FPRv (données Cemagref) |
|-------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------|
| Charges | organique DBO ₅ (kg/j) | | |
| | hydraulique (m ³ /j) | | |
| Capacité de traitement | | 806 EH | 967 habitants |
| Concentrations (mg/L) | DBO ₅ | 8,29 | 12,47 |
| | DCO (3) | 27,97 | 80,00 |
| Charges massiques (g/j) | | Par EH | Par hab. |
| NK | DBO ₅ | 4,59 | 1,87 |
| | DCO | 15,48 | 12,00 |
| | N-NH ₄ | 4,84 | 0,25 |
| | Norg,total | 0,28 | 1,80 |
| | N-NO ₂ | 0,11 | 0,00 |
| | N-NO ₃ | 6,15 | 6,23 |
| | Ntot | 11,38 | 8,28 |

| | | | | |
|--|-------|-------------------|------|------|
| | P-org | P-Part | 0,00 | 0,00 |
| | | P-PO ₄ | 0,70 | 1,50 |
| | | Ptot | 0,70 | 1,50 |

- (3) Effluents de la STEU BA : le rapport DCO/DBO devient égal à 3,37 ; les composés dégradables biochimiquement ayant été consommés. Les systèmes filtres plantés de roseaux ont des rendements épuratoires > 90 % (Molle *et al.*, 2004) pour la DCO dans le cas des petites collectivités ; on pose l'hypothèse que la DCO = 12 g/j/hab. Ainsi, pour la STEU FPRv, le rapport DCO/DBO en sortie est égal à 6,4.

7.5. Boues générées en sortie de STEU

Les boues générées en sortie de STEU sont de composition variable et dépendent de la qualité des eaux usées arrivant en amont, mais aussi et surtout, du type de procédé de traitement mis en œuvre. La base de données Ecoinvent (Doka, 2007) donne de nombreuses informations concernant les coefficients de transfert de plusieurs éléments aux effluents et aux boues. Il s'agit de chiffres basés sur un traitement moyen dans les STEU suisses, basées sur une technologie de type « boues activées ». Pour l'instant, dans Ecoinvent il n'y a pas de distinction faite entre les différentes classes (ou capacités) de STEU, par manque de données disponibles, mais surtout du fait que la performance des STEU serait plutôt déterminée par la technologie mise en jeu (la classe d'une STEU ayant une influence moindre).

En ce qui concerne les boues extraites de la filière filtres plantés de roseaux, elles contiennent en grande partie des éléments azotés et phosphorés, dont les quantités ont été estimées au Tableau 6.

Tableau 6. Contenu des boues extraites de la FPRv

| | STEU FPR (g/an/hab) |
|-------------------------------------|--|
| Source et type de production | Données Cemagref (Troesch, 2009 ; Liénard, 2004) Production séquentielle de boues, sur le filtre 1 ^{er} étage du FPRV tous les 14 ans |
| N rejeté dans les boues | 240g ⁽¹⁾ soit 3 360 g pour une vidange tous les 14 ans |
| P rejeté dans les boues | 160g ⁽²⁾ soit 2 240 g pour une vidange tous les 14 ans |

⁽¹⁾ pour 6 kg de matière sèche/an/hab à 4 % en N

⁽²⁾ pour 6 kg de matière sèche/hab/an à 6 % en P₂O₅, soit 2,62 % en P

Dans ce modèle ACV, on choisira comme boues générées par la STEU FPRv celles définies par Pradel (2010) dans le cadre du projet Ecodefi (programme PRECODD également), pour lesquelles un modèle d'émissions aux champs a été développé.

Se référer au RTI 06. Fin de vie des boues de STEU : création d'un Module d'ACV simplifié « Epandage », Annexe I pour les caractéristiques des boues compostées (type B03).

En ce qui concerne les ETM dans les boues issues de la filière boues activées de référence dans Ecoinvent, Doka (2007) estime leur partition entre les boues (fraction particulaire) et les effluents (fraction dissoute) grâce aux propriétés physico-chimiques de ces éléments. Il serait utile de vérifier si ces partitions restent valables pour les schémas de traitement par boues activées en France, mais pour cela il faudrait des données sur les éléments dosés dans les eaux usées du contexte rural français.

Des données relatives à la présence de micropolluants (à partir de résultats des travaux du projet AMPERES⁵ dans le cadre du programme PRECODD⁶) sont en cours d'intégration, un stage sur les micropolluants étant en cours (Florent Boulrier, Cemagref ELSA 2011). Par la suite, les compositions des boues modélisées (boues issues de filière boues activées et de filière FPRv) seront modifiées pour inclure ces derniers.

7.6. Fin de vie des boues

Les hypothèses de fin de vie des boues générées en sortie des STEU modélisées sont décrites dans ce qui suit.

Pour les boues digérées⁷ des BA de classe 5 (806 EH) de la base de données Ecoinvent (Doka, 2007), il a été pris **70.7%** d'application en agriculture, les **29.3%** restants étant incinérés puis disposés en décharge. Pour le transport entre la station et l'incinérateur, une distance de 10 km par camion a été choisie, la boue ayant une teneur de 63 % en eau.

En ce qui concerne les boues extraites des STEU FPRv, on rappelle ici l'hypothèse⁸ de fin de vie retenue : 70 % d'épandage, 20 % d'incinération et 10 % de mise en décharge.

7.7. Description et dimensionnement du système FPRv

Ce chapitre reprend l'étude de Dufour (2009).

DESCRIPTION D'UN FPRV « THEORIQUE »

Les eaux usées à traiter sont domestiques, et proviennent d'un réseau séparatif ou unitaire. La filière de traitement des eaux traditionnellement utilisée pour les STEU par filtres plantés de roseaux (FPR) est présentée à la Figure 3, et se compose :

- d'un dégrilleur automatique,
- d'un déversoir d'orage après dégrillage,
- d'un premier ouvrage d'alimentation par bâchées (à l'aide de siphons ou pompes, ...),
- d'un premier étage de filtres plantés de roseaux drainés,
- d'un second ouvrage d'alimentation par bâchées (à l'aide de siphons ou pompes, ...),
- d'un second étage de filtres plantés de roseaux drainés ou non,
- d'un canal de mesure pour les filtres drainés.

⁵ AMPERES : Analyse de Micropolluants Prioritaires et Emergents dans les Rejets et Eaux Superficielles.

⁶ PRECODD : PRogramme de recherche sur les ECOtechnologies et le Développement Durable.

⁷ La digestion de ces boues est effectuée dans un digesteur anaérobie et produit du biogaz, ainsi qu'un digestat sec.

⁸ Pour plus de détails sur les fins de vie des boues de STEU, se référer au RTI 06. Fin de vie des boues de STEU : Création d'un Module d'ACV simplifié « Epandage ».

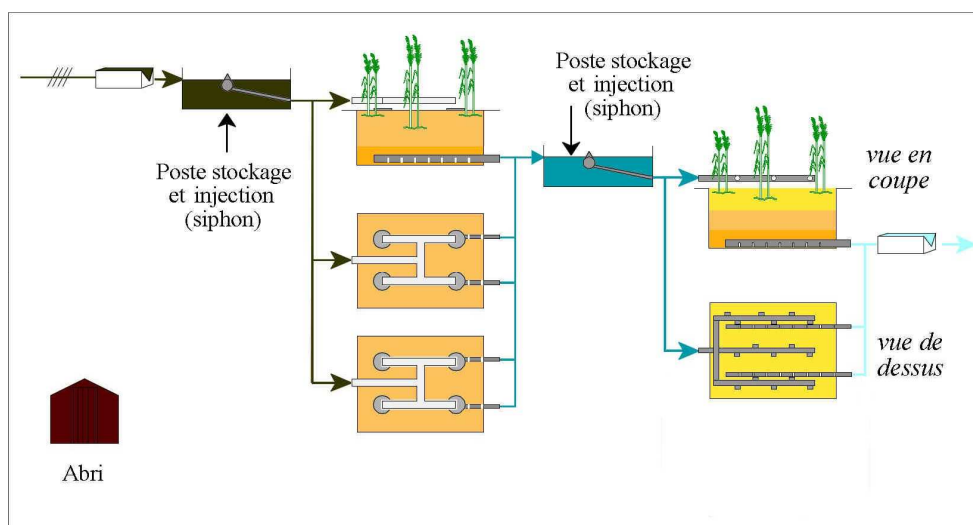


Figure 3. Descriptif d'un FPR (Dufour, 2009)

DIMENSIONNEMENT D'UN FPR « THEORIQUE » (D'APRES GROUPE MACROPHYTES ET TRAITEMENT DES EAUX, 2005)

Pour concevoir un FPR «théorique », il a été pris comme base une station existante ayant une capacité de 967 EH.

Le dimensionnement s'effectuera avec les données de base suivantes sur :

- Les flux hydrauliques ;
- Les flux massiques ;
- Les niveaux de rejet.

Un habitant rejette un volume journalier d'effluent égal à 150 litres (100 L d'eau usée et 50 L d'eaux parasites toutes origines confondues) et 50 g de pollution (mesurée en DBO₅) par jour.

Les règles de base prises pour le dimensionnement sont données dans le Tableau 7.

Tableau 7. Dimensionnement des lits

| | |
|---|------------------------------------|
| Surface utile totale | 2 à 2,5 m ² /habitant |
| Dont premier étage (3 lits en parallèle) | 1,2 à 1,5 m ² /habitant |
| Dont deuxième étage (2 lits en parallèle) | 0,8 à 1,0 m ² /habitant |

Pour 967 habitants, les surfaces minimales des 2 étages sont :

- 1^{er} étage : $967 \times 1,2 = \underline{1\,160,4\,m^2}$
- 2^{ème} étage : $967 \times 0,8 = \underline{773,52\,m^2}$

Ces valeurs seront retenues par la suite.

- Premier étage

En ayant la surface, nous pouvons déterminer la longueur (L) et la largeur (l) des 2 étages, ceci à partir des données qui nous ont été fournies par les constructeurs de la station existante. Nous trouvons ainsi pour le premier étage : $L = 59,02 \text{ m}$ et $l = 19,66 \text{ m}$ (Figure 4).

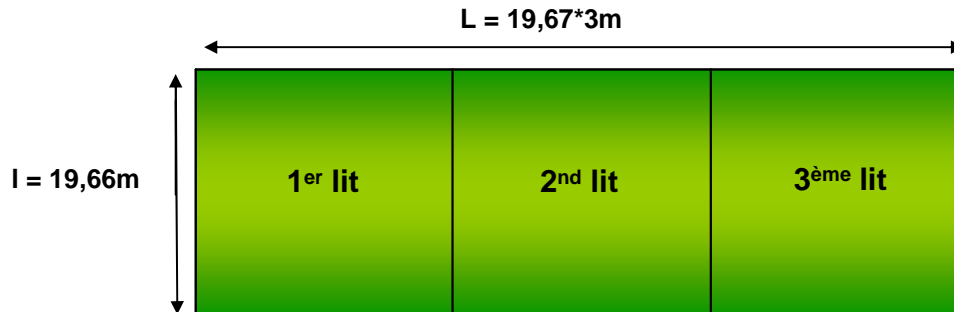


Figure 4. Plan du 1er étage du FPRv

- La revanche

La revanche permet le stockage des boues et leur minéralisation in-situ. La fréquence des vidanges des boues du 1^{er} étage est directement liée à cette capacité de stockage. Si les digues sont confectionnées en remblai, il ne faut pas oublier de prendre en compte leur éventuel tassement. Au premier étage, une revanche d'une hauteur suffisante est nécessaire. On retient 50 cm (Figure 5).

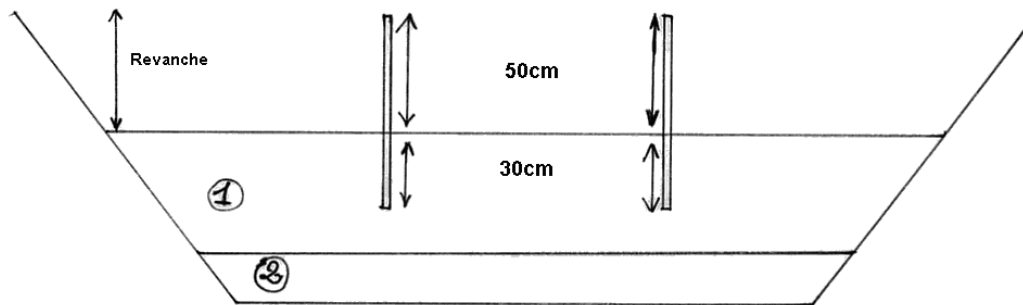


Figure 5. Coupe transversale

1. couche filtrante
2. couche drainante

- Cloison de séparation

Au sein d'un même étage dans un bassin unique, les filtres sont séparés les uns des autres à l'aide de cloisons dans les talus. Ces cloisons étanches sont enfoncées sur une hauteur de 30 cm dans la couche filtrante et débordent sur une hauteur au moins égale à celle de la revanche.

