



**HAL**  
open science

# Évaluation des performances environnementales des procédés de traitement des boues d'épuration par l'Analyse du Cycle de Vie

C. Gourdet

► **To cite this version:**

C. Gourdet. Évaluation des performances environnementales des procédés de traitement des boues d'épuration par l'Analyse du Cycle de Vie. Sciences de l'environnement. 2014. hal-02600266

**HAL Id: hal-02600266**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02600266v1>**

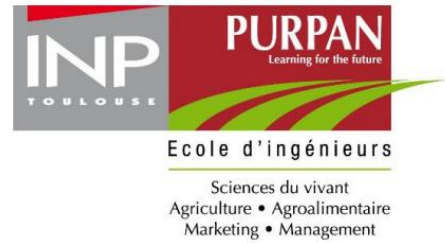
Submitted on 16 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Institut national de  
recherche en sciences  
et technologies pour  
l'environnement et  
l'agriculture



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

### Première partie

Evaluation des performances environnementales des  
procédés de traitement des boues d'épuration par  
l'Analyse du Cycle de Vie



Par Claire GOURDET  
Correcteur : Anne CALMON

# Remerciements

---

Je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réussite de mon stage et plus particulièrement les personnes que je cite ci-dessous :

Je tiens donc tout d'abord à remercier chaleureusement mes maitres de stage, Marilys Pradel et Romain Girault pour m'avoir accompagnée tout au long de ce stage. Je tiens également à les remercier pour leur disponibilité et leurs conseils qui m'auront fortement aidé, ainsi que pour leur bonne humeur au travail !

Je voudrais ensuite remercier l'ensemble de l'équipe du site de Montoldre (aussi bien les permanents que les thésards et les stagiaires !) pour leur accueil et leur bonne humeur, sans lesquels mon stage n'aurait pas été aussi bien.

Je souhaite également remercier Anne Calmon, ma tutrice de stage à l'EI Purpan pour m'avoir apportée son aide lors de la réalisation de ce rapport.

# Résumé

---

Jusqu'à présent, la majorité des études portant sur les impacts environnementaux des stations d'épuration (STEP) concernaient leurs filières de traitement des eaux. Cependant, les filières de traitement des boues issues de l'assainissement des eaux sont également responsable d'une part non négligeable des impacts des STEP sur l'environnement.

L'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) et IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) ont donc lancé un projet d'évaluation des impacts environnementaux des STEP, dans lequel les filières de traitement et de valorisation des boues seraient prises en compte. Dans le cadre de ce projet, plusieurs études ont déjà été réalisées, notamment, sur la quantification des impacts liés à chacun des procédés de traitement et de valorisation des boues.

Cette étude diffère des précédentes car elle a pour but de présenter les impacts environnementaux liés à des filières de traitement des boues globales, c'est-à-dire, à des ensembles de procédés de traitement dépendants les uns des autres. Six filières différentes seront ainsi étudiées au cours de cette analyse. La valorisation des boues sera également prise en compte dans cette étude, cependant, seul l'épandage agricole sera considéré. L'évaluation des impacts sera effectuée grâce à la méthode de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et au logiciel ACV SimaPro.

Ce rapport présente uniquement la méthodologie mise en place pour effectuer ces ACV et se base sur l'exemple d'une des filières étudiées. De plus, l'ensemble des résultats présentés dépendent fortement des hypothèses réalisées dans l'ACV, ils sont donc à prendre avec précaution.

**Mots-clés :** Station de traitement des eaux usées, Analyse du Cycle de Vie, Boues d'épuration, Inventaire du cycle de vie, Conditionnement, Epaissement, Déshydratation, Stabilisation, Epandage agricole,

# Abstract

---

Until now, most studies on the environmental impacts of wastewater treatment plants (WWTP) only concerned their water treatment sectors. However, the wastewater sewage sludge's treatment processes are also responsible for a significant part of the environmental impacts of WWTP.

ONEMA (National Agency for Water and Aquatic Environments) and IRSTEA (National Institute for Research in Science and Technology for Environment and Agriculture) launched a project to assess the environmental impacts of WWTP, in which one, the sludge's treatments and their disposal routes would be taken into account. As part of this project, several studies had already been carried out, including the quantification of environmental impacts associated with each of the sludge's treatment processes and reusing methods.

This study differs from previous ones because it intends to present the environmental impacts associated with global sludge's treatment systems, that is to say, with a whole of treatments processes dependent of each other. Thus, six different systems will be studied in this analysis. Sludge reusing will also be taken into account in this study, however, only land spreading will be considered. The impact assessment will be carried out through the method of Life Cycle Analysis (LCA) and more precisely, with the LCA software SimaPro.

This report only presents the methodology used to realize these LCAs and it is based on the example of one of the systems studied. In addition, the results presented in this report rely heavily on hypothesis made in the LCA, so they have to be treated with caution.

**Key words:** Wastewater treatment plant, Life Cycle Analysis, Sewage sludge, Life Cycle Inventory, Conditioning, Thickening, Dewatering, Stabilization, Land spreading

# Sommaire

---

1.	IRSTEA, un organisme de recherche pour l'environnement et l'agriculture .....	10
2.	La filière de production des boues : Du traitement à la valorisation .....	11
2.1.	Le traitement des eaux usées et la production de boues d'épuration .....	11
2.1.1.	La phase de prétraitement .....	12
2.1.2.	Les traitements des eaux usées.....	12
2.2.	Les traitements des boues d'épuration.....	15
2.2.1.	Le conditionnement des boues .....	17
2.2.2.	L'épaississement des boues .....	17
2.2.3.	La déshydratation des boues.....	18
2.2.4.	Le séchage des boues .....	20
2.3.	La valorisation des boues d'épuration .....	20
2.4.	L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) .....	22
3.	Evaluation des performances environnementales de filières de traitement et de valorisation des boues d'épuration par l'ACV .....	29
3.1.	Présentation de la mission .....	29
3.2.	Choix des filières « boue » pour la réalisation de l'étude .....	30
3.3.	Réalisation de l'ACV.....	33
3.3.1.	Définition des objectifs et champ de l'étude .....	33
3.3.1.1.	Objectifs de l'étude et frontières du système .....	33
3.3.1.2.	Hypothèses réalisées.....	35
3.3.2.	Inventaire des flux.....	38
3.3.3.	Evaluation des impacts environnementaux .....	41
3.3.4.	Présentation des résultats et interprétation.....	43
3.4.	Analyse de sensibilité (deuxième partie du stage).....	46

# Sigles et abréviations

---

ACV : Analyse du Cycle de Vie

Cao : Chaux vive

Cd : Cadmium

CEMAGREF : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts

CH<sub>4</sub> : Méthane

CO : Monoxyde de carbone

COV : Composé Organique Volatil

CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone

Cr : Chrome

CTO : Composés-Traces Organiques

Cu : Cuivre

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

EH : Equivalent Habitant

ETM : Eléments-Traces Métalliques

FeCl<sub>3</sub> : Chlorure ferrique

Hg : Mercure

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

MA : Matière Active

MB : Matière Brute

MS : Matière Sèche

Ni: Nickel

NH<sub>3</sub>: Ammoniac

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: Ion ammonium

$\text{NO}_2^-$ : Nitrite

$\text{NO}_3^-$ : Nitrate

NOx: Oxyde d'azote

$\text{N}_2\text{O}$ : Protoxyde d'azote

ONEMA: Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

Pb: Plomb

$\text{PO}_4^{3-}$  : Ion phosphate

$\text{SF}_6$  : Hexafluorure de soufre

$\text{SO}_2$  : Dioxyde de soufre

STEP: Station d'Épuration

Zn: Zinc



# Introduction

---

L'eau est un élément indispensable à la vie qui est également essentiel à la réalisation de la majorité des activités humaines. Cependant, depuis plusieurs années, il est possible d'observer une baisse de la consommation en eau potable des français (MONTGINOUL, 2013). Celle-ci a effectivement diminué de plus de 8% entre 2004 et 2008 par exemple (MEDDE, 2011). Cette réduction représente un élément favorable sur le plan environnemental, tout d'abord, puisque les ressources en eau seront de cette façon davantage préservées. De plus, si la consommation d'eau diminue, il y aura également moins d'eaux usées à traiter par la suite. En effet, selon la loi française il est obligatoire de traiter les eaux usées avant de les rejeter dans la nature. D'autre part, la réduction des volumes d'eaux usées permettra également de réduire les quantités de boues d'épuration, puisque ces dernières sont produites lors du traitement des eaux usées. En 2007, cette production de boues d'épuration s'élevait à 1.2 millions de tonnes (MEEDDAT, 2009). Ces boues sont considérées comme des déchets depuis 1997 (LEGIFRANCE, 1997), elles devront donc être traitées puis valorisées ou éliminées, comme l'indique la loi.

Les stations d'épuration sont donc dotées de deux types de filières : Une filière de traitement des eaux, afin de pouvoir les rejeter dans la nature sans polluer le milieu extérieur, mais aussi une filière de traitement des boues. Cette dernière sera plus ou moins complexe suivant la taille de la station, le type de boue attendu en fin de traitement, et son type de valorisation.

Chacun des procédés de traitement a, au même titre que n'importe quelle autre activité humaine, des conséquences sur l'environnement. La loi Grenelle I, votée en 2009 prévoit d'ailleurs des mesures afin de réduire l'impact environnemental des filières de traitement des eaux et des boues. Dans ce cadre-là, il est devenu primordial de déterminer l'impact des filières de traitement et de valorisation des déchets sur l'environnement. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une des méthodes employées pour identifier ces impacts.

Plusieurs études ont déjà été réalisées dans ce but, notamment par IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture), organisme où j'ai réalisé mon stage. La mission sur laquelle j'ai travaillé fait partie d'un projet pluriannuel dirigé par l'IRSTEA et financé par l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques), visant à déterminer la qualité environnementale des stations de traitement des eaux usées françaises (la filière de traitement des boues étant comprise dans ce projet d'évaluation).

A terme, l'ensemble des études réalisées dans le cadre de ce projet devraient aboutir à l'élaboration d'un outil d'intégration de la filière boue dans l'ACV des systèmes d'assainissement, ce qui permettra tout d'abord de définir des filières boue optimales, mais aussi d'identifier les différentes étapes de traitement qui devront être améliorées en priorité.

Contrairement aux études précédentes qui ont étudié les impacts environnementaux de l'ensemble des procédés de traitement et de valorisation des boues indépendamment les uns des autres, ma mission de travail a la particularité de porter sur des filières boue globales. Cela signifie que dans le cadre de cette étude, nous étudierons les impacts environnementaux de plusieurs filières de traitement des boues, à partir du premier procédé de traitement jusqu'à sa valorisation finale. Cependant, dans cette étude, nous avons choisi de ne considérer que la valorisation agricole.

Ensuite, dans un second temps, ce travail permettra d'effectuer une analyse de sensibilité sur la base des ACV précédemment réalisées. Mon stage se déroule donc en deux parties, la première ayant été consacrée à la réalisation des ACV de trois filières types, afin de répondre à la problématique suivante :

**Quels sont les principaux procédés de traitement ou de valorisation des boues devant être optimisés afin de réduire leur impact environnemental respectif ?**

La première partie de ce rapport sera d'abord consacrée à la présentation de l'organisme de recherche où j'ai effectué mon stage, l'IRSTEA.

Ensuite, afin de mieux cerner la thématique de la mission, les principaux traitements des eaux usées ainsi que les procédés d'assainissement et de valorisation des boues seront présentés dans la seconde partie du rapport. Pour finir, la méthodologie ACV sera également expliquée dans cette partie ainsi que son application à la gestion des déchets.

Enfin, pour finir, dans la dernière partie de ce rapport, la méthodologie mise en place sera présentée et illustrée au travers de l'exemple d'une des filières boue étudiée pendant le stage. Les résultats seront ensuite présentés avant de conclure.

## 1. IRSTEA, un organisme de recherche pour l'environnement et l'agriculture

L'IRSTEA (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) est un institut de recherche créé en 1981. Anciennement CEMAGREF (Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts), il devient IRSTEA en 2011 afin de répondre aux missions actuelles de l'institut. Ces missions et recherches sont aujourd'hui centrées sur des problématiques telles que l'aménagement durable des territoires, la gestion de l'eau et les risques associés, l'étude des écosystèmes et de la biodiversité... alors qu'à l'origine, le CEMAGREF était davantage spécialisé sur les problèmes de mécanisation et d'aménagement rural.

IRSTEA est divisé en 8 grands centres de recherche situés à Aix-en-Provence, Antony, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon-Villeurbanne, Montpellier, Nogent-sur-Vernisson et Rennes, chacun possédant ses propres axes de recherche. L'équipe du centre de Clermont-Ferrand travaille sur deux grands thèmes de recherche, qui sont:

- les innovations technologiques pour l'agriculture raisonnée et pour l'environnement
- le devenir des territoires ruraux (développement d'outils, de méthodes d'aide à la décision, etc.)

Le centre de Clermont-Ferrand possède plusieurs particularités. Premièrement, il est divisé en deux sites : l'un situé à Aubière, sur le campus universitaire des Cézeaux de Clermont Ferrand ; le second se trouvant à Montoldre, à une vingtaine de kilomètres de Vichy. De plus, ce site est le seul à gérer une exploitation agricole.

Le centre de Clermont-Ferrand regroupe plusieurs unités de recherche dont celle des technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes (TSCF) qui mobilise des agents sur les sites d'Aubière et de Montoldre. Cette unité de recherche a pour objectif de fournir des outils pour une agriculture compétitive respectueuse de l'environnement.

Cette unité de recherche est divisée en trois équipes de recherche : l'équipe travaillant sur les systèmes d'information communicants et agri-environnementaux (COPAIN), celle étudiant les technologies pour l'épandage, les agroéquipements et la mobilité (TEAM) et enfin, l'équipe travaillant sur les matériaux et les milieux (Carac'Terre). Les agents de Montoldre appartenant à cette dernière équipe conduisent des recherches sur les procédés mécaniques appliqués à l'optimisation des procédés de traitement et de valorisation des produits résiduels organiques (boues résiduelles, effluents d'élevage) et sur leurs conséquences environnementales. L'analyse environnementale des traitements et de la valorisation des boues des stations d'épuration via la méthode ACV est donc réalisée dans ce cadre-là.

Cette méthode d'analyse sera détaillée dans la deuxième partie de ce rapport, après la présentation de la filière générale de traitement des eaux usées et des boues d'épuration.

## 2. La filière de production des boues : Du traitement à la valorisation

Cette grande filière de production peut être divisée en trois phases (Figure 1): le traitement des eaux usées puis le traitement et la valorisation des boues d'épuration. Chacune de ces phases est décrite ci-dessous.

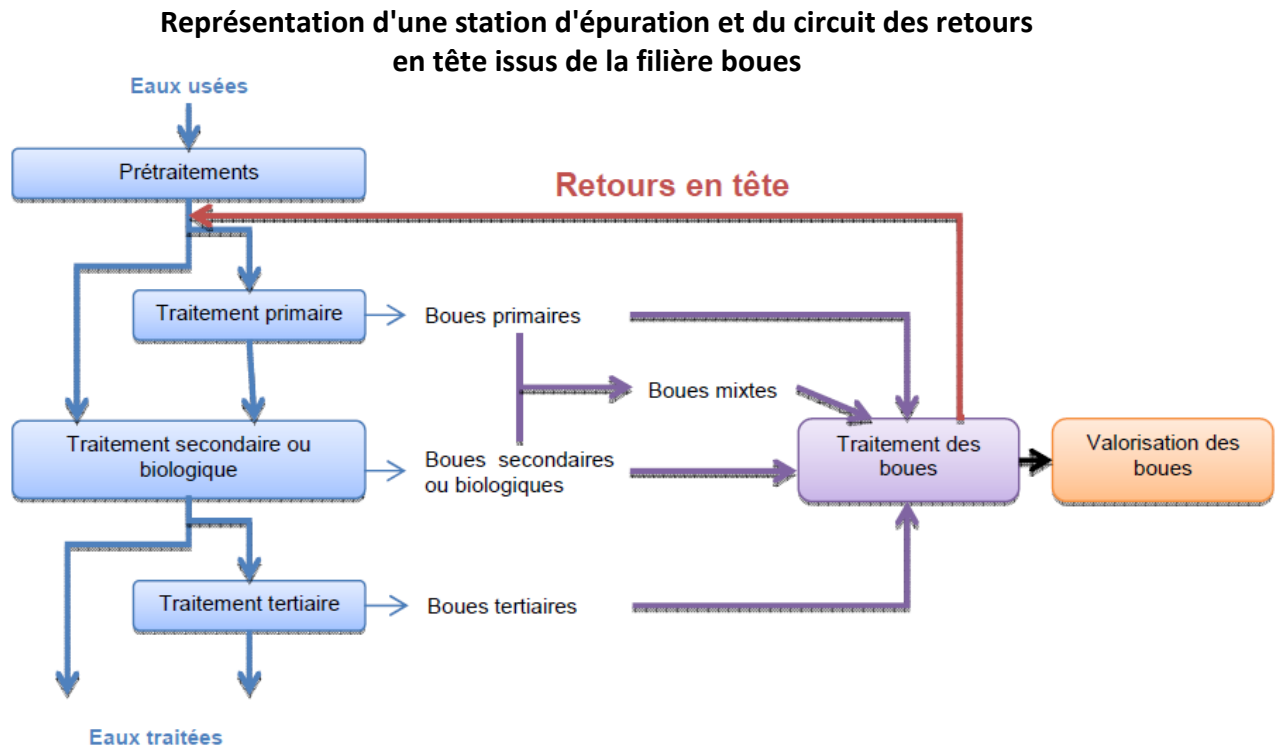


Figure 1: Représentation d'une station d'épuration (GIRAULT et al., 2014)

### 2.1. Le traitement des eaux usées et la production de boues d'épuration

En 2007, 31,6 milliards de mètres cubes d'eau ont été prélevés sur le territoire français dont près de 60 % pour la création d'énergie, 18 % pour les usages domestiques des habitants, 12 % pour l'irrigation et enfin 10 % destinés à l'industrie (COMMISSARIAT GENERAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE, 2012). L'eau est ainsi un élément indispensable à la vie et à la majorité des activités humaines. Cependant, bien que la France dispose de ressources importantes (Centre d'information sur l'eau, 2012), la préservation des zones aquatiques, et plus particulièrement, leur conservation en bon état chimique et biologique est primordial. Dans cet objectif, une première directive européenne instaurée en 1991 fixe les règles à respecter en matière de traitement des eaux usées urbaines. Cette directive, mise en application en France via la loi sur l'eau de 1992 impose, entre autres, la collecte et l'assainissement des eaux usées pour l'ensemble des agglomérations françaises avant leur rejet dans la nature. Puis, en 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) renforce la protection de l'eau au niveau européen et impose l'amélioration de l'état chimique et écologique de tous les milieux aquatiques pour 2015. Cette directive est transposée en France par l'intermédiaire de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques datant de 2006. Cette loi reprend les principaux objectifs de la directive européenne mère, c'est-à-dire, qu'elle impose que l'ensemble des milieux aquatiques français aient atteint un bon état, que ce soit au niveau écologique ou chimique, en 2015 (MEDDE, 2013a).

Cependant, malgré ces réglementations, 7% des stations d'épuration n'étaient toujours pas conformes aux normes concernant le traitement des matières organiques et des nutriments contenus dans les eaux usées en 2009, principalement par rapport au traitement du phosphore et de l'azote (MEDDE, 2013a).

En effet, après leur arrivée sur la station d'épuration, les eaux usées doivent obligatoirement subir un certain nombre de traitements afin de réduire leur charge polluante. Il est possible de séparer l'ensemble de ces traitements en deux phases de prétraitement et de traitement. Ces deux étapes sont présentées ci-dessous.

### 2.1.1. La phase de prétraitement

Cette phase englobe l'ensemble des procédés qui seront appliqués sur les eaux usées afin de supprimer les éléments qui pourraient gêner le bon déroulement des étapes suivantes de la filière (Figure 2).

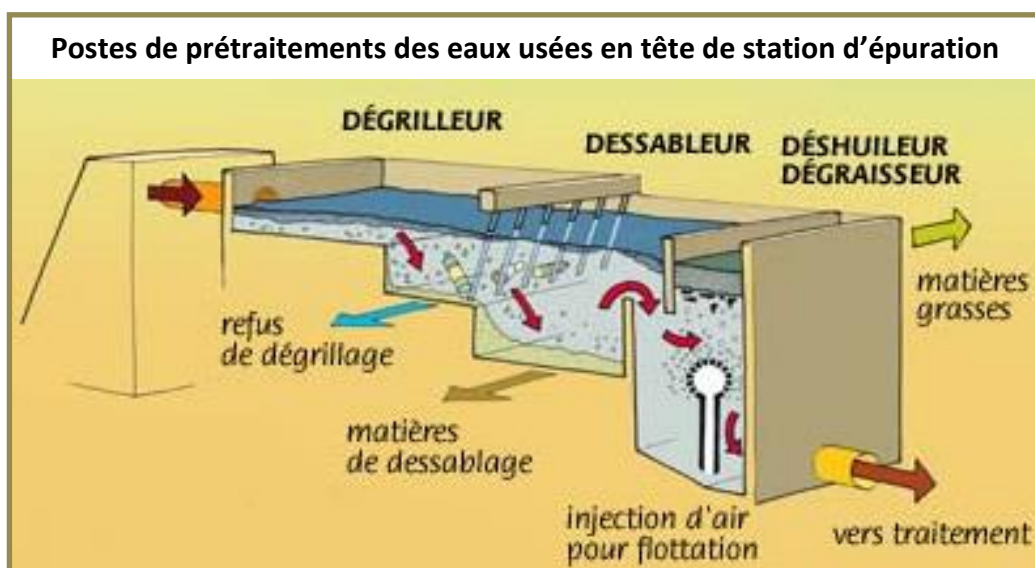


Figure 2: les prétraitements des eaux usées (ADEME et COMITE NATIONAL DES BOUES, 2001)

Elle consiste en un **dégrillage**, qui va permettre de retirer de l'eau tous les déchets dont la taille est supérieure à 3 millimètres, et ainsi d'éviter que les canalisations ne soient par la suite bouchées.

On trouve ensuite le **dessablage**, qui permettra d'enlever les sables et graviers contenus dans les eaux pour éviter que ceux-ci ne viennent abimer les conduits et les appareils de traitement.

Enfin, le dernier procédé de cette phase est le **déshuilage**. Cette étape est importante pour éviter l'accumulation de graisse dans les conduits, ce qui pourrait endommager les appareils, mais aussi pour limiter les rejets de particules grasses dans les milieux naturels à la fin du processus d'assainissement (DEGREMONT, 2005).

### 2.1.2. Les traitements des eaux usées

Les eaux prétraitées vont ensuite subir différentes étapes de traitement. La première étape correspond au traitement primaire. Il s'agit d'une simple décantation des eaux usées pour éliminer une partie des matières polluantes en suspension qu'elles contiennent. Cette étape n'est pas systématiquement appliquée.

Les eaux passent ensuite par le traitement secondaire qui se fait par voie biologique. Celui-ci consiste à « cultiver » des microorganismes dans les ouvrages d'épuration afin qu'ils dégradent la matière organique présente (sucres, protéines, etc.) en suspension et dissoute (ADEME et CNB, 2001). Pour ce qui est de l'azote par exemple, les microorganismes vont dégrader l'azote ammoniacal selon la réaction de nitrification, c'est-à-dire, en le transformant en nitrite puis en nitrate, comme le représente la Figure 3. Les microorganismes dégradent aussi l'azote en réduisant les nitrates en diazote selon la réaction de dénitrification (Figure 4).