Étant donné que la revanche fait 50 cm dans ce cas, la cloison de séparation couvre une hauteur totale égale à 80 cm (Figure 5).

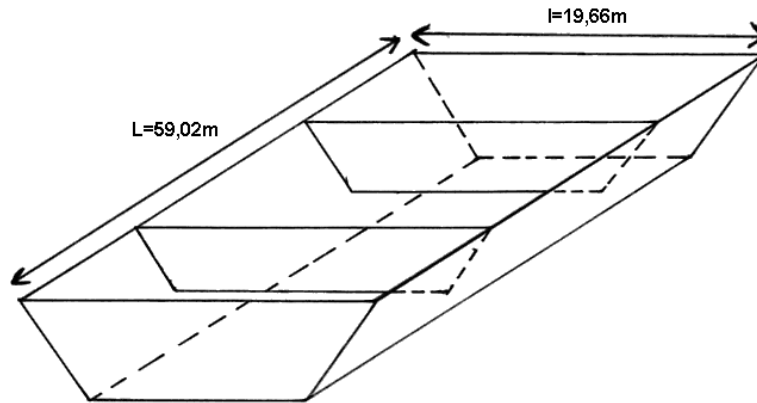


Figure 6. Coupe du 1^{er} étage en 3D

- Réseau de distribution du 1^{er} étage

Un point d'alimentation est mis en place au minimum tous les 50 m².

La réception des effluents sur le filtre est assurée par des plaques anti-affouillement de dimension appropriée situées sous chaque point d'alimentation. Au premier étage dans ce cas, il y aura 8 points d'alimentation par lit. Ce qui fait au total 24 points d'alimentation sur tout le premier étage.

Le réseau de distribution est composé de tuyaux en PCV de différents diamètres (Ø 160 mm, Ø 200 mm, Ø 250 mm). La longueur du réseau de distribution est de 156 m.

- Collecte et ventilation en fond de filtres

Un système de drains en DN 160 est posé au fond des bassins et est enrobé par le gravier drainant. Aux extrémités des canalisations, les tuyaux de collecte sont reliés à l'atmosphère par des tubes pleins et événements couverts de chapeaux pour éviter la chute d'objets dans les conduits d'aération et les tuyaux de collecte. Tubes et événements ont des diamètres comparables et compatibles avec ceux des tuyaux.

Les canalisations sont posées avec une pente de 0,5 %, munies de fentes en quinconce de 5 mm de largeur tous les 10 à 15 cm d'une densité de l'ordre de 35 – 45 mL pour 100 m² de filtres.

- Pentes des talus

Il est nécessaire d'avoir des informations sur les pentes des talus pour effectuer le dimensionnement. On se fixe une pente de 2/1 (cadre guide CCTP). Ainsi, on peut calculer la surface du fond.

- Deuxième étage

La surface du deuxième étage, rappelons-le est égale à 773,52 m².

En ayant la surface, nous pouvons déterminer la longueur (L) et la largeur (l) du 2^{ème} étage, ceci toujours à partir des données qui nous ont été fournies par les constructeurs de la station existante. Nous trouvons ainsi pour le deuxième étage : L = 56,71 m et l = 13,64 m (Figure 7).

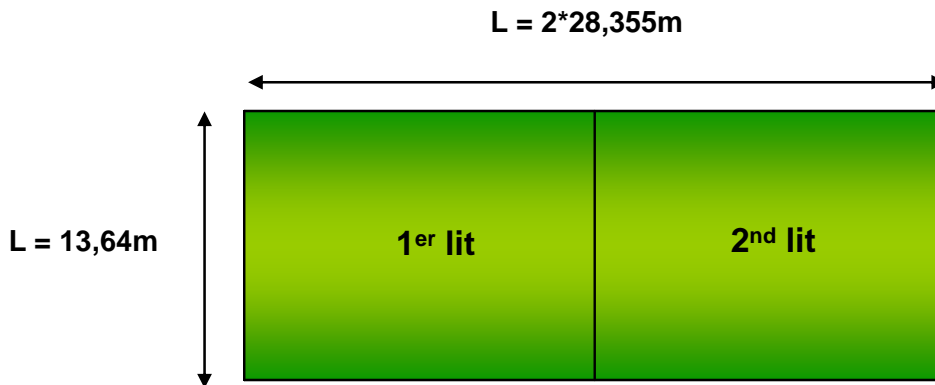


Figure 7. Coupe du 2ème étage

- La revanche

Au deuxième étage, une revanche de 25 cm est suffisante (Figure 8).

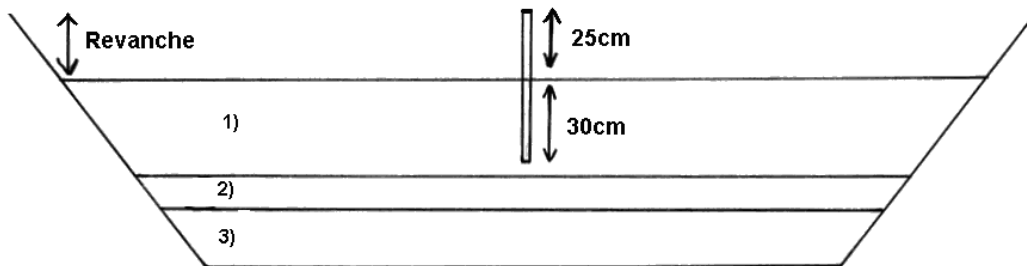


Figure 8. Coupe transversale

- Cloison de séparation

Étant donné que la revanche fait 25 cm dans ce cas, la cloison de séparation couvre une hauteur totale égale à 55 cm : $30+25 = 55$ cm (Figure 8).

Longueur de la cloison : comme pour le premier étage, la longueur d'une cloison est égale à la largeur de la première couche visible, soit la couche filtrante. Ainsi, la longueur de la cloison fait 13,64 m (Figure 9).

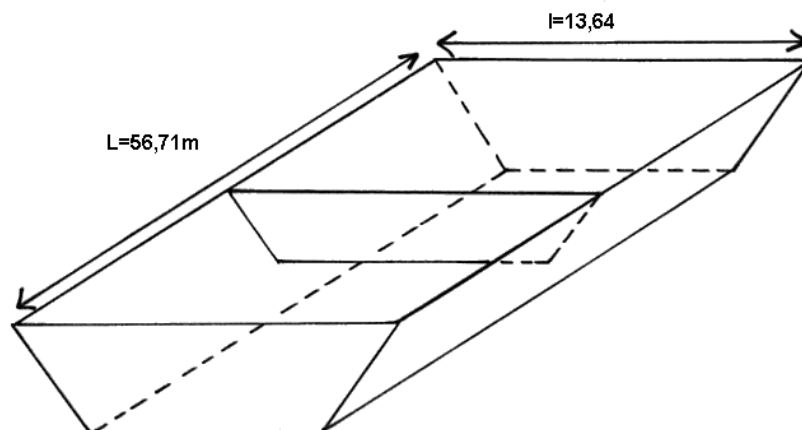


Figure 9. Coupe du deuxième étage en 3D

- Réseau de distribution du 2^{ème} étage

La répartition à la surface du 2^{ème} étage est assurée par un réseau superficiel de tuyaux aériens percés d'orifices ou par des diffuseurs ponctuels souterrains. En cas de diffuseurs souterrains, un point d'injection par 5 m² est le minimum conseillé.

Les rampes d'alimentation sont dimensionnées de façon à obtenir une pression de service de 0,3 m minimum. Le point d'alimentation est de 1 point/m² alimenté. Ces canalisations se vidangent intégralement après chaque bâchée ce qui élimine tout risque de gel.

Au deuxième étage, on a une alimentation du réseau par le milieu d'un porte-rampe, de géométrie latérale. Pour la surface du 2^{ème} étage, le réseau comporte 92 rampes, dont la longueur pour chacune est de 13,89 m et deux porte-rampes qui font 27 m chacun (Figure 10). Ces calculs ont été faits à titre d'exemple à l'aide du logiciel REPETEAU.

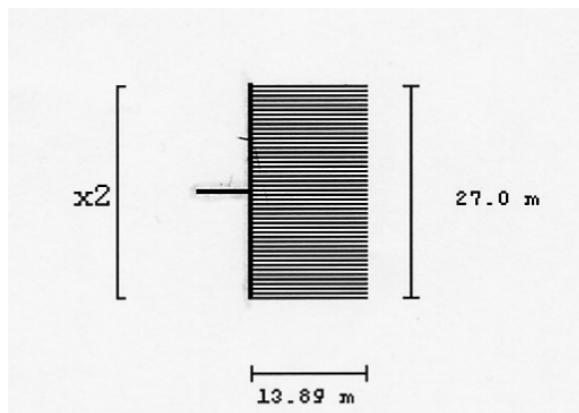


Figure 10. Réseau de distribution du deuxième étage (Dufour, 2009)

- Collecte et ventilation en fond de filtres

Un système de drains en DN 160 est posé au fond des bassins et est enrobé par le gravier drainant. Aux extrémités des canalisations, les tuyaux de collecte sont reliés à l'atmosphère par des tubes pleins et évènements couverts de chapeaux pour éviter la chute d'objets dans les conduits d'aération et les tuyaux de collecte. Tubes et évènements ont des diamètres comparables et compatibles avec ceux des tuyaux.

Les canalisations sont posées avec une pente de 0,5 %, munies de fentes en quinconce de 5 mm de largeur tous les 10 à 15 cm d'une densité de l'ordre de 35 – 45 mL (mètre Linéaire) pour 100 m² de filtres.

- Pentés des talus

Comme pour le premier étage, on se fixe une pente de 2/1.

Le récapitulatif des données pour le dimensionnement du modèle FPRv est répertorié dans le Tableau 8.

Tableau 8. Tableau récapitulatif pour le garnissage du FPRv

| | | CCTP | | Données prises pour l'étude | | |
|--|--------------------------|--------------------|--------------|-----------------------------|--------------|---|
| | Couche | Granulométrie (mm) | hauteur (cm) | Granulométrie (mm) | hauteur (cm) | Volume (m ³) |
| 1^{er} étage | Filtrante | gravier : 2-8 | 30 | gravier | 30 | 1160,33*0,70= 812 |
| | De transition | gravier : 5-10 | 20 | gravier | 20 | |
| | Drainante | gravier : 20-60 | 20 | gravier | 20 | |
| 2^{ème} étage | Anti-afouillement | gravier | | gravier | 5 | Sable : 773,52*0,30= 232 Gravier : 773,52*(0,45)= 348 |
| | Filtrante | sable | 30 | sable | 30 | |
| | De transition | gravier : 3-30 | 20 | gravier | 20 | |
| | Drainante | gravier : 20-60 | 20 | gravier | 20 | |
| Géomembrane et les 2 géotextiles de protection : couverture complète des digues + ancrage de 50 cm (m ²) | | | | | | 4 985 |

8. Inventaire du cycle de vie de la STEU

8.1. Découpage du système FPRv

La collecte de données d'inventaire pour modéliser une STEU FPRv peut se décomposer comme suit, en distinguant (Figure 11) :

- L'infrastructure de la station (relative aux étapes de construction et de démantèlement), d'une durée de vie prévue de 30 ans,
- Le fonctionnement de la station ou O&M (Opération & Maintenance), reprenant les consommations d'électricité, de réactifs, et les opérations journalières requises pour entretenir les roseaux, et le curage des boues qui vont être traitées ensuite,
- Les rejets (Air & Eau), déterminés par les bilans de matière appropriés.

Pour consolider l'inventaire, des données concernant les quantités de chaque matériau et les valeurs liées au déplacement, à la consommation d'énergie etc., sont recueillies pour les différentes étapes du cycle de vie du système. L'inventaire est la compilation et la quantification des flux entrants et sortant du système pour tout son cycle de vie tel qu'il a été défini dans le champ de l'étude. Tous les flux sont quantifiés par rapport à l'unité fonctionnelle : le kg de DBO₅ par jour (Figure 11).