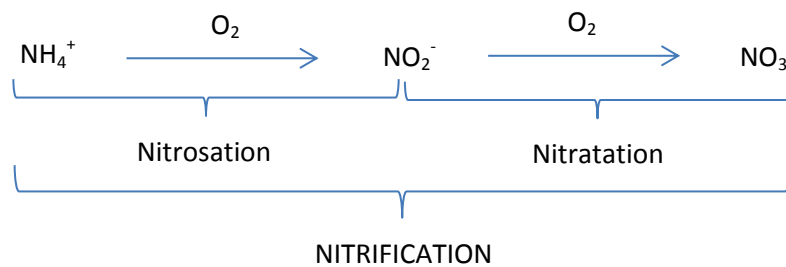


Figure 3: Schématisation de la nitrification (CANLER et al., 2001)

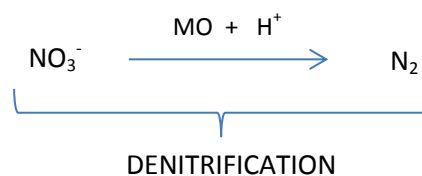


Figure 4: Schématisation de la dénitrification (CANLER et al., 2001)

La matière organique représente une source de pollution dans les milieux aquatiques naturels car sa dégradation va induire une consommation de dioxygène, qui va concurrencer la survie des êtres vivants aquatiques.

Les eaux riches en microorganismes passeront ensuite dans un clarificateur, qui est en fait un bassin de décantation secondaire.

Enfin, la troisième étape de traitement correspond au traitement tertiaire. Ce type de traitement des eaux, complémentaire des deux précédents, va permettre d'éliminer une quantité supplémentaire de matière en suspension, de phosphore et de micropolluants encore présents dans les eaux usées (DEGREMONT, 2005).

Suivant l'origine des eaux usées (ménagères ou industrielles) et suivant le type de traitement appliqué aux eaux usées, les déchets issus de ces traitements, appelés boues résiduaire, auront une composition et des caractéristiques différentes. Nous allons ici nous concentrer sur les boues résiduaire urbaine. Parmi ces dernière, on différencie :

- Les boues primaire, obtenue après un traitement primaire des eaux usées. Elles sont riche en matière minérale (terre, sable...) et en élément organique (JOLLIET et al., 2005)
- Les boues secondaire ou biologique, qui proviennent des eaux usées digérées par des microorganismes puis clarifiées. Ces boues sont essentiellement constituées de microorganismes et de leurs sécrétions (JOLLIET et al., 2005).

- Les boues mixtes : Elles sont constituées d'un mélange de boues primaires et secondaires.
- Les boues tertiaires : Ces boues sont riches en sels minéraux et contiennent aussi une forte concentration de l'élément coagulant.  
Ce dernier type de boue est beaucoup moins représenté que les boues primaires et secondaires (CHABAT, 2013).

A l'origine, ces boues contiennent généralement 98% à 99% d'eau. La teneur en eau est un paramètre fréquemment utilisé pour caractériser une boue, cependant, il est plus habituel de l'exprimer grâce à son taux de matière sèche, également appelé taux de siccité. Ce taux correspond au rapport entre la masse de matière sèche d'une boue et sa masse totale (JOLLIET et al., 2005). Le taux de siccité des boues brutes obtenues en sortie de traitement de la filière « eau » est ainsi de 1% à 2% (AMORCE, 2012). Cette matière sèche est constituée de différentes substances dissoutes ou en suspension dans l'eau, parmi lesquelles (CHABAT, 2013):

#### ❖ Des composés azotés

Ils sont présents sous forme organique (protéines, acides aminés...) ou minérale (nitrates, nitrites, ion ammonium...). Une partie de l'azote présent dans les boues se trouve dans la phase liquide, ce qui implique que lors des traitements des boues, et principalement lors des étapes d'épaississement et de déshydratation, une certaine proportion de cet azote sera perdue lors de la séparation de phase, c'est-à-dire, lors de la séparation des « jus » des boues d'épuration et des boues elles-mêmes. Ces « jus », communément appelés « retours en tête » correspondent à l'eau initialement contenue dans les boues, qui est extraite lors des traitements, et qui contient donc une certaine quantité de matière sèche, dont de l'azote et du phosphore. De ce fait, il est nécessaire de les recueillir afin de les renvoyer en tête de station pour être à nouveau traités.

#### ❖ Des composés phosphorés

Ils sont également sous forme minérale ou organique. La quantité d'éléments phosphorés contenue dans les boues varie énormément suivant le type de boue considérée.

#### ❖ Des composés potassiques

Leur quantité reste faible dans les boues d'épuration car, le potassium étant un élément très soluble, la grande majorité de cet élément reste dans les eaux traitées et rejetées dans le milieu naturel.

#### ❖ D'autres éléments

Il s'agit des micropolluants, comme par exemple les métaux lourds, les produits pharmaceutiques ou les pesticides. Ces composés vont en partie être éliminés grâce au traitement biologique, cependant, les molécules restantes seront concentrées dans les boues ou rejetées avec les eaux usées. Bien que les quantités de ces composés dans les boues et les eaux usées soient assez faibles (environ 0.4 mg de micropolluants sont rejetés dans les eaux usées par Equivalent-Habitant (EH) et par jour), leur devenir une fois dans la nature et plus particulièrement leur transfert vers les sols, les végétaux, les eaux souterraines reste incertain (JOLLIET et al., 2005).

Les boues vont ensuite subir des traitements dont le but sera, entre autres, de réduire leur teneur en eau. Les boues pourront alors être classées suivant leur taux de siccité. On distingue quatre natures de boues différentes (PRADEL et REVERDY, 2011) :

- Les boues liquides : dont le taux de siccité est compris entre 1% et 10%
- Les boues pâteuses : dont le taux de siccité est compris entre 10% et 30%
- Les boues solides : dont le taux de siccité est compris entre 30% et 90%
- Les boues sèches : dont le taux de siccité est supérieur à 90%

## 2.2. Les traitements des boues d'épuration

Les différents traitements réalisés dans une station d'épuration ont trois grands objectifs (OTV, 1997):

- Le premier, comme nous l'avons vu précédemment, est de réduire le volume des boues en réduisant leur teneur en eau. En effet, si le volume total des boues est réduit dès le départ, il y en aura donc moins à traiter, à stocker et à transporter par la suite. Cette réduction de volume permet donc de limiter l'utilisation de machines qui sont, la plupart du temps, gourmandes en électricité et/ou qui demandent l'ajout de réactifs, comme des polymères. L'eau ainsi séparée du reste de la boue devra retourner en tête de station pour être à nouveau traitée. De plus, la teneur en eau d'une boue va également conditionner sa valorisation future, puisque, par exemple, une boue liquide ne pourra pas être valorisée par incinération. Les traitements réalisés sur les boues permettent donc d'optimiser leurs propriétés en fonction de la filière de valorisation choisie.
- Le second objectif est de stabiliser les boues. Cette étape du traitement vise à réduire la fermentescibilité des matières organiques présentes, ce qui permettra ainsi d'atténuer les nuisances olfactives liées aux boues.
- Enfin, le dernier objectif concerne l'hygiénisation des boues. Cette phase permet, suivant le traitement choisi, d'éliminer une quantité plus ou moins importante d'agents pathogènes présents dans les boues.

L'ensemble des traitements peuvent être séparés en 5 grandes étapes : le conditionnement, l'épaississement, la déshydratation, la stabilisation et le séchage (OTV, 1997) (Figure 5).



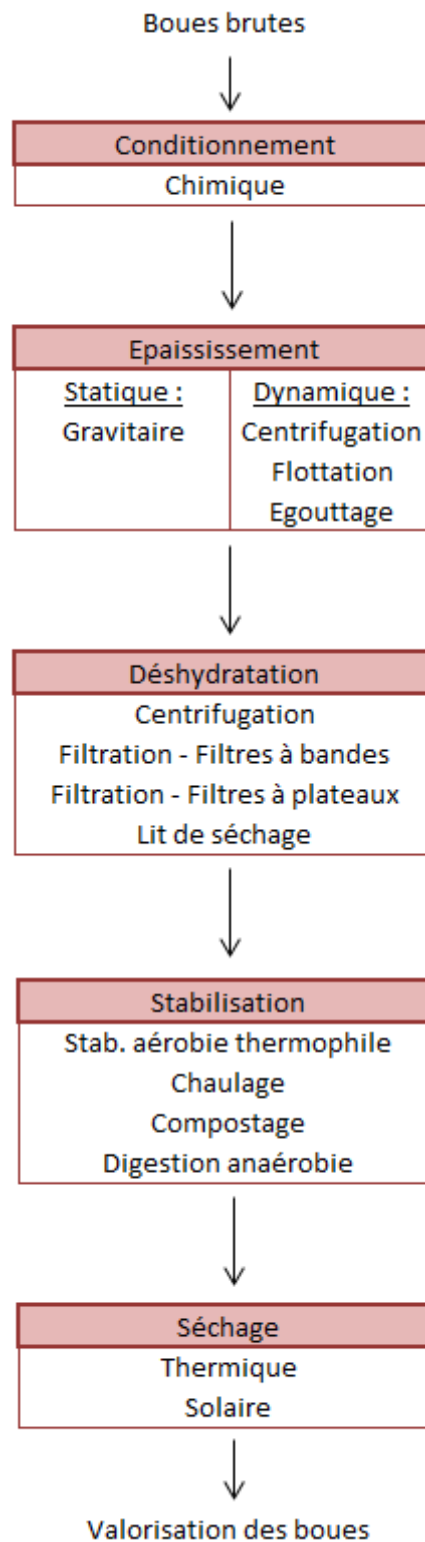


Figure 5: Filière de traitement des boues

Cependant, il est important de noter que toutes les boues ne passent pas forcément par chacune de ces étapes, et qu'elles ne subissent pas toujours les mêmes traitements qui peuvent être associés dans des ordres différents.

Nous allons maintenant détailler ces différentes étapes et les procédés de traitement qui ont été considérées pour réaliser cette étude.

### 2.2.1. Le conditionnement des boues

Cette étape, facultative, permet de mieux séparer la phase liquide de la phase solide d'une boue. Le type de conditionnement le plus utilisé est le conditionnement chimique, qui utilise des réactifs organiques (polymères cationiques) ou minéraux pour permettre l'agglomération des éléments solides contenus dans les boues (PRADEL et REVERDY, 2010). Ce sont actuellement les réactifs minéraux qui sont les plus utilisés pour conditionner des boues, et plus particulièrement l'association de chaux et de chlorure de fer (III) (AMORCE, 2012).

### 2.2.2. L'épaississement des boues

Le but de la phase d'épaississement est de réduire une première fois la teneur en eau des boues et ainsi de diminuer leur volume par l'intermédiaire de procédés généralement peu gourmands en énergie et/ou en réactifs. Cette phase sera plus ou moins efficace suivant le traitement qui sera appliqué aux boues.

Il existe quatre techniques d'épaississement différentes : l'épaississement statique gravitaire, l'épaississement dynamique par flottation, par égouttage et par centrifugation. Nous allons présenter les trois procédés les plus utilisés en France (CHABAT, 2013):

#### ❖ L'épaississement statique gravitaire

Cette technique d'épaississement des boues consiste à laisser les boues 48h environ dans un bassin de décantation où, sous l'action de la pesanteur, les matières solides des boues vont naturellement décanter au fond du bassin. Ce procédé présente l'avantage d'être peu coûteux et peu gourmand en électricité mais il nécessite en contrepartie un espace important pour l'installation du bassin.

#### ❖ L'épaississement dynamique par égouttage

Ce procédé d'épaississement peut être réalisé sur différents supports, dont un tambour d'égouttage. Dans ce cas, les boues seront introduites dans un tambour tournant à faible vitesse, l'eau pouvant être évacuée au travers d'une toile filtrante. Cette technique permet d'obtenir de meilleurs résultats qu'avec la méthode précédente et elle demande également moins d'espace et de temps. Cependant, pour une bonne efficacité du procédé, il est indispensable d'avoir au préalable conditionné chimiquement les boues. De plus, ce procédé consomme également des eaux de lavage puisqu'il faut en permanence nettoyer la toile filtrante pour ne pas qu'elle soit colmatée.