Les tableaux d'inventaire sont présentés au chapitre suivant.

Fonctionnement journalier d'une STEU FPR

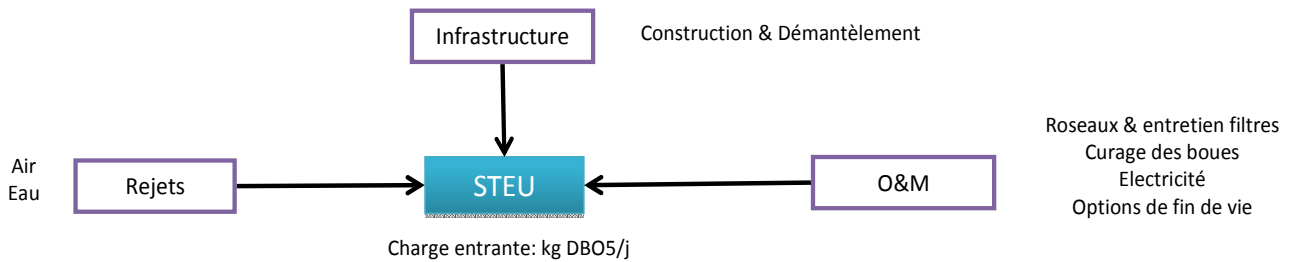


Figure 11. Diagramme schématique du système FPRv

Après avoir recueilli les données pour réaliser l'Inventaire, il est nécessaire de les relier entre elles par des flux, et sous des unités appropriées à chacune. On identifie la quantité de chaque matériau et les valeurs liées au déplacement, à la consommation d'énergie etc., pour les différentes étapes du cycle de vie du système B (cf. Figure 12).

Dans le logiciel Simapro 7, sont disponibles les données de la base Ecoinvent, ainsi que celles d'autres bases de données. Nous nous limiterons à Ecoinvent car c'est la base la plus riche, la plus utilisée, mais aussi afin d'éviter d'avoir des données de bases et donc de sources différentes.

Certains appareils n'étant pas disponibles car inexistant dans Ecoinvent, on se propose soit de s'approcher d'un appareil équivalent disponible, soit de le décomposer.

Les Figure 12 et Figure 13 illustrent le découpage du système FPRv et le détail de l'étape d'exploitation ou O&M tel qu'il a été modélisé sous SimaPro pour réaliser notre étude.

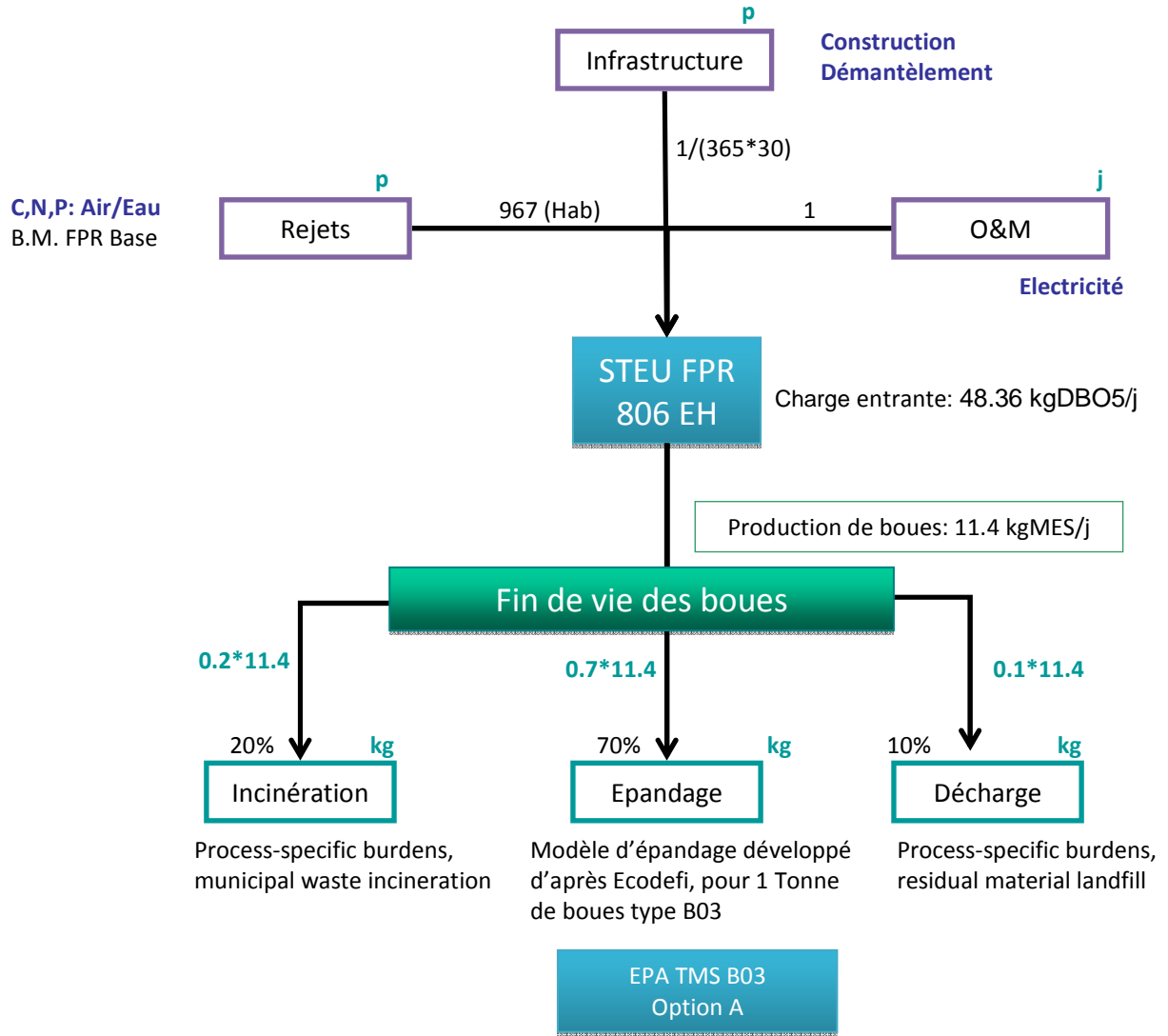


Figure 12. Représentation du modèle FPRv

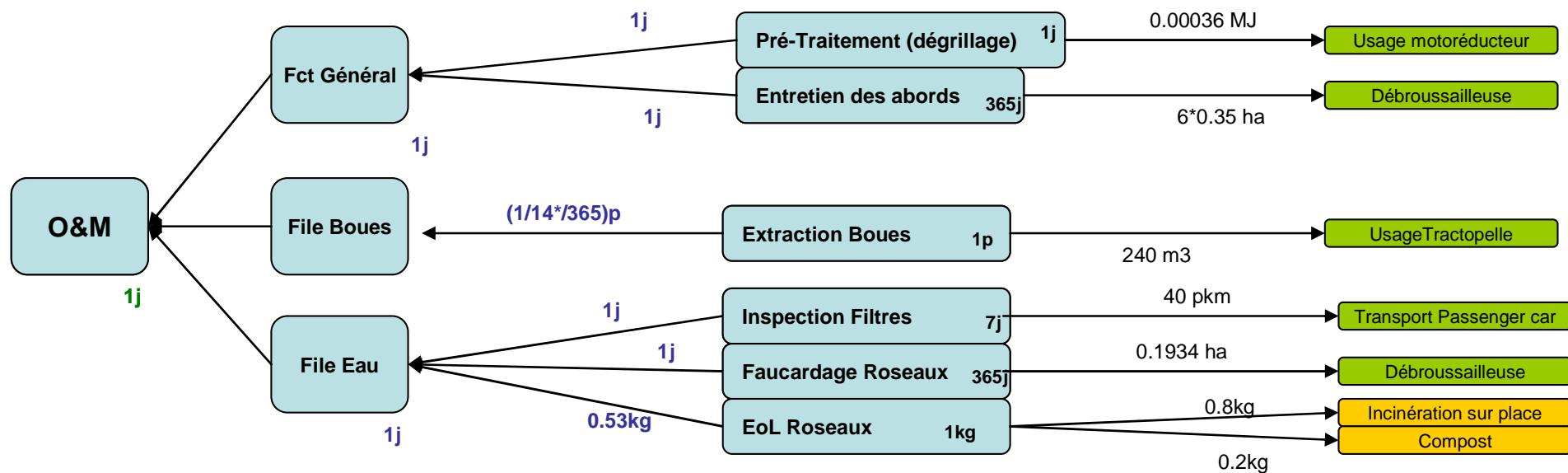


Figure 13. Schéma détaillé de l'étape Exploitation

8.2. Inventaire (LCI) de la STEU FPRv 806 EH

SYNTHESE DES VALEURS D'INVENTAIRE RETENUES ET DES SOURCES DE DONNEES

Les inventaires des étapes de construction et de l'exploitation / maintenance de la FPRv sont synthétisés dans les Tableau 9 et Tableau 10.

Sources des tableaux pages suivantes :

[1] Enquête lors de la visite du 24 Avril 2009, sur deux STEU FPR visitées : Roussillon et Saignon (proche d'Apt dans le 84).

[2] Liénard *et al.*, 2004

[3] Expertise Cemagref

[4] Lecture document confidentiel constructeur

[5] Base de données Ecoinvent et [6] Canler *et al.*, 2004

Des précisions sur les inventaires sont données dans le rapport de Dufour (2009). Dans ce qui suit, seule l'occupation du terrain a été prise en compte pour l'impact sur le « Land Use », sans transformation de terrain.

CONSTRUCTION

Tableau 9. Inventaire des étapes de construction du système FPRv

| Matière/Process Etape Construction | Quantités/Flux | | Fréquence des flux (par SFPR) | Source d'estimation des quantités/flux | Sources des données ACV de base utilisée (Ecoinvent ou autres) | Fin de vie incluse |
|--|----------------|----------------|-------------------------------------|---|---|--------------------------|
| | Valeur | Unité | | | | |
| MX015: Acier galvanisé | 1 225 | kg | 1 | [1] + [3] | Voir Fiche MX015, RTI05 ONEMA. Transport inclus. | oui |
| Béton (fabrication et mise en œuvre) | 46 | t | 1 | [1] + [3] | Poor concrete, at plant/CH S (m3) | non |
| | 20 | m ³ | | | | |
| Chantier Usage tractopelle (Terrassement) | 140 | heures | 1 | [3] + [4] | Fiche Tractopelle Chantier (Excavation, skid-steer loader/RER S) (*) | oui |
| | 15 400 | m ³ | 1 | [5] | | |
| Gravier | 504 720 | kg | 1 | [4] | Gravel, round, at mine/CH S (kg) | oui |
| Sable | 371 300 | kg | 1 | [4] | Sand, at mine/CH S (kg) | oui |
| PEHD (géo membrane+) | 2460 | kg | 1 | [3] + [4] | Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER S (kg) | oui |
| PEHD (siphon) | 120 | kg | 1 | [1] + [3] + [4] | | |
| PEHD tuyaux 2ème étage | 672 | kg | 1 | [3] + [4] | | |
| PP (géotextile) | 3900 | kg | 1 | [3] + [4] | Polypropylene, granulate, at plant/RER S (kg) | oui |
| PVC tuyaux 1er étage (20%) | 103 | kg | 1 | [3] + [4] | Polyvinylchloride, at regional storage/RER S (kg) | oui |
| Inox tuyaux 1er étage (80%) (1) | 685 | kg | 1 | [3] + [4] | MX014: Acier Inox (kg) | oui |
| Aluminium | 35 | kg | 1 | [3] | Aluminium, production mix, cast alloy, at plant/RER S (kg) | oui |
| Cuivre | 10 | kg | 1 | [3] | Copper, at regional storage/RER S (kg) | oui |
| Plants de roseaux | 4 660 | unités | 1 | [3] + [4] | Négligé | |
| Transport forfaitaire A/R du matériel | 50 | km | 1 | [1] | Transport, lorry 3.5 – 7.5t, EURO4/RER S (tkm) | oui |

| | | | | | | |
|-------------------------|----------|-------------------|---|-----|---|-----|
| sur site FPRV (camions) | 932.1 | t | | | | |
| | 46 605 | tkm | | | | |
| Occupation terrain | 58 017.6 | m ² .a | 1 | [1] | Occupation, industrial area, vegetation (m ² .a) | oui |

(1) On fait l'hypothèse simplificatrice de considérer le matériau prépondérant en masse comme principal constituant de l'élément. Ainsi une canalisation va être ramenée à un volume déterminé par le diamètre et longueur, d'un élément massif (PVC ou acier inox). On néglige l'usinage nécessaire des pièces du fait du manque de données disponibles : sous-estimation de la dépense énergétique et des émissions de polluants car il se peut que pour certaines pièces il y ait des composants électroniques, qui, bien qu'en faible proportion massique, contribue bien plus à une catégorie d'impact environnemental.

(*) Fiche Usage Tractopelle : 140 h de tractopelle correspondent à l'évacuation de 15 400 m³ par le procédé ecoinvent « Excavation, skid-steer loader/ RER S

EXPLOITATION/MAINTENANCE

Tableau 10. Inventaire de l'étape exploitation du système FPRv

| Matière/Process | | Quantités/Flux | | Fréquence des flux (par SFPR) | Source d'estimation des quantités/flux | Sources des données ACV de base utilisée (Ecoinvent ou autres) | Fin de vie incluse |
|--------------------------------|--|----------------|-----------|----------------------------------|---|---|--------------------------|
| | | Valeur | Unité | | | | |
| Etape Exploitation/Maintenance | | | | | | | |
| Prétraitement | Moto-réducteur (usage) | 360 | kJ | /jour | [1] | Electricity, low voltage, at grid/FR S | - |
| | | | | | | | |
| Inspection des filtres | Inspection générale des filtres | 13 | heures/an | 2/semaine | [2] | - | - |
| | Transport pour inspection des filtres A/R | 20 | km | 2/semaine | [1] | Transport, passenger car, diesel, EURO4/CH S (personkm) | oui |
| | | 1 | personne | | | | |
| Entretien des abords | Tonte de l'herbe sur les digues et les abords de la station avec des outils de jardinage | 48 | heures/an | 6/an | [2] | Mowing, by motor mower/CH S (ha) | oui |
| | | 0.35 | ha | | | | |
| | Transport pour l'entretien des abords A/R | 20 | km | 6/an | [2] | Transport, passenger car, diesel, EURO4/CH S (personkm) | |
| | | 1 | personne | | | | |

| | | | | | | | |
|----------------------------|---|--------------------------|----------------|----------|-----------|--|-----|
| Faucardage des roseaux | Faucardage et évacuation des roseaux | 80 | heures | 1/an | [2] | - | - |
| | Débroussailleuse des roseaux | 0.1934 | ha | 1/an | [2] | Mowing, by motor mower/CH S (ha) | oui |
| | Transport pour faucardage roseaux A/R (voiture) | 20 | km | 1/an | [1] | Transport, passenger car, diesel, EURO4/CH S (personkm) | oui |
| 1 | | personne | | | | | |
| Fin de vie des roseaux (2) | | 0.42 kg brûlés sur place | | 1/an | [1] | - | - |
| | | 0.58 kg compostés | | 1/an | [1] | - | - |
| Extraction des boues | Extraction des boues sur les filtres du 1 ^{er} étage (tractopelle) | 240 | m ³ | 1/14 ans | [1] + [2] | Excavation, skid-steer loader/CH S (m ³) | non |
| Fin de vie des boues | | 7.98 | kg | /jour | [1] + [3] | Epandage, B03 | oui |
| | | 2.28 | kg | /jour | [1] + [3] | Process-specific burdens, municipal waste incineration/CH S (kg) | oui |
| | | 1.14 | kg | /jour | [1] + [3] | Process-specific burdens, residual material landfill/CH S (kg) | oui |

(2) Il n'existe pas de process Ecoinvent pour la combustion à l'air libre des roseaux, de plus le carbone est biogénique, donc zéro impact en réchauffement climatique.

REJETS/EMISSIONS

Les Tableaux 11 et 12 présentant les rejets et émissions d'un système FPRv ont été consolidés à partir d'un bilan de matière qui sera explicité dans la suite au paragraphe 8.3.

Tableau 11. Inventaire de l'étape des émissions/rejets du système FPRv – Budget équilibré

| Matière/Process Etape Rejets/Emissions (g/j/hab) | Quantité/Flux | | Fréquence des flux (par FPRV) | Source d'estimation des quantités/flux | Sources des données ACV de base utilisée (Ecoinvent ou autres) | Fin de vie incluse |
|--|---------------|-------|----------------------------------|---|--|--------------------|
| | Valeur | Unité | | | | |
| <i>Rejets dans l'eau :</i> | | | | | | |
| NH ₄ ⁺ | 0.32 | g | 1 | [3] | Ammonium, ion | - |
| Norg | 1.8 | g | | | Nitrogen, total | |
| NO ₃ ²⁻ | 27.7 | g | | | Nitrate | |
| PO ₄ ³⁻ | 4.6 | g | | | Phosphate | |
| Emissions zinc dans l'eau (galva) durant toute l'exploitation | 0.0076 | kg | 1/30 ans | Estimé = corrosion de 2μ par an. [3] | Zinc | - |
| <i>Emissions dans l'air :</i> | | | | | | |
| N ₂ O | 0.35 | g | 1 | [3] | Dinitrogen monoxide | - |
| N ₂ | 0 | g | | | Nitrogen | |
| CO ₂ | 109 | g | | | Carbon dioxide, biogenic | |
| CH ₄ | 0.22 | g | | | Methane, biogenic | |

Tableau 12. Composition des co-produits du traitement des eaux usées

| | | | | | | |
|---|------|---|---|-----|--|-----|
| <i>Rejets dans les boues :</i> | | | | | | |
| N _{org} | 0,75 | g | 1 | [3] | Nitrogen, total Phosphorus pentoxide Carbonate | oui |
| P ₂ O ₅ | 2,02 | g | | | | |
| C _{minéral} (HCO ³⁻) (1) | 1,13 | g | | | | |
| <i>Rejets dans les roseaux :</i> | | | | | | |
| N _{org} | 0,76 | g | 1 | [3] | Nitrogen, total Phosphorus, total | oui |
| P _{org} | 0,05 | g | | | | |
| <i>Stockage dans le massif :</i> | | | | | | |
| NH ₄ ⁺ | 0,13 | g | 1 | [3] | Ammonium, ion Phosphorus pentoxide | non |
| P ₂ O ₅ | 0,09 | g | | | | |

(1) Dans la base de données ecoinvent il n'y a pas d'équivalent au carbone organique contenu dans les boues, ceci devra être explicité dans les modules fin de vie des boues (amendement organique pour les sols, ou valeur énergétique en cas de méthanisation ou incinération).

DEMANTELEMENT

Tableau 13. Inventaire de l'étape de démantèlement

| Matière/Process Démantèlement | Quantité/Flux | | Fréquence des flux (par FPRV) | Source d'estimation des quantités/flux | Sources des données ACV de base utilisée (Ecoinvent ou autres) | Fin de vie incluse |
|----------------------------------|---------------|--------|----------------------------------|---|---|-----------------------|
| | Valeur | Unité | | | | |
| Heures de tractopelle | 80 | heures | 1/30ans | [3] | Fiche Tractopelle Chantier (Excavation, skid-steer loader/RER S) (*) | oui |
| Décombres | 20 | tonnes | | [3] | Disposal, building, concrete, not reinforced, to final disposal / CHS | oui |

8.3. *Bilan de matière du système FPRv*

Pour un système STEU FPRv dimensionné pour charges en Temps Sec, réseau séparatif, le Tableau 15 présente un bilan de matière équilibré où les valeurs en rouge sont calculées par différence en supposant que les autres valeurs soient fixées (voir le Tableau 14 pour la légende des valeurs).

Tableau 14. Légende du bilan de matière

| | |
|-------------|--------------------------------------|
| 0.6 | d'après sources |
| 0.15 | estimation |
| << | négligeable |
| 8,28 | calculé par différence de la balance |
| 0,25 | valeur ajustée pour équilibrage |

Tableau 15. Bilan de matière pour un système FPRv

| | Substances | INPUT Eau Usée (g/j/hab) | Emissions et rejets directs | | | Sous-produits | | | |
|-----------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|--|---------------------------------|---------------------------------|---|--------------------|
| | | | Emissions air Totales | Emissions sol | Rejets eau | CP1 Boues | CP2 Macrophytes ou autres | CP3 Massif filtrant | |
| Azote | N-NH ₄ | 7.5 | | | 0.25 | << | | 0.1 | |
| | N-org | 2.5 | | | 1.8 | 0.75 | 0.76 | | |
| | N-NO ₂ +3 | 0 | | | 6.23 | << | | << | |
| | N-NH ₃ | | << | | | | | | |
| | N-NO | | << | | | | | | |
| | N-N ₂ O | | 0.11 | | | | | | |
| | N-N ₂ | | << | | | | | | |
| | <i>N Total, Entrée</i> | 10 | 0.11 | | 8.28 | 0.75 | 0.76 | 0.1 | 10 N Total, Sortie |
| Phosphore | P-org | 0.4 | | | | 0 | 0.05 | << | |
| | P-PO ₄ | 1.6 | | | 1.5 | 0 | << | 0 | |
| | P-P ₂ O ₅ | 0 | | | 0 | 0.44 | << | 0.01 | |
| | | <i>P Total, Entrée</i> | 2 | | | 1.5 | 0.44 | 0.05 | 0.01 |
| Carbone | C-org | 43.13 | | | 1.6875 | 13.125 | << | << | |
| | C-CO ₂ | | 28.16 | | | | | | |
| | C-CH ₄ | | 0.15 | | | | | | |
| | C-mineral | 1.875 | | | 0.75 | 1.125 | | | |
| | | <i>C Total, Entrée</i> | 45.00 | 30.004 | | 2.62 | 14.25 | 0 | 0 |
| ETM | Ni | x | | | | | | | |
| | Pb | x | | | | | | | |
| | Fe | x | A définir | | A définir - coef de transfert aux effluents de la forme dissoute | A définir - coef de biosorption | A définir | A définir - coef d'adsorption au media filtrant (soil sorption) | |
| | Cu | x | | | | | | | |
| | Zn | x | | | | | | | |
| CTO | HAP | x | A définir | | A définir | A définir | A définir - coef de biosorption | A définir - coef de biosorption | |
| | AOX | x | A définir | | A définir | A définir | | | |

BUDGET N

On dispose de données basées sur dires d'expert et sur les références suivantes :

- on retrouve dans les boues 6 kg/an/hab de matière sèche (Liénard *et al.*, 2004⁹) à 4 % en azote, soit 240 g/an/hab (Troesch, 2009), donc **0,65 g/j/hab** de N-org¹⁰.
- pour la quantité d'azote organique exportée avec les roseaux lors de leur faucardage, Vymazal *et al.* (1998) proposent que la quantité d'azote pouvant être éliminée par des macrophytes coupés, est entre 1 000 et 2 500 kg N/ha/an. Nous avons considéré 1 400 kg N/ha/an. Ce qui fait : $(1\ 400 \cdot 10^3) / (10^4 \cdot 365) = \mathbf{0,38\ g/m^2/j}$ d'azote. Donc, pour 2 m² (1,2 m² + 0,8 m²) par habitant, il est rejeté **0,76 g/j/hab** d'azote.
- d'après le rapport de Maillard *et al.* (2007), entre 0,3 % et 1 % de l'azote entrant dans la station serait émis sous forme de protoxyde d'azote (N₂O). Soit entre 0,03 g et 0,1 g. Pour notre étude, il a été retenu la valeur la plus conservative, soit **0,1g**.

BUDGET P

- On retrouve dans les boues 6 kg/an/hab de matière sèche (Liénard *et al.*, 2004) à 6 % en P₂O₅ (2,62 % en phosphore), soit 160 g/an/hab (Troesch, 2009) donc **0,44 g/j/hab** de P.
- On tient déjà compte des boues qui sont minéralisées au cours des 14 ans. C'est pour cela que l'on considère 6 kg de matière sèche.
- D'après Molle (2008¹¹), l'utilisation de macrophytes permet des exportations de phosphore de l'ordre de 100 kg P/ha/an. Ce qui ferait 0,027 g/m²/j, soit **0,05 g/j/hab** pour 2 m²/hab. Ayant 0,05 % de phosphore inexplicé, nous avons attribué **0,01 g** au stockage de P-PO₄ dans le massif filtrant.

BUDGET C

- Carbone Minéral

La quantité de carbone minéral est, d'après dires d'experts, estimée à 10 % de la DBO₅ entrante en station. Sur la base d'une charge massique de 50 g DBO₅/j/hab, cela donne C_{minéral} = 5 gDBO₅/j/hab, soit 1.88 gC.