#### ❖ L'épaississement dynamique par centrifugation

Cette technique est basée sur l'utilisation de la force centrifuge pour séparer les phases liquide et solide de la boue. Parmi les procédés d'épaississement, cette méthode permet d'obtenir les meilleurs taux de siccité (de l'ordre de 6%) très rapidement. Cependant, comme le traitement précédent, elle nécessite l'utilisation de polymères, et cette technique se révèle être, en plus, très gourmande en électricité.

### 2.2.3. La déshydratation des boues

Le but de cette phase est de réduire une seconde fois le volume des boues en éliminant l'eau afin de diminuer les coûts liés aux futurs traitements des boues et à leur transport. Elle peut être réalisée sur des boues épaissies ou des boues stabilisées suivant le type de traitement mis en place.

Il existe quatre grands types de déshydratation qui sont : la déshydratation par centrifugation, par filtres à bandes, par filtres presse (ou à plateaux) et la déshydratation sur lit de séchage. Nous allons maintenant en détailler les deux procédés utilisés dans l'étude (OTV, 1997) :

#### ❖ La déshydratation par centrifugation

Cette technique consiste à introduire la boue à traiter dans un bol et d'y appliquer une force centrifuge. Ce procédé permet d'atteindre un taux de siccité compris entre 20 et 25% et présente également l'avantage d'être très compact et totalement automatisable. En contrepartie, son fonctionnement demande une importante quantité d'énergie et de polymères puisque le conditionnement des boues est indispensable avant ce type de déshydratation. Malgré ces inconvénients, cette technique est aujourd'hui la méthode de déshydratation la plus représentée dans les stations d'épuration françaises (GIRAULT et al., 2014) (figure 6).

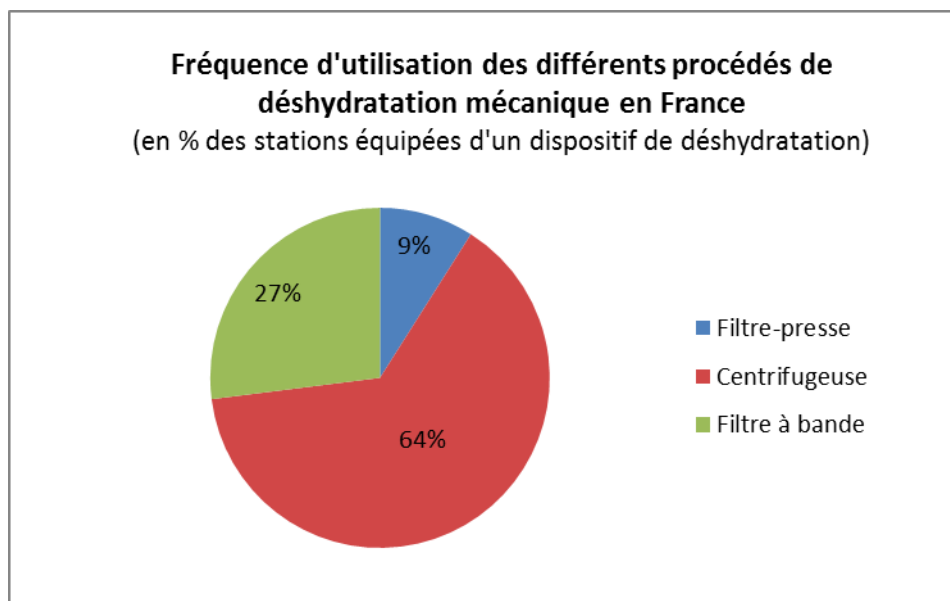


Figure 6: Fréquence d'utilisation des procédés de déshydratation mécanique en France (GIRAULT et al., 2014)

#### ❖ La déshydratation par filtre presse

Ce procédé de déshydratation consiste à injecter la boue sous pression entre deux plateaux pour en extraire l'eau grâce à une toile filtrante. Les boues alors obtenues ont un taux de siccité supérieur à 30% et sont appelées « gâteaux ». Les bonnes performances obtenues après ce traitement expliquent pourquoi c'est aujourd'hui la seconde méthode de déshydratation la plus utilisée en France (GIRAULT et al., 2014). Cependant, il comporte certains inconvénients comme le fait qu'elle ne puisse pas fonctionner en continu. De plus, pour pouvoir appliquer cette technique, les boues doivent avoir été conditionnées au préalable.

## ❖ La stabilisation des boues

Cette étape regroupe en fait deux types de traitements : la stabilisation et l'hygiénisation des boues. La stabilisation a pour but premier de stabiliser les boues, c'est-à-dire de réduire l'activité biologique existante dans les boues (dégradations et fermentations de matière organique) qui créent des nuisances olfactives plus ou moins gênantes. L'hygiénisation permet de réduire le nombre d'agents pathogènes présents dans les boues et ainsi, de limiter le risque de contamination lors d'une valorisation dans un milieu naturel (épandage, etc.).

On distingue des techniques de stabilisation et d'hygiénisation physique, comme la stabilisation aérobie thermophile ; chimique, comme le chaulage ; et biologiques, comme le compostage et la digestion anaérobie (ou méthanisation). Une fois de plus, nous allons approfondir trois techniques qui permettent à la fois de stabiliser et d'hygiéniser les boues (OTV, 1997):

### ❖ Le chaulage

Cette technique est basée sur l'ajout d'une certaine quantité de chaux (vive ou éteinte), ce qui va permettre d'augmenter le pH des boues de façon plus ou moins durable suivant la quantité de chaux utilisée. Cette augmentation de pH va rendre certains types de germes pathogènes inactifs et va également inhiber l'activité biologique existant dans les boues et ainsi empêcher la libération des molécules responsables de nuisances olfactives.

De plus, lorsque ce traitement est réalisé avec de la chaux vive, l'eau encore présente dans les boues va réagir avec ce produit. Cette réaction aboutira alors à une augmentation du taux de siccité, grâce à la liaison des molécules d'eau et de la chaux pour créer de la chaux éteinte. Cette réaction produira également une augmentation de la température suffisamment importante pour éliminer les agents pathogènes des boues.

Enfin, grâce à ce procédé et à l'apport significatif de chaux, l'épandage de boues sur des terres agricoles pourra remplacer l'apport d'un amendement calcique extérieur pour entretenir le pH du sol.

### ❖ Le compostage

Pour appliquer cette méthode de stabilisation, les boues vont d'abord être mélangées avec un coproduit (déchets verts, paille, écorces, etc.) car les boues sont trop humides pour pouvoir être compostées seules. Ce coproduit va donc permettre d'améliorer la structure des boues, notamment en augmentant le degré de vide entre ses composants et en améliorant la capacité d'adsorption du mélange. Ce dernier sera ensuite aéré mécaniquement pour accélérer les phénomènes de fermentations qui ont naturellement lieu dans les boues en présence d'oxygène.

Cette dégradation de la matière organique va de plus s'accompagner d'une importante élévation de la température qui aboutira à l'hygiénisation du compost et à l'évaporation d'une certaine quantité d'eau encore présente dans les boues.

Le compost obtenu au final possèdera plusieurs avantages : il ne dégagera que peu de mauvaises odeurs et, le compostage ayant un rôle hygiénisant, une partie des pathogènes initialement présents auront été détruits. Son taux de siccité sera de plus compris entre 50 et 60%, il aura donc une texture solide qui facilitera son transport et son stockage futur.

## ❖ La digestion anaérobie (ou méthanisation)

Cette technique est basée sur la fermentation des matières organiques des boues en absence d'oxygène. Cette fermentation peut être réalisée à différentes températures mais elle est le plus fréquemment effectuée entre 30 et 35°C, on parle alors de fermentation mésophile. Ce dernier type de digestion anaérobie est seulement une technique de stabilisation puisqu'elle ne permet pas d'éliminer les agents pathogènes présents.

Cependant, la dégradation ayant lieu pendant le traitement permettra de produire un biogaz majoritairement composé de méthane (45 à 65%) et de dioxyde de carbone (25 à 45%) (SENAT, s.d.). Lorsqu'il est récupéré, ce biogaz représente une alternative intéressante aux méthodes de production d'énergie classiques, mais il peut également être valorisé thermiquement et être utilisé comme biocarburant (mais cela reste très peu développé actuellement).

### 2.2.4. Le séchage des boues

Cette dernière étape, facultative, a également pour but de permettre l'évaporation de l'eau encore contenue dans les boues. Elle permet également d'améliorer l'hygiénisation et la stabilisation des boues.

Il existe deux grandes catégories de techniques de séchage : le séchage thermique qui permet d'obtenir un taux de siccité final dans les boues de l'ordre de 95% et le séchage solaire, où les boues vont sécher naturellement atteignant un taux de siccité final généralement compris entre 70 et 75%.

## 2.3. La valorisation des boues d'épuration

Les boues obtenues à la suite des traitements sont alors considérées comme des déchets, de ce fait, leur valorisation est soumise à une réglementation très stricte ; excepté pour le cas du compost qui reste considéré comme un « produit » dès lors qu'il fait l'objet d'une homologation ou d'une normalisation (MEDDE, 2013b).

Il existe actuellement deux grandes voies de valorisation pour les boues : l'incinération, qui concerne 18,6% des boues produites ; et l'épandage, qui correspond à la voie de valorisation de 73,9% des boues (AÏT KACI et al., 2012). Une faible proportion des boues (6,8%) est encore aujourd'hui mise en décharge, lorsqu'elles sont impropres à être épandues ou incinérées (AÏT KACI et al., 2012).

La présente étude a exclusivement porté sur la valorisation agricole des boues, nous allons donc détailler davantage cette filière de valorisation.

Cette dernière est aujourd'hui la voie de valorisation la plus employée pour valoriser les boues d'épuration (AÏT KACI et al., 2012), bien que l'épandage soit soumis à une réglementation très stricte. En effet, pour limiter tout risque pour la santé des êtres vivants et l'environnement sur et à proximité des sites d'épandage, la composition de la boue à épandre, ainsi que les zones et les périodes d'épandage sont réglementées. La quantité maximale de déchet à apporter par hectare est également normalisée, et, pour une période de 10 ans, il est interdit d'apporter plus de 30 tonnes de matière sèche par hectare (MEEDDAT, 2009).

La qualité de la boue est donc un des éléments essentiels à prendre en compte lorsqu'une valorisation agricole est envisagée, cependant, suivant la nature des eaux usées originelles (ménagères ou industrielles) et les traitements réalisés pour assainir ces déchets, la qualité et la composition de la boue vont énormément varier. Dans tous les cas, la boue devra avoir subi au minimum un traitement réduisant son pouvoir fermentescible et sa flore pathogène pour que son épandage soit envisageable, excepté pour les petites stations qui traitent majoritairement des eaux usées domestiques (MEDDE, 2013b).

De plus, le législateur a défini des seuils limites à ne pas dépasser concernant les éléments dangereux, ou ceux susceptibles de l'être, qui sont contenus dans les boues. Les apports cumulés au fil des épandages de ces éléments ont également été pris en compte. Le tableau 1 et le tableau 2 présentent ces différents seuils pour les Eléments-Traces (ET) et les Composés-Traces Organiques (CTO). Si une boue contient un ou plusieurs des éléments listés dans des proportions supérieures aux seuils définis, la boue ne pourra pas être épandue et sera valorisée via une autre voie.