D'après Dufour (2009), 40 % du C_{minéral} (de 1.88g) est lessivé soit 0.75g qui partent dans les effluents de la STEU. Le carbone minéral restant (60 %, i.e. 1.13g) est adsorbé dans les boues.

- Carbone Organique

Deux estimations du carbone organique (C_{org}) ont été réalisées, selon deux hypothèses. Dans la suite de l'étude, la 1^{ère} hypothèse sera retenue (plus conservative, elle suppose des émissions de CO₂ et CH₄ plus importantes, et des rejets de C_{org} aux effluents).

Hypothèse 1. Estimation à partir du ratio de masse molaire C/O₂ = 12/32

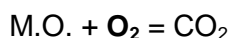
Etape de métabolisation de la pollution organique

Pour le FPRv, les charges massiques sont 50 g/j/hab de DBO₅, et 120 g/j/hab de DCO. Lors des phases de repos, il y a un apport massif d'oxygène. Ainsi, les bactéries peuvent dégrader la pollution organique, et suivent donc la réaction simplifiée suivante (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

⁹ Liénard *et al.*, 2004, p. 90 Ajouter le titre.

¹⁰ Les boues issues de FPR sont de type pâteux (25 % de siccité en moyenne), l'azote contenu dans les matières en suspension est essentiellement organique (OTV, 1997) et non sous forme minérale - ammonium N-NH₄ (Dufour, 2009).

¹¹ Molle (2008) Elimination du phosphore par filtres plantés de roseaux -Techniques de l'Ingénieur, n°8, pp.1-2.



O₂ représentant ici la DBO₅.

En prenant un rapport C-CO₂/O₂ entre le C-CO₂ produit et l'oxygène consommé égal à 12/32 pour des molécules simples composantes des eaux usées, nous faisons l'hypothèse que la réaction de dégradation de la pollution organique est stoechiométrique, i.e. pour 1 mole d'O₂ consommée, 1 mole de CO₂ est émise. Si cette réaction de dégradation était totale, on aurait formation d'une quantité de :

$$50 * (12/32) = \mathbf{18,75 \text{ gC/j.hab.}}$$

Or, le rendement de cette réaction est de 90 % environ, avec 10 % de C non dégradé biologiquement, relargué aux effluents. La fraction de carbone organique métabolisable est donc de $18,75 * 0,9 = \mathbf{16,88 \text{ gC/j.hab.}}$ La fraction de carbone minéral étant de 10%, il y aurait $18,75 * 0,1 = \mathbf{1,875 \text{ gC/j.hab}}$ – de carbone «minéral rejetés tels quels dans les cours d'eau.

Cependant, il faut également prendre en compte le dégazage de méthane, à partir d'une fraction du carbone initial organique (métabolisable en C-CO₂). Maillard *et al.* (2007) estiment cette fraction à 0,5 % de $\mathbf{18,75 \text{ gC/j.hab}}$ soit $\mathbf{0,094 \text{ gC/j.hab}}$ de C-CH₄. Ainsi il y aura au final, un dégazage de $\mathbf{16,88 - 0,094 = 16,78 \text{ gC/j.hab}}$ de C-CO₂.

Il y a donc une première émission de 16,78 g de CO₂ et de 0.094 g de CH₄ suite à la métabolisation de la pollution organique.

Stockage dans les boues et réémissions gazeuses

Reste la part du carbone non dégradé et stocké sous forme de C_{org} dans les boues ; elle correspond à la quantité C_{DCCO}-C_{DBO5} de « carbone non métabolisable » soit $(120-50) * (12/32) = \mathbf{26,25 \text{ g/j.hab.}}$

50 % de ce carbone est stocké dans les boues soit $\mathbf{13,13 \text{ g de C-org.}}$

Les 50 % restant sont minéralisés et émis dans l'atmosphère sous forme de CO₂ et en CH₄, respectivement 99,5 % et 0,5 % de ces 50 % (Maillard *et al.*, 2007) (Figure 14).

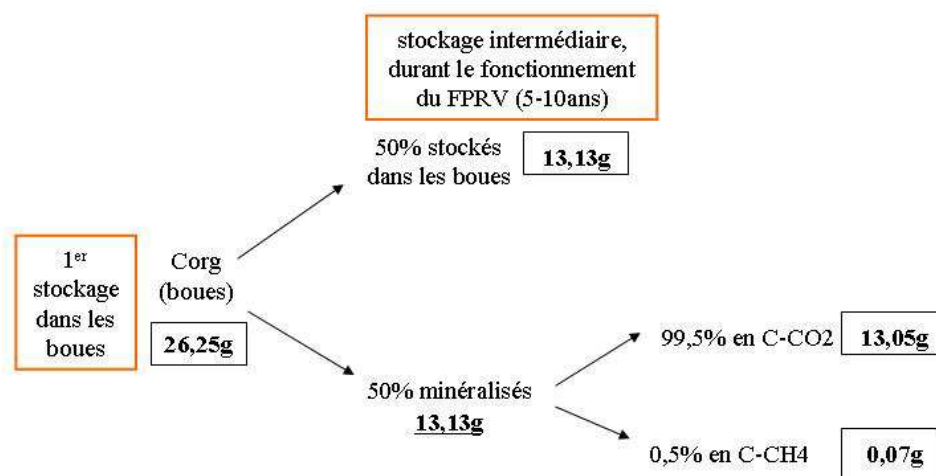


Figure 14. Schéma explicatif du devenir du carbone organique dans les boues

En conclusion, la charge de C_{org} en entrée de station est de **45 g/j/hab** (correspondant à une DCO de 120 g/j/hab) se répartit en une fraction de 18,75 g métabolisée et une fraction stockée dans les boues de 26,25 g et ultérieurement minéralisée.

La Figure 15 récapitule les hypothèses de répartition retenues pour les différentes formes carbonées.

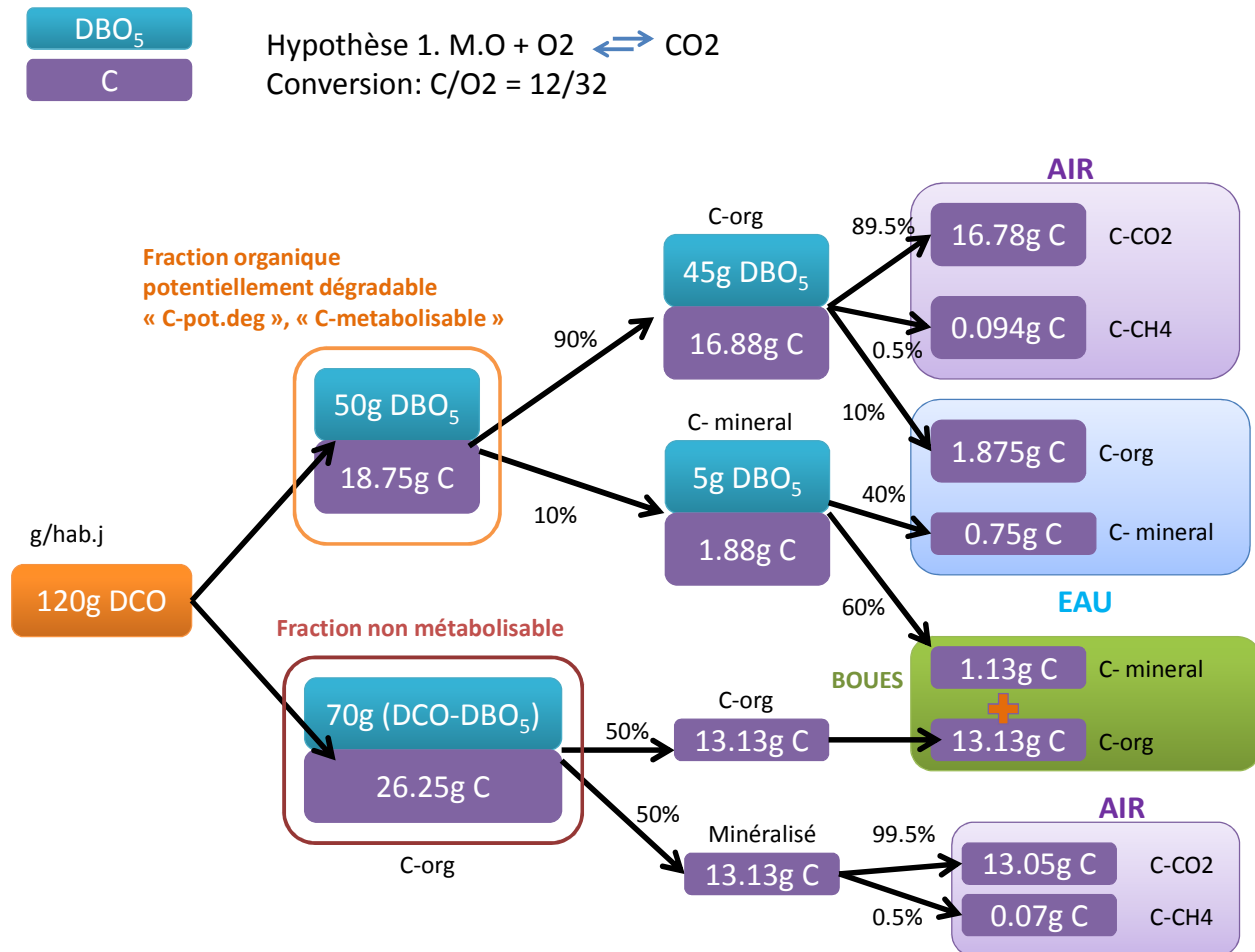


Figure 15. Répartition des formes carbonées

Hypothèse 2. Estimation à partir du rendement cellulaire $Y_h = 0,67$

Etape de métabolisation de la pollution organique

Le rendement de croissance Y_h se définit comme le rapport entre le carbone organique dissous (COD) transformé (en biomasse, réserves intracellulaires et adsorbé par la biomasse) et le COD consommé par les bactéries.

La Figure 16 illustre la consommation et la transformation du COD entrant. Pour x mg/L de COD consommé pendant le test respirométrique, $Y_h \cdot x$ s'incorpore dans la biomasse (sous forme B, C ou D) et $(1-Y_h) \cdot x$ est respiré (A).

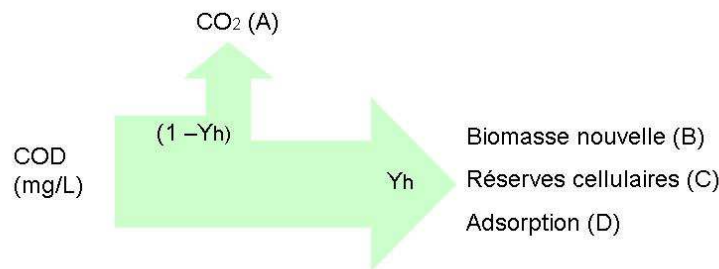


Figure 16. Transformation bactérienne du carbone organique dissous (Tusseau-Vuillemin, 1999 ; Programme Seine)

On admet que sur 120 g de DCO, 80 % de cette dernière est dégradée soit 96 g qui peuvent être métabolisés (partent sous forme de CO₂), et 20 % ne l'est pas, donc se retrouve dans les boues.

$$96 \text{ g DCO} + (1 - 0,67) * 96 \text{ g O}_2 = (1 - 0,67) * 96 \text{ g CO}_2 + 0,67 * 96 \text{ g biomasse}$$

On retrouve donc dans les boues : 0,67*96 g de biomasse, soit $64,32 \text{ g} * 12/32 = 24,12 \text{ g de C}_{\text{org}}$.

De même, l'équation prévoit la formation de $(1-0,67) * 96 = 31,68 \text{ g de CO}_2$, i.e. $31,68 * 12/32 = 11,88 \text{ g/j/hab de C-CO}_2$.

Les 20 % de la DCO non dégradés qui se retrouvent dans les boues représentent 24 g, ce qui correspond à 9 g de C_{org} (par le ratio 12/32), auxquels on ajoute la contribution de la biomasse en C_{org}, $(0,67 * 96 * 12/32) = 24,12 \text{ g}$. Il en résulte **33,12 g/j/hab de C_{org}** dans les boues (Figure 17).

On retrouve ainsi, qu'en entrée de station, 45 g de C-org correspondent à 120 g de DCO.

Hypothèse 2. Rdt Cellulaire Y_h = 0.67

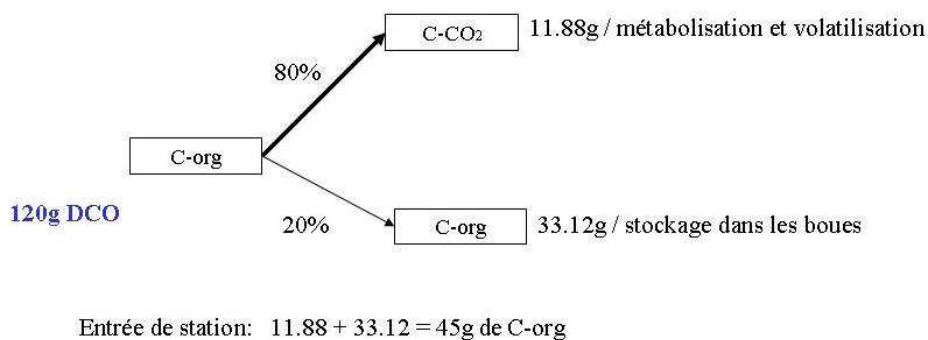


Figure 17. Bilan sur le carbone organique, lors de la métabolisation (Hyp. 2)

Stockage dans les boues et réémissions gazeuses

On admet ici que la part de carbone organique minéralisée dégazera à 99,5 % du CO₂ et 0.5 % du CH₄ (cf Hypothèse 1, Figure 18).

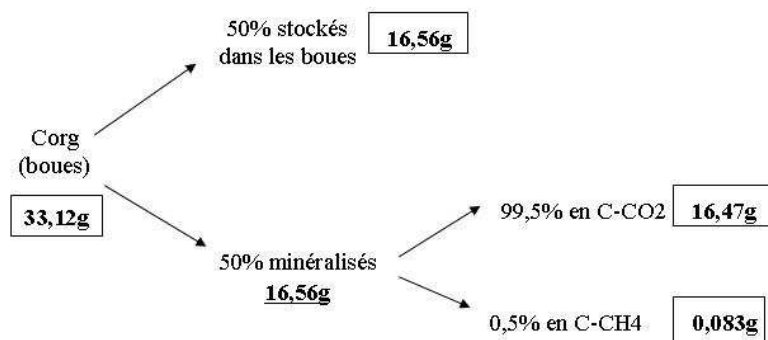


Figure 18. Schéma explicatif du devenir du carbone organique dans les boues

D'après dires d'expert, 10 % du carbone en entrée est sous forme minérale, d'où **5 g**. La Figure 19 détaille le devenir du carbone minéral à l'issue du traitement : 40 % de ce carbone minéral est lessivé, soit **2 g**. Et 60 % est adsorbé dans les boues (**3 g**).

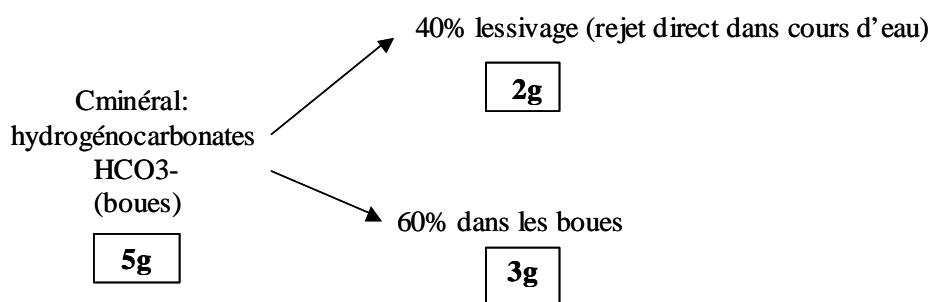


Figure 19. Schéma explicatif du devenir du carbone minéral

En conclusion, pour ce bilan de matière sur le Carbone, on suppose qu'en plus de la fraction de carbone organique métabolisée (par dégradation biologique) qui compte comme **émission primaire** de C-CO₂ et C-CH₄, on a une minéralisation in situ d'une fraction du carbone organique, accompagnée d'une volatilisation « immédiate » du C-CO₂ et du C-CH₄ (**émission secondaire** à partir des boues en dépôt).

C'est pourquoi, dans l'étape d'inventaire on a sommé ces émissions dans les émissions totales à l'air, i.e. :

- 16,79+13,05 = 29,84 g/j/hab de C-CO₂, soit 109,45 g/j de *Carbon dioxide, biogenic* (CO₂) ;
- 0,094+0,07 = 0,164 g/j/hab de C-CH₄, soit 0,22 g/j de *Methane, biogenic* (CH₄).

NB. On pose ici en première hypothèse que le carbone dégazé à l'atmosphère est biogénique, car il est le produit de dégradation de matières organiques par un métabolisme bactérien.

8.4. **Fin de vie des boues : module Epandage/Compostage**

Afin de boucler l'analyse ACV, il est important de renseigner les impacts dus à la fin de vie des boues générées en sortie de STEU.

Le Tableau 16 présente les filières d'élimination des boues en France et en Suisse à partir de données générales assez récentes. Dans son rapport¹², Doka (2007) évalue une distribution

¹² Ecoinvent report No.13 – part IV – Wastewater Treatment, pp. 37-38.

des options de fin de vie des boues en 2000 à partir de données de (BUWAL, 1994)¹³ extrapolées. Celles-ci sont représentées au Tableau 17, qui explicite les hypothèses retenues pour la fin de vie des boues dans le modèle de STEU suisse disponible dans la base de données Ecoinvent.

Tableau 16. Evolution des filières d'élimination des boues en France et en Suisse (% tonnage MS)

| Source | Année | Epandage Agricole | Décharge | Incinération |
|---|-------|-------------------|----------|--------------|
| France | | | | |
| ADEME (2000) | 2000 | 60 | 25 | 15 |
| APCA (Enquête Cemagref) | 2007 | 70 (1) | 12 | 18 |
| (1) dont 46 % en épandage direct et 23 % après compostage préalable | | | | |
| Suisse | | | | |
| BUWAL (2001) | 2000 | 38.6 | 2.4 | 59 |

Tableau 17. Estimation des filières des boues digérées pour différentes classes de capacité de STEU en 2000 (% tonnage MS)

| Source | Classe | Epandage Agricole | Décharge | Incinération |
|------------------------------------|--------|-------------------|----------|--------------|
| Zimmermann <i>et al.</i> , 1996 et | 1 | 28 | 0 | 71,70 |
| BUWAL (2001 ?): | 2 | 38,67 | 0 | 61,30 |
| Extrapolation à l'année 2000 | 3 | 46,86 | 0 | 53,10 |
| à partir de données 1994 | 4 | 71,40 | 0 | 28,60 |
| | 5 | 70,65 | 0 | 29,30 |
| Teneur en eau, %massique | | 93,30 | 92 | 63 |

On remarque que les données retenues par Doka (2007) pour les STEU de Classe 4 (5 321 Equivalent-Habitants) sont proches des chiffres de l'enquête Cemagref (APCA, 2007), ce qui est attendu avec un parc français de STEU dominé par des stations de moins de 5 000 EH.

Nous allons retenir pour la suite de cette étude:

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

Dans les inventaires de données Ecoinvent 2000 pour la production agricole, il n'existe pas de « process » d'application aux champs de boues d'épuration (Nemecek *et al.*, 2007). Il faut donc créer un module Epandage, ainsi qu'un module de Compostage pour les boues qui seront valorisées agronomiquement.

Ces modules étant en cours de finalisation¹⁴, ils feront l'objet de RTI's indépendants où seront notamment explicitées les hypothèses retenues pour modéliser l'épandage et le compostage des boues de STEU, dont les :

- *Emissions liées au stockage*

¹³ BUWAL, 1994. Cité dans Doka, 2007: Ecoinvent report No.13 – part IV – Wastewater Treatment, p37.

¹⁴Dans cette étude on assimilera les boues compostées à des boues épandues directement, en attendant de disposer d'un module de compostage complet. Ainsi, il y aura 70 % de boues directement épandues sur parcelles agricoles.

Les émissions ayant pu se produire lors des stockages temporaires pendant la phase logistique (en bord de parcelles, en containers, etc.) ne sont pas considérées.

- *Engrais minéraux évités*

La quantité d'engrais minéraux « évités » grâce aux apports en N et P principalement des boues est évaluée. Ainsi, l'extraction, la fabrication et le transport de ces engrais minéraux seront pris en compte lorsqu'il y a lieu d'une fertilisation minérale. Cependant, il ne sera pas considéré que l'épandage de boues va changer le nombre ou la fréquence de passage du matériel agricole du fait que l'apport nutritif de ces boues ne va pas substituer totalement une fertilisation classique.

- *Transport des boues*

Il a été pris une distance moyenne de transport de 35 km entre la STEU génératrice de boues et le lieu de stockage intermédiaire, les boues étant transportées par camion benne d'une capacité de 16 tonnes. Le transport entre le lieu de stockage intermédiaire et le lieu d'épandage, distants de 2 km est réalisé par un épandeur attelé à un tracteur de 100 kW (Pradel, 2010).

- *Apport, amendement du sol*

L'apport de matières organiques au complexe argilo-humique du sol (C_{org} et N_{org}) n'est pas pris en compte actuellement du fait de l'absence d'indicateur de fertilité des sols en ACV.

- *Emissions au champ*

Trois cas se présentent à l'heure actuelle, que l'on peut distinguer entre un épandage avec valorisation agronomique et un épandage sans valorisation agronomique (cas des jachères).

Epandage avec valorisation agronomique :

- Option A. Les émissions d'une boue sont considérées comme identiques aux émissions liées aux engrais.
- Option B. Substitution Emissions (boues) aux Emissions (fertilisants minéraux) : Emissions (boues) à calculer par acv3E (logiciel issu du projet ANR Ecodefi).

Epandage sans valorisation agronomique recherchée:

- Option C. 100% des émissions au champ (N, P) dues aux boues prises en compte.

- *Eléments Traces Métalliques*

Il manque encore des données pour quantifier les apports en métaux par les boues, ces éléments métalliques n'étant pas encore bien quantifiés dans les eaux résiduaires entrantes en station.

- *Composés Traces Organiques*

A ce jour, de nombreux CTO ne sont pas encore caractérisés (affectés de facteurs de caractérisation pour certains impacts concernant la santé des écosystèmes et santé humaine) ; mais une étude sur la prise en compte en ACV de ces micropolluants ainsi que des principaux ETM est en cours.

Afin de rester conservatif, dans la suite de cette étude, nous allons retenir l'**Option C**, qui alloue la totalité des émissions aux boues épandues, en l'absence de fertilisation avec engrais minéraux (et donc, d'impacts « évités »).

9. Evaluation des impacts (LCIA)

METHODE DE CALCUL UTILISEE

Sous le logiciel SimaPro, deux analyses des impacts environnementaux ont été réalisées à partir des inventaires établis précédemment. Selon la méthode de calcul choisie, pour une même série de données d'inventaires, on aura une caractérisation différente.

En effet, le calcul des résultats d'indicateur (caractérisation) implique de convertir les résultats d'inventaire en unités commune et d'agréger les résultats convertis au sein de la 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.

La méthode **ReCiPe (H) v.1.05** retenue propose une harmonisation entre des indicateurs de catégories « midpoint » et « endpoint » (dommages). En effet, cette méthode combine les caractérisations calculées par CML 2000¹⁵ pour l'approche « midpoint » et les caractérisations calculées par EcoIndicator 99¹⁶ pour l'approche « endpoint » (Figure 20).

¹⁵ CML, University of Leiden, Netherlands. *Guinée et al.*, 2002.

¹⁶ PRÉ Consultants, Amersfoort, Netherlands. Goedkoop & Spriensma, 1999.