	Teneur limite dans les boues (mg/Kg MS)	Flux maximum cumulé apporté par les boues en 10 ans (g/m <sup>2</sup> )
Cadmium (Cd)	10	0,015
Chrome (Cr)	1000	1,5
Cuivre (Cu)	1000	1,5
Mercure (Hg)	10	0,015
Nickel (Ni)	200	0,3
Plomb (Pb)	800	1,5
Zinc (Zn)	3000	4,5
Cr + Cu + Ni + Zn	4000	6

Tableau 1: Teneurs limites en Eléments-Traces dans les boues

	Teneur limite dans les boues (mg/Kg MS)	Flux maximum cumulé apporté par les boues en 10 ans (g/m <sup>2</sup> )
7 principaux PCB <sup>1</sup> : PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180	0.8	1,2
Fluoranthène	5	7,5
Benzo(b)fluoranthène	2.5	4
Benzo(a)pyrène	2	3

Tableau 2: Teneurs limites en Composés-Traces Organiques dans les boues

La réglementation actuelle attache ensuite beaucoup d'importance à la zone à fertiliser et à la période d'épandage. En effet, ce dernier est par exemple interdit sous certaines conditions (sols gelés ou enneigés, parcelles fortement en pente...) (MEDDE, 2013b). De plus, pour limiter les risques de contamination, l'épandage de boues est, par exemple, strictement interdit à proximité d'un point d'eau (MEEDDAT, 2009).

<sup>1</sup> Les PCBs (polychlorobiphényles) sont des composés organiques très peu biodégradables, qui se sont accumulés dans l'environnement au fil de leurs utilisations. Leur toxicité leur a valu une classification comme polluant organique persistant (POP).

De plus, le type de sol a également une importance puisque ses caractéristiques, et sa teneurs en éléments-traces, plus particulièrement, permettront aussi de déterminer si l'épandage est envisageable ou non. Le Tableau 3 présente les seuils limites en ETM à ne pas dépasser dans le sol.

	Teneur limite dans le sol (mg/Kg MS)	Flux maximum cumulé dans le sol en 10 ans (g/m <sup>2</sup> )
Cadmium (Cd)	2	0,015
Chrome (Cr)	150	1,2
Cuivre (Cu)	100	1,2
Mercure (Hg)	1	0,012
Nickel (Ni)	50	0,3
Plomb (Pb)	100	0,9
Zinc (Zn)	300	3

Tableau 3: Teneurs limites en Eléments-Traces Minéraux dans le sol (CHEVENEMENT et al., 1998)

L'épandage pourra donc seulement être effectué si la boue et la zone d'épandage sont toutes les deux adaptées à ce type de valorisation. Le producteur de boue devra toutefois continuer à surveiller l'évolution des caractéristiques du sol après les apports (MEDDE, 2013b).

Nous venons de le voir, l'ensemble de la filière « boue » regroupe un nombre relativement important de procédés plus ou moins complexes. Sans l'aide d'un outil adapté, il serait difficile d'évaluer et d'optimiser le bilan environnemental correspondant à une filière complète de traitement et de valorisation des boues. L'Analyse du Cycle de Vie est un des outils permettant de répondre à ces problématiques.

#### 2.4. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

L'Analyse du Cycle de Vie est un outil permettant de déterminer quelles sont les étapes dans le cycle de vie d'un produit qui ont le plus d'impacts potentiels sur l'environnement. On parle d'impacts potentiels car on considère que chacune des molécules émises a un impact sur l'environnement, mais on ne prend pas en compte les interactions possibles entre ces molécules et les conséquences qui en découlent. Les résultats obtenus ne peuvent donc en aucun cas être qualifiés de « réels ».

Pour réaliser cette analyse, les flux de matière et d'énergie entrants et sortants du système vont être inventoriés pour chacune des étapes du cycle de vie, depuis la phase d'extraction ou de fabrication des composants jusqu'à l'étape d'élimination du produit en fin de vie (Figure 7). Cette analyse permettra donc au final d'identifier les étapes à améliorer pour alléger le bilan environnemental (JOLLIET et al., 2005).



Figure 7: Le cycle de vie d'un produit schématisé

L'ACV est la méthode d'évaluation d'impacts la plus aboutie aujourd'hui (ADEME, 2005). Cette technique d'analyse a été normalisée, pour qu'elle puisse être appliquée correctement par tout utilisateur. Les normes en vigueur sont celles de la série ISO 14 040, qui définissent les principes méthodologiques à suivre et le cadre de la réalisation de l'ACV pour chacune de ses étapes (ADEME, 2005).

La réalisation d'une ACV passe obligatoirement par 4 étapes (JOLLIET et al., 2005) (Figure 8):

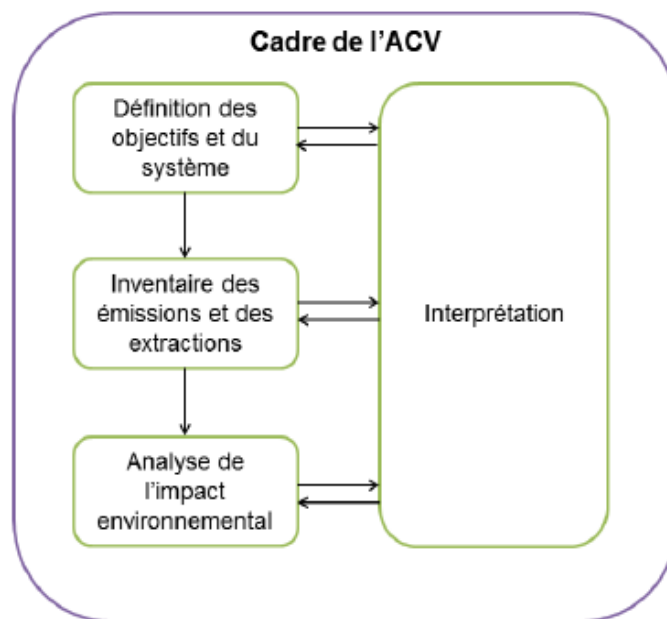


Figure 8: Les quatre étapes de l'ACV (RICHARD, 2013)

#### 2.4.1. Définition des objectifs et du système étudié

Cette première phase dans la réalisation d'une ACV permettra tout d'abord de définir l'objectif de l'étude, et de spécifier la ou les fonctions du système qui seront étudiées. Lors de cette phase, le champ de l'étude, c'est-à-dire, les frontières du système au-delà desquelles les flux de matière et d'énergie ne seront plus pris en compte, est aussi déterminé.



C'est également dans le cadre de cette étape que va être définie l'unité fonctionnelle du système. Cette unité, mesurable, quantifie la fonction du système et sert de référence pour les phases suivantes. Ainsi, chacun des flux entrants et sortants et chaque impact environnemental seront exprimés dans cette unité, ce qui permettra par la suite de comparer les résultats de l'ACV entre eux.

Les hypothèses considérées lors de la réalisation de l'analyse devront également être décrites précisément.

#### 2.4.2. Inventaire des données mobilisées par le système

La seconde phase de l'ACV consiste à inventorier l'ensemble des flux entrants et sortants du système de l'étude. Les flux entrants comprennent généralement, entre autres, l'extraction des matières premières ainsi que les consommations d'énergie et de réactifs nécessaires au fonctionnement du système. Les flux sortants sont caractérisés par les émissions vers l'air, l'eau et le sol ; ainsi que par les déchets produits.

Nous allons considérer deux types d'émissions : les émissions directes et indirectes :

- Les premières correspondront aux émissions directement liées au déchet considéré dans l'ACV. Par exemple, les émissions issues du stockage des boues appartiennent à la catégorie des émissions directes (PRADEL et REVERDY, 2011).
- Les émissions indirectes correspondent à celles qui ne sont pas directement liées au produit étudié dans l'ACV. Elles sont en général liées à la construction des infrastructures et à l'utilisation du matériel et de l'énergie. Par exemple, les émissions liées à la construction d'un bâtiment de stockage de boues font partie des émissions indirectes (PRADEL et REVERDY, 2011).

#### 2.4.3. Analyse de l'impact environnemental

Cette étape est réalisée à l'aide de logiciels spécialisés tels que SimaPro, GaBi, etc. Elle permet d'évaluer l'impact environnemental du système étudié.

Cette phase de l'ACV se décompose en plusieurs étapes. Tout d'abord, la classification, qui permet d'associer les flux de matière et d'énergie recensés durant l'inventaire avec des catégories d'impacts environnementaux (appelées « indicateurs mid-point » comme par exemple, le changement climatique ou la destruction de la couche d'ozone) ; puis, dans un second temps, avec des catégories de dommage (appelées « indicateurs end-point », tels que la santé humaine ou la qualité des écosystèmes). La Figure 9 représente cette phase de l'ACV et la Figure 10 l'illustre à travers un exemple.

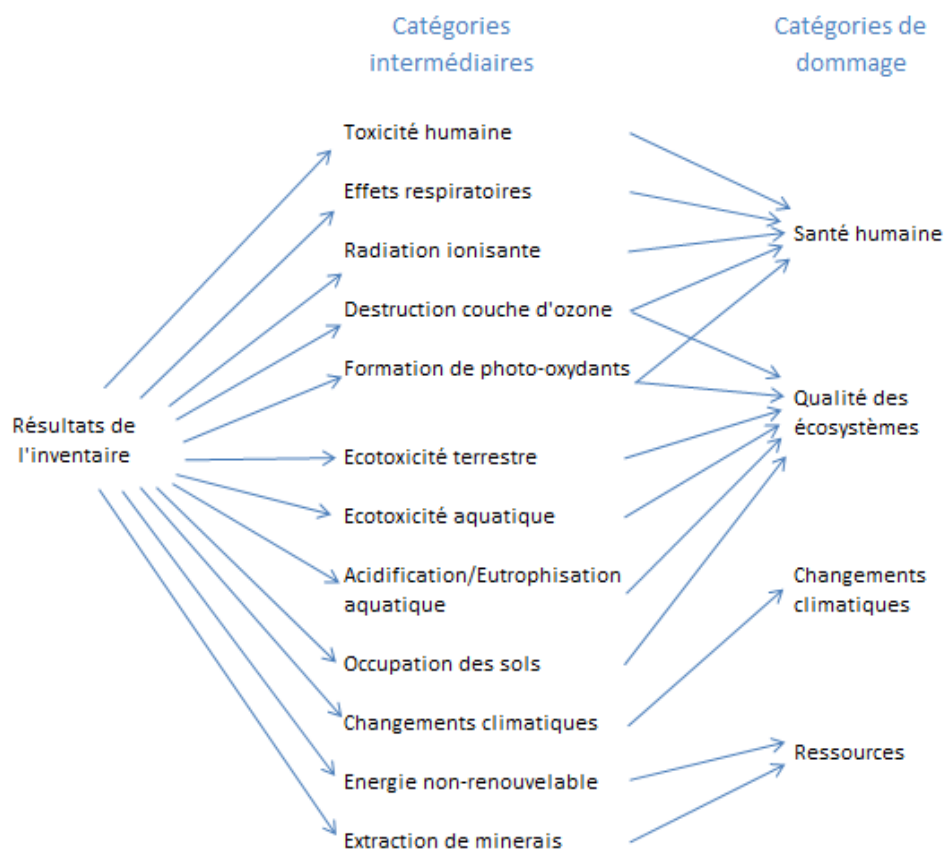


Figure 9: Représentation de la phase de classification de l'ACV (JOLLIET et al., 2005)

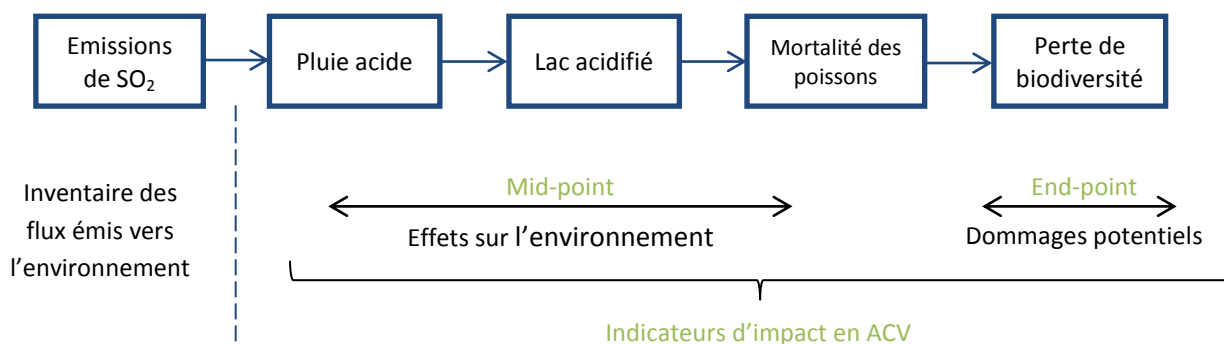


Figure 10: Illustration de la phase de classification (BOUTIN et al., 2012)

La seconde étape est la caractérisation qui correspond à la pondération des émissions et des extractions inventoriées pour qu'elles puissent être exprimées en « unités d'impact ». Chaque substance inventoriée (en tant que flux entrant ou flux sortant) est ramenée à une substance équivalente de référence pour pouvoir être par la suite agrégée en impact correspondant.