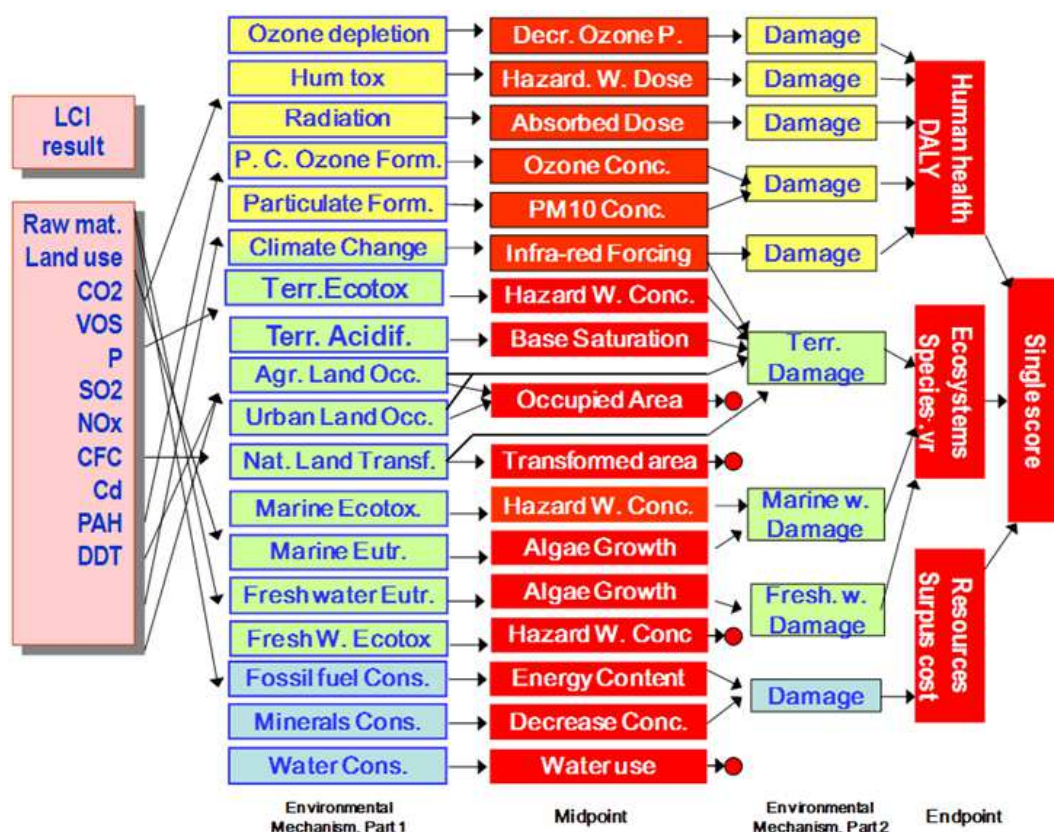


Figure 20. Relations entre données d'inventaires, indicateurs mid/end-point dans ReCiPe 2008 (Handbook ReCiPe 2008, 1st ed. Report I)

Il y a 18 catégories d'impacts « midpoint » et 3 catégories d'impacts « endpoint », répertoriées aux Tableau 18 et Tableau 19.

Tableau 18. Catégories d'impact Midpoint, ReCiPe v.1.05

| Abbr. | Catégorie d'impact | Unité des indicateurs |
|-------|---------------------------------|---|
| 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 Fuel depletion | kg (oil) |

Tableau 19. Catégories d'impact Endpoint, ReCiPe v.1.05

| Abbr. | Catégorie d'impact | Unité des indicateurs |
|-------|---------------------------------|-----------------------|
| HH | Damage to human health | DALY ¹⁷ |
| ED | Damage to ecosystem diversity | species.yr |
| RA | Damage to resource availability | \$ |

La première évaluation des impacts se fera sur les indicateurs midpoint uniquement, et la seconde évaluation se fera sur les indicateurs endpoint.

INTERPRETATION DES RESULTATS

ANALYSE PAR LA METHODE RECIPE MIDPOINT V1.05

La Figure 21 présente les résultats de l'analyse de contribution des différents blocs ou étapes du système FPRv par la méthode ReCiPe v.1.05 sur les catégories d'impact midpoint. A titre d'information, les résultats normalisés de l'analyse d'impact pour ce système sont présentés à la Figure 22.

La normalisation est le calcul de l'importance des résultats d'indicateurs de catégories par rapport à certaines informations de référence (ISO 14 044). Ce calcul est facultatif dans la norme ISO, et il est toujours difficile à interpréter pour un non-spécialiste de l'ACV. Il a cependant l'avantage de rendre commensurables les impacts vis-à-vis de la référence retenue.

Dans notre cas, nous avons réalisé une normalisation par rapport aux impacts moyens d'un citoyen sur un an. En pratique, cela a consisté à transformer chaque résultat d'indicateur (calculé pour notre système d'assainissement par kg de DBO₅) en le divisant par le score moyen d'un habitant pour ce même indicateur.

La normalisation est dans notre cas d'autant plus délicate à interpréter que nous étudions un système de traitement des déchets (en l'occurrence des eaux), c'est-à-dire un système situé en fin d'une multitude d'autres cycles de vie (CV). Or un très grand nombre de CV des produits et services de grande consommation se finissent dans un schéma d'assainissement domestique (nourriture, produits d'entretiens, eaux de lavage). Il est donc tout à fait logique que la normalisation mette en évidence une contribution relative très élevée en Eutrophisation (F-Eu et M-Eu) et en Ecotoxicité d'eau douce (FET) en particulier (Figure 22).

¹⁷ DALY : Disability Adjusted Lost Years of life.

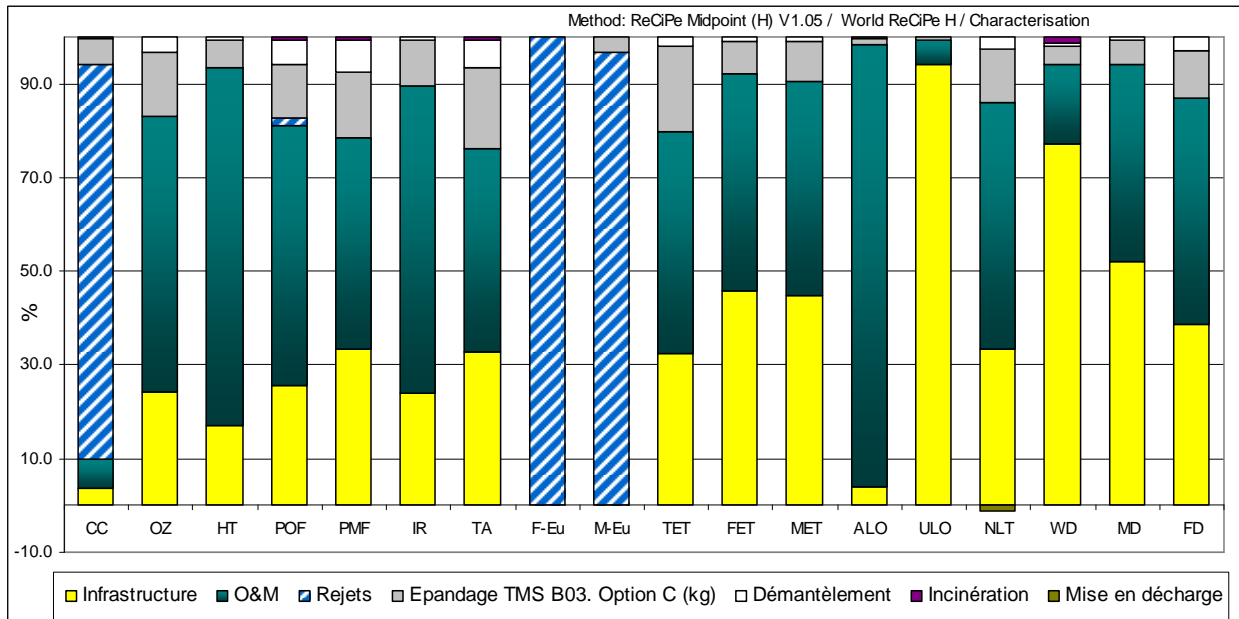


Figure 21. Diagramme de contribution, système FPRv 806 EH

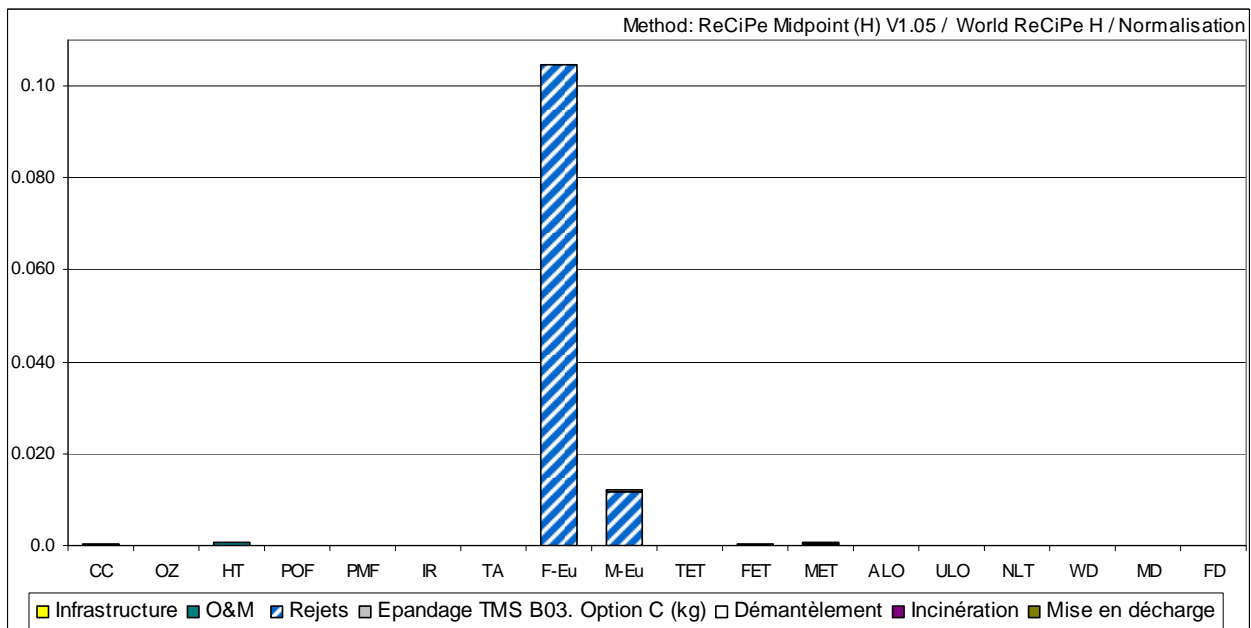


Figure 22. Résultats normalisés, système FPRv 806 EH

ANALYSE PAR LA METHODE ReCiPe ENDPOINT V1.05

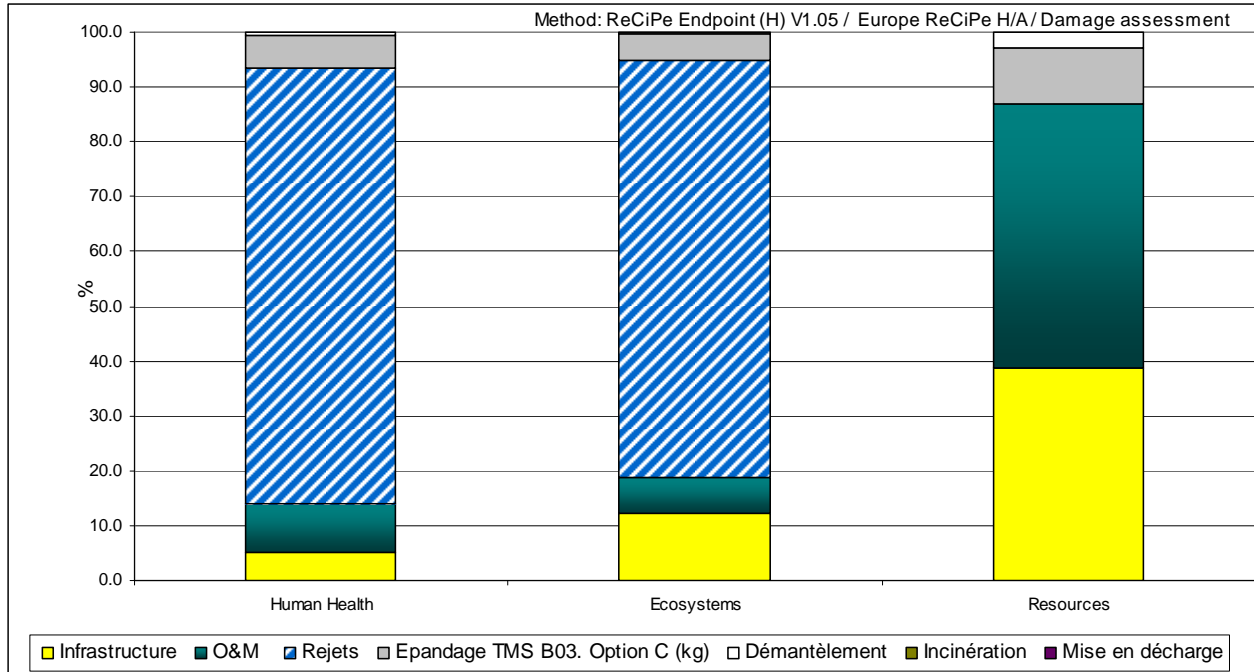


Figure 23. Contributions relatives aux catégories endpoint du système FPRv

La Figure 23 montre les contributions du système FPRv sur les trois impacts endpoint qui sont : la santé humaine, la diversité des écosystèmes et la disponibilité des ressources. On note l'importance des rejets de la STEU contribuant à la majorité des impacts sur la santé humaine et les écosystèmes. L'utilisation des ressources est logiquement dominée par l'infrastructure de la STEU et son Opération & Maintenance.

Il est également possible d'agglomérer les scores sur les catégories endpoint du système FPRv sur un indicateur unique (exprimé en millipoints), comme présenté à la Figure 24. Nous déconseillons ce mode de représentation qui, sous une simplicité apparente d'interprétation (i.e. indicateur unique) masque en fait des pondérations et une normalisation par rapport à un citoyen moyen.

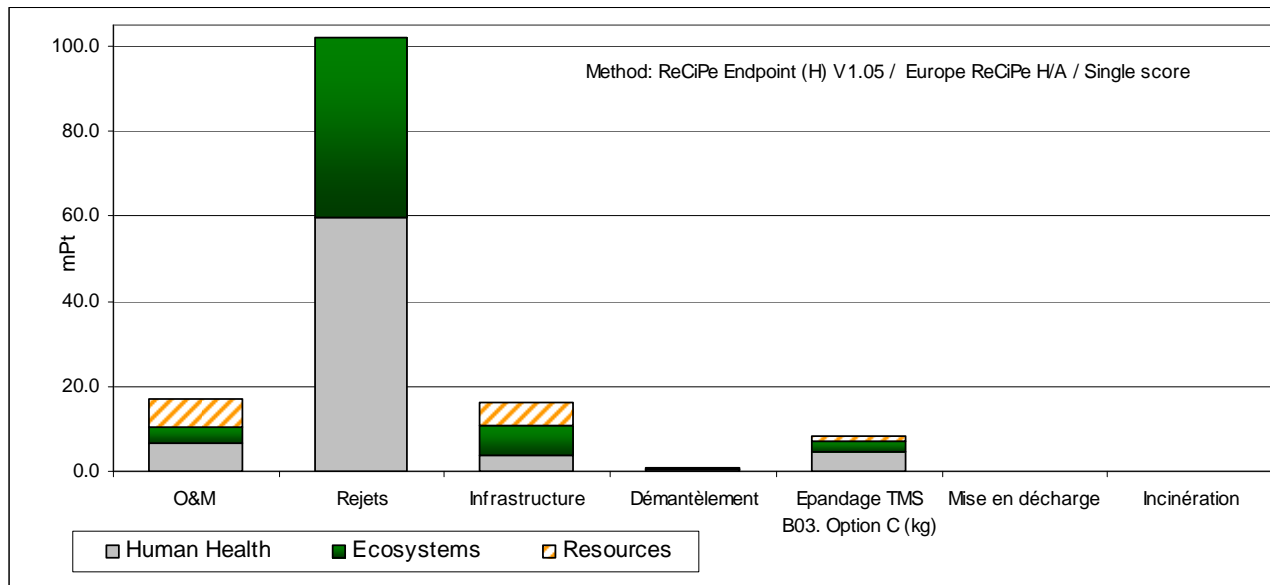


Figure 24. Agrégation des scores endpoint du système FPRv sur un indicateur unique (millipoints)

10. Conclusions

Le présent rapport éclaire sur la quantité et la qualité des informations à recueillir lors de la phase d'inventaire d'une ACV d'un système d'assainissement. Il permet d'appréhender le poids respectif des différents contributeurs aux impacts. Enfin, il met en lumière l'importance des émissions dans l'air, l'eau et le sol des substances azotées et/ou carbonées rendant nécessaire la réalisation de bilans matières équilibrés entre les entrées dans les eaux usées et les émissions/rejets (cf. Tableau 15). Il sera donc crucial de pouvoir suivre les évolutions des émissions et rejets de la STEU étudiée selon le mode de fonctionnement (normal / dégradé).

Cette étude propose un modèle ACV de filière de traitement des eaux usées d'origine domestique, mettant en œuvre des filtres plantés de roseaux, à flux vertical. Le prochain rapport présentera une comparaison entre cette filière et la filière par boues activées, et reprendra aussi le modèle de référence boues activées disponible dans Ecoinvent.

Dans les prochains rapports, les bilans de matière incluront également des micropolluants et des pathogènes, afin de rendre compte des efficacités de traitement des filières de base, couplées ou non avec des traitements tertiaires.

Sur le plan de la présentation des résultats et de leur interprétation, la présente étude nous amène à formuler les conclusions suivantes :

- Les indicateurs « midpoint » (avec leurs 18 catégories d'impacts pour la méthode retenue) apportent une information riche et détaillée permettant d'identifier facilement les principaux contributeurs à chaque catégorie d'impact (substances, étapes du cycle de vie, process, etc.). Ils sont donc à privilégier pour d'identifier les pistes d'amélioration et d'optimisation possibles du système lors d'un travail **d'éco-conception**.

- Pour ce qui concerne la prise de décision, notamment pour les choix entre filières d'épuration, les indicateurs « midpoint » peuvent être délicats à interpréter en raison de leur caractère multicritère avec un grand nombre d'indicateurs. Cette difficulté peut être amplifiée lorsque les différences s'expriment sur des catégories d'impacts difficiles à hiérarchiser¹⁸. Une approche avec des indicateurs « endpoint » correspondants aux trois aires de protections de l'ACV (Santé Humaine, Ecosystèmes, Ressources) peut alors être utilisée. Dans ce cas, il faut bien faire prendre conscience aux décideurs du degré d'incertitude dans les chaînes de causalités permettant d'évaluer les indicateurs endpoint aux midpoint. En l'état actuel du développement des méthodes ACV, l'utilisation d'indicateurs uniques est déconseillée. En effet, ceux-ci masquent sous une simplicité d'interprétation apparente liée au score unique des pondérations et des normalisations discutables.

¹⁸ Par exemple, une filière va utiliser beaucoup d'énergie électrique nucléaire (i.e. Ionising Radiation + Abiotic depletion) et une autre, plus extensive, va être moins efficace en terme de traitement et donc générer plus d'Eutrophisation potentielle.

11. ANNEXES

11.1. Références

- Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, Groupe Macrophytes et Traitement des Eaux (Ouvrage Collectif), 2005 - Epuration des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes - Recommandations techniques pour la conception et la réalisation, pp.12-13
- Boutin, C., Duchêne, P., Liénard, A., 1998 – Filières dépuratoire adaptées aux petites collectivités – Documentation technique FNDAE n°22 – CEMAGREF
- Boutin, C., Bois, J.S., Bouvard, V., Cadic, G., Dodane, P., Iwema, A., Lapauze, P., Lesavre, J., Pigneur, Y., Savoye, D., Thoumy, D., 2007 – Cadre Guide pour un Cahier des Clauses Techniques Particulières CCTP Filtres Plantés de Roseaux, ministère chargé de l'agriculture – 76p.
- BUWAL, 1994 - Daten zum Gewässerschutz in der Schweiz. Umwelt-Materialien Nr. 22, Gewässerschutz, BUWAL, Berne, Switzerland.
- Canler, J.P., Perret, J.M., 2004 – Etude des pré-traitements compacts basés uniquement sur le tamisage fin – Documentation technique FNDAE n°28 – CEMAGREF, 2004
- Comby A., Reeb G., Werckmann M., Quaranta G. – Comparaison de différentes filières d'épuration plantées de macrophytes – Méthode de l'analyse du cycle de vie – Atelier Reeb, 2008
- Directive Eaux résiduaires urbaines 91/271/CEE (JOCE OCE n° L. 135/40 du 30 mai 1991):
http://www.ineris.fr/aida/?q=consult_doc/consultation/2.250.190.28.8.4451
- 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”
- Dufour, E., 2009 – Analyse du Cycle de Vie, Traitement des eaux usées domestiques par Filtres plantés de roseaux à flux vertical. Cemagref, 2009.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., van Zelm, R. Handbook ReCiPe 2008, 2009. 1st ed. Report I: Characterisation. Available at the following:
http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf (Accessed October, 2nd 2010)
- Liénard, A., Boutin, C., Molle, P., Racault, Y., Brissaud, F., Picot, B., 2004 – Filtres plantés de roseaux à flux vertical et lagunage naturel en traitement d'eaux usées domestiques en France : comparaison des performances et des contraintes d'exploitation en termes de pérennité et fiabilité – Ingénieries EAT numéro spécial 2004 – CEMAGREF, p.87-98
- Maillard, P., Peu, P., Tallec, G., 2007 – Mesure sur site d'émissions de gaz à effet de serre issus de bioprocédés : Mise au point de méthodes et détermination de facteur d'émissions – Programme interne MAITRISES – Département milieux aquatiques, qualité, rejets.
- Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., 2004 – Traitement des eaux usées domestiques par marais artificiels : état de l'art et performances des filtres plantés de roseaux en France. Ingénieries N° Spécial 2004, pp. 23-32
- Molle, P., 2008 – Elimination du phosphore par filtres plantés de roseaux – Techniques de l'Ingénieur, n° 8 p.1-2

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. Accessed online on: www.ecoinvent.ch

OTV, 1997 – Traiter et Valoriser les boues. Ouvrage Collectif, 457p.

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)

Troesch, S., 2009 – Traitement et valorisation des boues et des matières de vidange par lits de séchage plantés de roseaux – thèse Doctorat, spécialité Génie des Procédés, Savoie, 306p.

Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R., 1998 – Constructed wetland for wastewater treatment in Europe – Backhuys Publishers, Leiden – The Netherlands, 366 p.

11.2. ***Annexes Techniques***

SYNTHESE ACV DISPONIBLES : TABLEAU 20

Tableau 20. Synthèse des ACV disponibles

| Source | | Système (Type de STEU) modélisé | UF | Périmètre du système étudié | Résultats disponibles (LCI, LCIA, accès aux sous modules ...) | Commentaires (allocations, coûts évités...) |
|-----------------------------|---|--|---------------------------------|---|--|--|
| Ecoinvent | Base de données d'ACV (format EcoSpold ISO/TS 14048) | <p>Dans Ecoinvent, les stations d'épuration sont réparties en 5 classes, toutes distinguées de par leur capacité entre autre, illustrée en équivalent-habitant (EH)suisse :</p> <p><u>Classe 1</u> : 233 225 EH <u>Classe 2</u> : 71 133 EH <u>Classe 3</u> : 24 865 EH <u>Classe 4</u> : 5 321 EH <u>Classe 5</u> : 806 EH</p> <p>Ce sont des stations à 3 étapes de traitement de l'eau (physique, biologique et chimique), avec une digestion des boues, selon la technologie de la Suisse.</p> | m³ d'eau usée | Les matières premières, le réseau, les transports, le traitement en station d'épuration, la digestion des boues, et l'élimination des boues, qui comprend l'épandage et l'incinération. | <p>Il y a l'inventaire comprenant le matériel, l'énergie et les émissions, les résultats de l'inventaire attribué à la catégorie d'impacts.</p> <p>Process type : Unit* et system*</p> | <p>Pour toutes les STEU disponibles, les boues résiduelles sont soit incinérées, soit épandues. Pour les classes 1 et 2, l'incinération est majoritaire. Pour la classe 3, les 2 devenir des boues sont équivalents, et pour les classes 4 et 5, l'épandage y est majoritaire.</p> |
| Travaux atelier Reeb | Publication à congrès | Stations d'épuration à filtres plantés de macrophytes. | 1 EH | L'analyse s'est fait uniquement sur la construction et le fonctionnement des filières d'épuration considérées. | <p>Pas d'inventaire, seulement la source des données pour chaque processus.</p> <p>L'évaluation des impacts est donnée.</p> <p>Méthode utilisée: CML (Simapro)</p> <p>Process type : system*</p> | <p>L'étape de fonctionnement de la filière d'épuration n'a pas été prise en compte que par rapport à la consommation électrique de la station.</p> |

Onema
Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Cemagref
Parc de Tourvoie
BP 44,
92163 Antony cedex
01 40 96 61 21
www.cemagref.fr



*Eva RISCH et Philippe ROUX
sont membres du pôle ELSA
(www.elsa-lca.org). Ils
remercient les autres membres
du pôle pour leurs précieux
conseils.*