A titre d'exemple, le calcul de l'impact « changement climatique » est basé sur la mesure du forçage radiatif<sup>2</sup> pour chaque gaz et mesuré en équivalent CO<sub>2</sub> (substance de référence) pour un horizon de temps défini (100 ans dans la majorité des cas).

<sup>2</sup> Le forçage radiatif est la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique donné.

Un procédé qui émettrait 1 tonne de CO<sub>2</sub> et 0,15 tonne de N<sub>2</sub>O aurait un impact sur le changement climatique équivalent à 45.7 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>, le N<sub>2</sub>O ayant un pouvoir de réchauffement global 298 fois supérieur au CO<sub>2</sub> à horizon 100 ans (BERTHELIN et al., 2011).

#### 2.4.4. Interprétation

Cette dernière phase de l'ACV consiste à analyser l'ensemble des résultats obtenus. Elle permet également d'identifier les étapes qui permettraient de réduire les impacts environnementaux du cycle de vie du produit étudié.

Malgré tous ses avantages et le fait qu'elle soit aujourd'hui très employée, la méthode ACV présente cependant plusieurs limites. La première est que les résultats obtenus au final dépendent fortement des hypothèses qui auront été prises en compte tout au long de l'étude et de la qualité des données utilisées (UVED, 2012). Il faut donc être extrêmement vigilant lors du choix des hypothèses et pendant la réalisation de l'inventaire des flux.

La seconde limite réside dans le fait que l'ACV ne considère que les impacts environnementaux, ainsi il n'est pas rare qu'il y ait des désaccords entre les recommandations issues des résultats de l'ACV et les intérêts économiques et sociaux du produit considéré. De plus, l'ACV ne prend en compte que les impacts environnementaux quantitatifs, c'est-à-dire que d'autres aspects tels que l'impact des activités sur les paysages ou les nuisances associées au bruit ne sont par exemple pas pris en compte (bien que certains soient mesurables !) (UVED, 2012).

#### 2.4.5. Particularités de l'ACV appliquée à la gestion des déchets

Lorsqu'elle est appliquée aux déchets, la méthode ACV a la particularité de ne prendre en compte que la dernière étape du cycle de vie, on parle d'ACV « fin de vie » (FINNVEDEN, 1999). De ce fait, les frontières du système vont être différentes dans une ACV « fin de vie » et dans une ACV « produit ».

Enfin, il existe une autre particularité concernant la gestion des déchets. En effet, lors de la réalisation de ce type d'ACV, il est fréquent de rencontrer des procédés multifonctionnels, c'est-à-dire, des procédés qui possèdent une fonction principale ainsi qu'une ou des fonctions secondaires. Une filière « boue » est par exemple un système multifonctionnel car sa fonction principale est de traiter les boues mais si ces dernières sont valorisées par épandage, elle aura une fonction secondaire qui sera de produire un fertilisant utilisable en agriculture.

Dans le cas de systèmes multifonctionnels, il est donc nécessaire de tenir compte de ces deux fonctions et d'allouer chaque impact environnemental à une de ces deux fonctions. Pour allouer la part des impacts environnementaux correspondant à chaque fonction du système, il existe différentes méthodes mais les deux plus répandues sont la répartition (ou allocation) et la substitution (ou extension des frontières du système).

- La répartition consiste à affecter les charges environnementales correspondantes à chaque fonction ou produit du système suivant un critère physique, c'est-à-dire, au prorata de la masse ; d'après un critère économique, c'est-à-dire au prorata de la valeur marchande des produits ; ou suivant un critère énergétique, c'est-à-dire, au prorata du contenu énergétique des produits.

- La substitution consiste à étendre les frontières du système considéré. Il existe deux types de substitutions : par addition ou par soustraction (MARCHAND, 2013). La première consiste à ajouter des fonctions supplémentaires aux systèmes afin que chacun d'entre eux aient exactement les mêmes fonctions (MARCHAND, 2013). La Figure 11 représente un exemple de ce type d'allocation par addition. Le système A est un système multifonctionnel car il a deux fonctions : l'élimination de déchets et la production de chaleur. Au contraire, le système B ne possède qu'une seule fonction : celle d'éliminer les déchets. Ainsi, pour pouvoir comparer ces deux systèmes il faut ajouter au système B une fonction « production de chaleur », avec les intrants et sortants qui y sont liés. Le deuxième type de substitution, par soustraction, consiste à rendre un système possédant plusieurs fonctions, monofonctionnel (MARCHAND, 2013). La Figure 12 représente un exemple de ce type d'allocation par soustraction. Le système A est multifonctionnel car il permet d'éliminer les déchets et produit également de la chaleur. Contrairement à lui, le système B a seulement la fonction d'éliminer les déchets. Pour rendre ces deux systèmes comparable, il faut « soustraire » une fonction de production de chaleur, avec ses intrants et sortants, au système A pour que celui-ci devienne monofonctionnel.

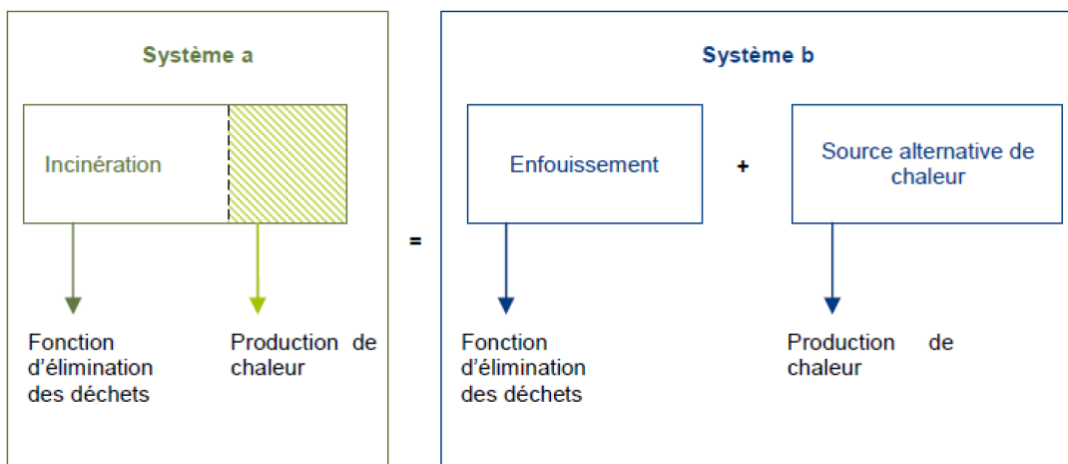


Figure 11: Illustration de la substitution par addition (RICHARD, 2013)

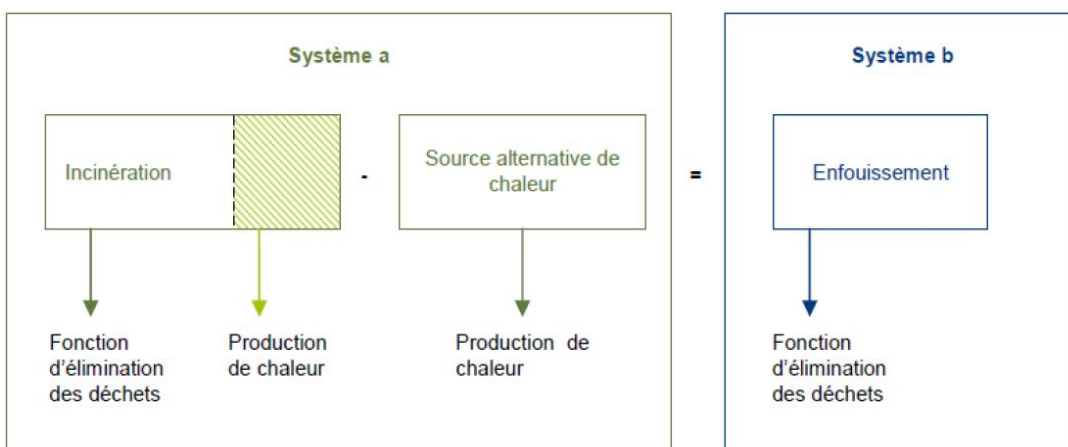


Figure 12: Illustration de la substitution par soustraction (RICHARD, 2013)

Ce type de problème existe également avec les infrastructures et l'utilisation du matériel. En effet, si on considère par exemple que le transport des boues jusqu'au lieu de stockage est effectué par un camion de 16 tonnes, il faut prendre en compte le fait que, à long terme, ce camion ne servira pas seulement à transporter des boues mais aussi à transporter d'autres marchandises.

Il est donc nécessaire de faire une allocation pour ajuster les intrants et les sortants à l'utilisation réelle du matériel et des infrastructures pour les déchets considérés.

### **3. Evaluation des performances environnementales de filières de traitement et de valorisation des boues d'épuration par l'ACV**

#### **3.1. Présentation de la mission**

Depuis 2012, IRSTEA et l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) sont engagés dans un partenariat autour d'un programme commun basé sur « la gestion des eaux continentales de surface » (IRSTEA, 2013) et leur premier objectif pour la période 2013 – 2015 porte sur la « réduction des impacts sur les milieux et la restauration de leurs fonctionnalités », qui s'inscrit parfaitement dans les objectifs de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (IRSTEA, 2013).

Dans le cadre de cette problématique, l'équipe Carac'Terre de Montoldre intervient, entre autres, sur deux grands projets financés par l'ONEMA. L'un de ces projets porte sur l'ACV des filières de traitement et de valorisation des boues de station d'épuration et l'autre sur la déshydratation des boues résiduaires. Ces projets ont déjà mené à la réalisation de plusieurs missions pour quantifier les impacts environnementaux des filières de traitement et de valorisation des boues, comme par exemple, les deux études qui ont évalué les impacts de chacun des traitements (CHABAT, 2013) et de chacune des voies de valorisation des boues d'épuration (RICHARD, 2013).

Ma mission de stage s'inscrit également dans ces deux projets de recherche et découle des études précédemment réalisées. L'originalité de cette mission par rapport aux précédentes études réside dans le fait d'évaluer les impacts environnementaux pour l'ensemble d'une filière de traitement incluant la voie de valorisation par épandage et non plus pour des procédés individuels. De plus, mon stage se déroule en deux phases.

La première permettra d'avoir une idée des impacts environnementaux pour plusieurs filières « boue », et de répondre à la problématique suivante : Quels sont les principaux procédés de traitement ou de valorisation des boues devant être optimisés afin de réduire leur impact environnemental respectif ?

De plus, dans la seconde partie de l'étude, une analyse de sensibilité sera réalisée sur les différents paramètres associés à l'étude. Cette analyse sera réalisée en faisant varier d'une part les données d'inventaire et les hypothèses que nous avons considérées lors de la réalisation de l'ACV et d'autre part les paramètres opératoires afin d'évaluer leurs impacts sur le bilan environnemental final.

D'un point de vue opérationnel, ce travail a donc pour objectif de déterminer quels sont, dans la filière boue étudiée, les procédés et paramètres de performance associés qui sont les plus impactants pour le bilan environnemental de la filière. Ce travail permettra de prioriser les travaux d'optimisation technologique qui pourront être menés sur les différents procédés de traitement étudiés.

Ensuite, au niveau scientifique, cette étude permettra de fournir des clés méthodologiques lors du choix des données et des hypothèses à prendre en compte pour réaliser l'ACV selon l'objectif de l'analyse. En effet, en ce qui concerne les hypothèses considérées, cette étude permettra de déterminer lesquelles sont essentielles au vue de leur impact sur les résultats finaux. De la même manière, elle permettra d'identifier quelles sont les données les plus importantes pour réaliser l'ACV, et donc, celles qui doivent absolument être fiables.

### 3.2. Choix des filières « boue » pour la réalisation de l'étude

Préalablement à la réalisation de l'ACV, un état des lieux des procédés de traitement des boues a, entre autres, permis de mieux connaître et cerner les enjeux liés à la gestion de ce type de déchets. A partir de ces recherches bibliographiques, plusieurs scénarios caractéristiques des filières couramment mises en œuvre en France ont pu être proposés. Nous en avons sélectionné 4 pouvant être considérés comme étant représentatifs des filières mises en œuvre en France.

La capacité de traitement d'une station varie d'une station de traitement à une autre et est exprimée en équivalents habitants (EH), sachant qu'1 EH correspond à la charge polluante émise par une personne par jour (JOLLIET et al., 2005). Nous avons ensuite fait une hypothèse quant à la taille des stations en considérant que :

- Une STEP de petite capacité de traitement correspondrait à une STEP de moins de 10 000 EH
- Une STEP avec une capacité de traitement moyenne correspondrait à une STEP de capacité comprise entre 10 000 et 100 000 EH
- Une STEP avec une grande capacité de traitement correspondrait à une STEP de plus de 100 000 EH

Ainsi, parmi les 4 scénarios sélectionnés on trouve : un scénario valable pour une STEP de petite capacité, deux scénarios valables pour des stations de moyennes capacités de traitement et pour finir, un scénario pour une STEP de grande capacité. L'ensemble de ces scénarios sont présentés ci-après.

Le premier scénario est constitué d'un seul traitement avant la valorisation agricole des boues (le stockage n'étant pas considéré comme un traitement) (Figure 13). Cet épaissement va permettre de réduire la teneur en eau des boues, il y a aura donc une certaine quantité de retours en têtes à traiter suite à ce procédé.

#### Scénario N°1 : STEP dont la capacité de traitement est inférieure à 10 000 EH

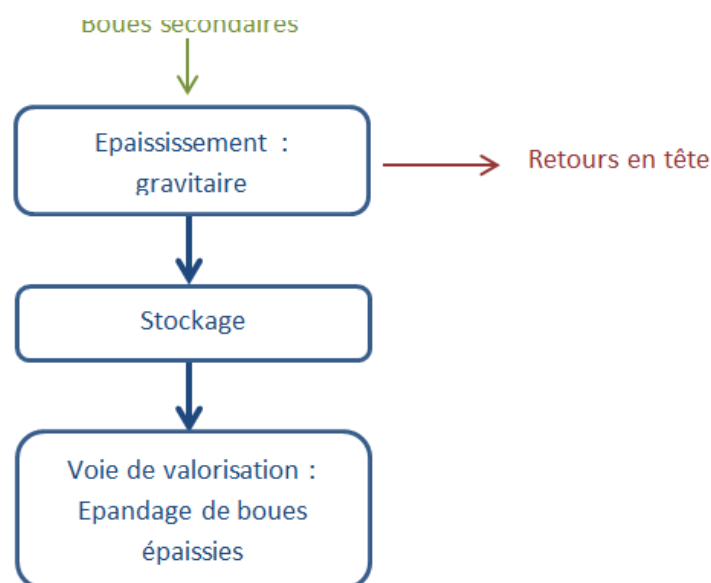


Figure 13: Représentation du scénario N°1

Dans le deuxième scénario, le traitement des boues est un peu plus poussé puisqu'il y a une étape de déshydratation couplée à une hygiénisation et une stabilisation des boues par chaulage (Figure 14). La déshydratation, comme l'épaississement, produit des retours en tête qu'il faudra à nouveau traiter. De plus, avant de réaliser cette déshydratation, il sera nécessaire d'ajouter des réactifs (chlorure ferrique et chaux) pour conditionner la boue, ce qui permettra d'améliorer les performances du procédé de déshydratation.

**Scénario N°2 : STEP dont la capacité de traitement est comprise entre 10 000 et 100 000 EH**

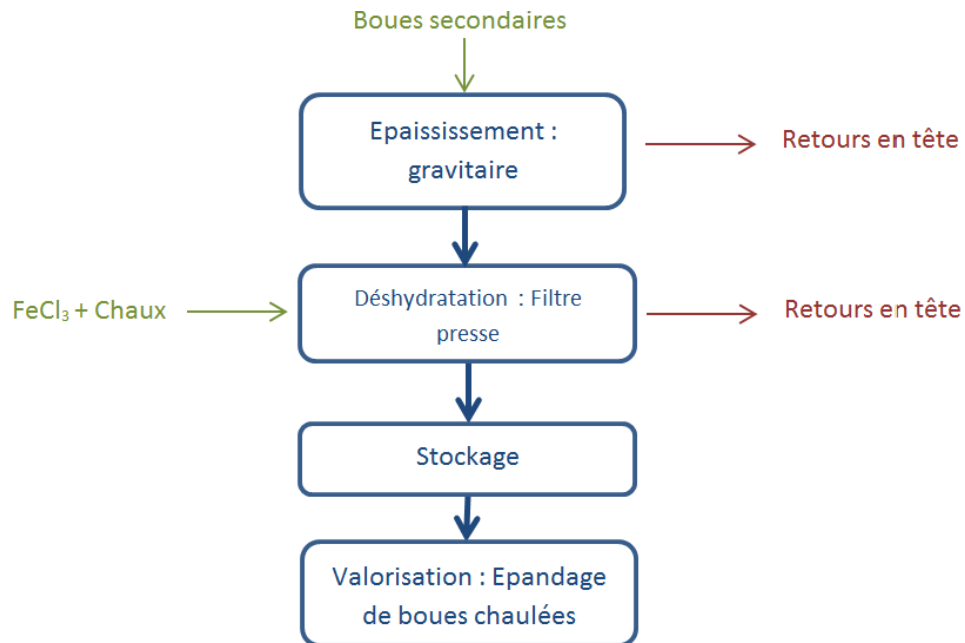


Figure 14: Représentation du scénario N°2

Le troisième scénario est, lui, un peu plus complexe que les deux autres car deux types de boues différentes seront utilisées. Après leur épaississement, elles seront mélangées et introduites dans le digesteur pour être stabilisées, puis déshydratées (Figure 15). Une digestion anaérobie est toujours suivie d'une déshydratation (BAUDEZ et al., 2013).



**Scénario N°3 : STEP dont la capacité de traitement est supérieure à 100 000 EH**

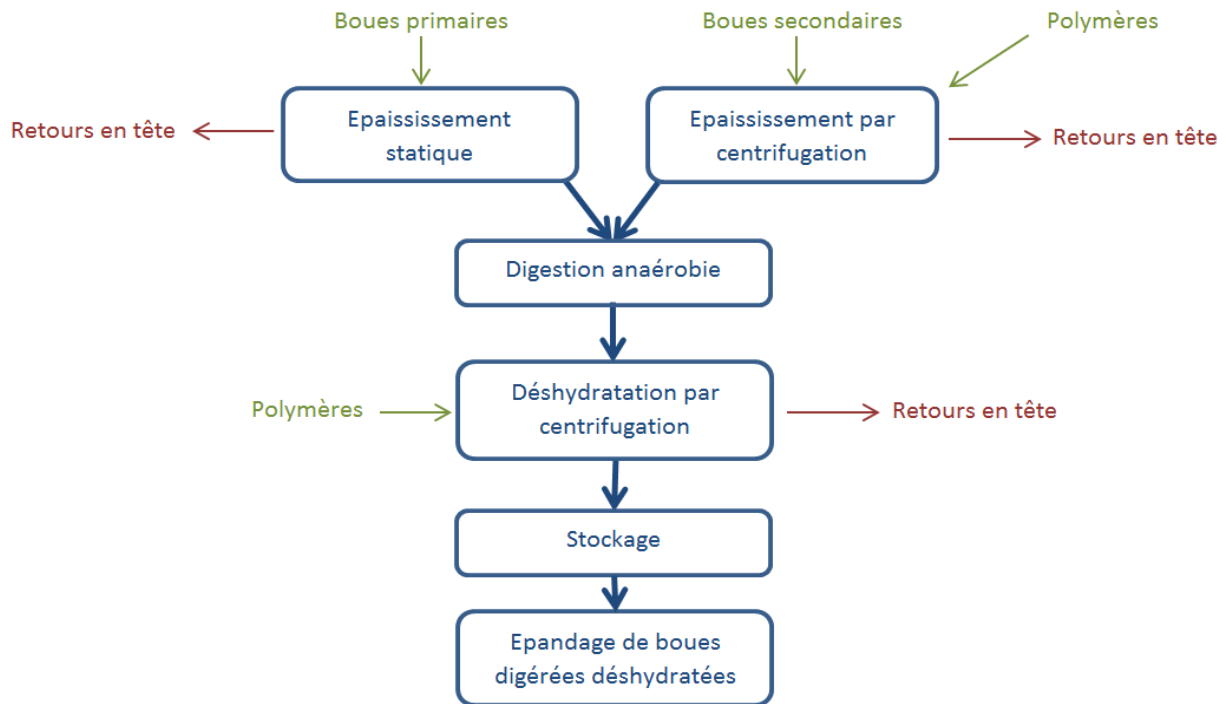


Figure 15: Représentation du scénario N°3

Le quatrième scénario est composé d'un épaissement dynamique par tambour d'égouttage, plus efficace qu'un épaissement statique ; puis d'une déshydratation par centrifugation. La stabilisation et l'hygiénisation des boues seront, dans ce cas-ci, réalisées par un chaulage (Figure 16).

**Scénario N°4 : STEP dont la capacité de traitement est comprise entre 10 000 et 100 000 EH**

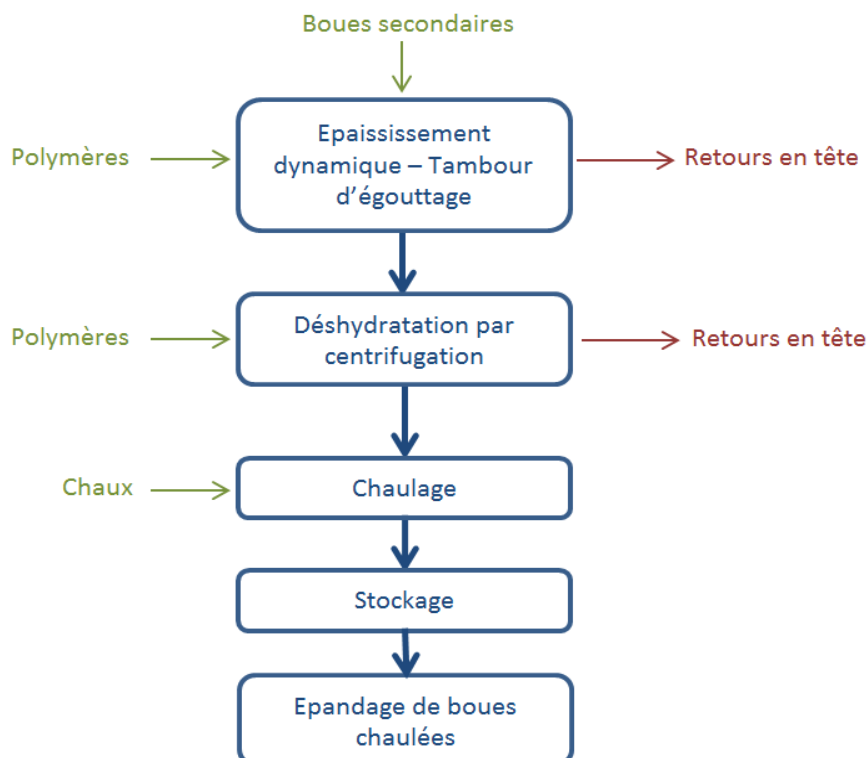


Figure 16: Représentation du scénario N°4

Nous avons en plus choisi de réaliser deux variantes à ce quatrième scénario pour pouvoir étudier davantage de filières de traitement. Dans la variante a, nous avons modifié le procédé de stabilisation : le chaulage a été remplacé par du compostage. Dans la variante b, nous avons modifié les procédés de déshydratation et de stabilisation : la centrifugation a été remplacée par une déshydratation filtre presse et le chaulage par du compostage.

Le Tableau 4 récapitule les différents types de boues obtenues à la fin de chaque scénario.

<b>Scénarios</b>	<b>Type de boue à épandre</b>	<b>Etat/Nature de boue à épandre</b>
N°1	Boues épaissies	Boue liquide
N°2	Boues chaulées	Boue solide
N°3	Boues digérées	Boue pâteuse
N°4	Boues chaulées	Boue pâteuse
N°4 - Variante a	Boues compostées	Boue solide
N°4 - Variante b	Boues compostées	Boue solide

Tableau 4: Les différents types de boues obtenus pour chaque scénario

Nous allons maintenant détailler dans la suite de ce rapport la méthodologie appliquée lors de la modélisation ainsi que les résultats obtenus en prenant appui sur le scénario 1 en sachant que cette méthodologie est transposable à l'ensemble des scénarios.

### **3.3. Réalisation de l'ACV**

#### **3.3.1. Définition des objectifs et champ de l'étude**

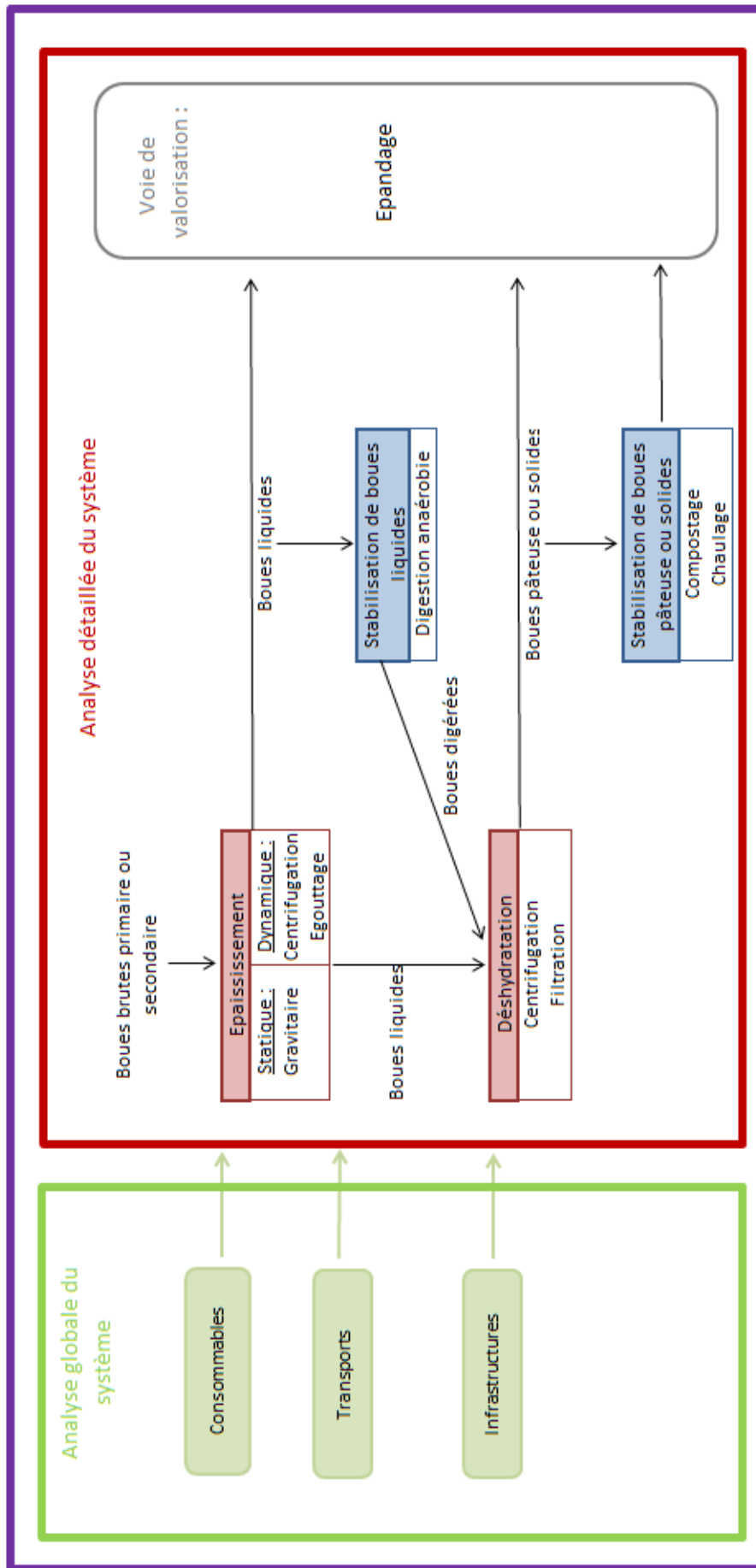
##### **3.3.1.1. Objectifs de l'étude et frontières du système**

Cette analyse a pour but d'évaluer les impacts environnementaux liés à la mise en place de plusieurs filières de traitement des boues valorisées par épandage, pour ensuite pouvoir réaliser une analyse de sensibilité.

L'unité fonctionnelle que nous avons choisi de considérer est une tonne de matière sèche de boue traitée. En effet, c'est cette unité qui est en général utilisée comme unité de référence pour la réalisation des études portant sur les boues car elle permet de pouvoir comparer des boues de nature différente en les rapportant à la quantité de MS qu'elles contiennent (PRADEL et al., 2013).

Le périmètre de notre étude prendra en compte les boues dès leur sortie de la filière de traitement des eaux usées jusqu'à leur valorisation par épandage. La Figure 17 représente ces frontières, ainsi que les procédés qui seront pris en considération lors de l'analyse.

INTRANTS



Légende :

Procédé de concentration des boues

Procédé de stabilisation des boues

EMMISSIONS DIRECTES ET INDIRECTES

Figure 17: Représentation des frontières du système étudié (adapté de PRADEL et al., 2013)

### 3.3.1.2. Hypothèses réalisées

#### ❖ Les boues

Il a tout d'abord été décidé que les boues de même nature auraient la même composition. Ainsi, la composition de base des boues secondaires a été déterminée et se trouve détaillée en annexe 1. (Pour ce qui est de la composition de la boue primaire, elle n'a pas encore été réalisée car nous n'avons pas encore étudié le scénario N°3). Ce sont les résultats d'une enquête (non publiée) réalisée en 2014 par Irstea qui ont permis de déterminer cette composition type en apportant des informations sur les boues traitées dans de nombreuses STEP françaises. De plus, nous avons choisi de considérer que la boue d'entrée ne contenait ni  $\text{NH}_4^+$  ni  $\text{PO}_4^{3-}$  car on trouve seulement quelques milligrammes par litres de ces éléments en sortie de filière eau, ce qui correspond seulement à quelques grammes par tonnes de matière sèche.

#### ❖ Les procédés de traitement

Le Tableau 5 présente les hypothèses prises en compte pour chacun des différents procédés de traitement considérés dans l'étude.

Traitements concernés		Hypothèses considérées
Conditionnements	Déshydratation filtre presse	Le conditionnement sera réalisé à l'aide de réactifs minéraux ( $\text{FeCl}_3$ et $\text{CaO}$ ) : Dose de la solution de $\text{FeCl}_3$ : 11% MS Dose de $\text{CaO}$ : 38 % MS
	Epaississement sur tambour d'égouttage	Le conditionnement sera réalisé à l'aide de réactifs organiques (polymères) : Dose de polymère : 5 kg matière active (MA)/t MS
	Déshydratation centrifuge	Le conditionnement sera réalisé à l'aide de réactifs organiques (polymères) : Dans notre étude, ce traitement est précédé par l'épaississement sur tambour d'égouttage où des polymères sont déjà ajoutés : la dose de polymère nécessaire est donc divisée par deux : 2,5 kg MA/t MS
Epaississements et Déshydratations		Il n'y aura aucune perte carbonée durant ces procédés (car ils sont trop rapides) excepté lors de l'épaississement gravitaire, où on considérera que les pertes de carbone observées sont pour moitié dues aux émissions de $\text{CH}_4$ et pour moitié liées aux émissions de $\text{CO}_2$  Le $\text{NH}_4^+$ et le $\text{PO}_4^{3-}$ (produits durant les traitements) étant solubles, lors de la séparation de phase, nous allons considérer que ces éléments vont suivre la même répartition que la matière brute (si 5 % de la MB passe dans les retours en tête, on y retrouvera également 5% du $\text{NH}_4^+$ et 5% du $\text{PO}_4^{3-}$ )

Traitements concernés	Hypothèses considérées
Retours en tête	Dans l'étude, seuls les impacts liés aux traitements du phosphore, ainsi que de l'azote et du carbone contenus dans les retours en tête seront pris en considération. Le phosphore sera traité avec du chlorure ferrique (FeCl <sub>3</sub> ), et c'est cette quantité qui sera considérée dans l'ACV. Le carbone et l'azote seront traités par aération prolongée, et c'est donc la quantité d'électricité utilisée qui sera comptabilisée pour l'ACV. L'ensemble des autres intrants ou sortants liés au traitement des retours en tête seront négligés (consommations électrique lors du pompage, infrastructures supplémentaires...)
Chaulage	La chaux apportée sera sous forme de chaux vive : Dose de CaO : 30% MS
Stockage	Dans la réalité, lors du stockage, il y a forcément des écoulements de jus provenant des boues. Ces jus sont chargés en carbone, azote et phosphore ; ils sont donc recueillis pour être de nouveau traités mais dans notre étude, on considérera qu'il n'y aura pas de retour en tête produits de cette façon (à cause d'un manque trop important d'informations)
	Les émissions de carbone sont pour moitié dues aux émissions de CH <sub>4</sub> et pour moitié liées aux émissions de CO <sub>2</sub> (Ratio associé à la dégradation de la MO en conditions anaérobies)

Tableau 5: Hypothèses réalisées sur les procédés de traitement

❖ La logistique

Le Tableau 6 présente les hypothèses prises en compte lors des phases de transport et de stockage de l'étude.

Opérations	Types de boue	Hypothèses
Stockage des boues	Liquides	Elles seront stockées directement sur la station d'épuration, dans un silo
	Pâteuses et solides	Ces boues seront stockées sur des aires bétonnées en dehors de la station d'épuration.
Transport des boues : Station → Stockage	Pâteuses et solides	- Transport réalisé par camion de 16 tonnes - La distance séparant la station de la zone de stockage sera de 35 km (PRADEL, 2010)
Transport des boues : Stockage → Zone d'épandage	Liquides	- Le transport sera réalisé avec un tracteur muni d'une tonne à lisier - La distance entre la station et la zone d'épandage sera de 4 km (PRADEL, 2010)
	Pâteuses et solides	- Le transport sera réalisé avec un tracteur muni d'un épandeur - La distance entre les zones de stockage et d'épandage sera de 2 km (PRADEL, 2010)

Tableau 6: Hypothèses réalisées concernant la logistique

❖ La valorisation agricole

Le Tableau 7 présente l'ensemble des hypothèses prises en compte lors de l'épandage des boues.

Paramètres	Hypothèses
Caractéristiques de la parcelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les boues seront épandues sur une parcelle de l'exploitation agricole d'IRSTEA, à Montoldre.</li> <li>- Le sol est considéré comme limoneux-sableux</li> <li>- On considère une rotation Colza – Blé – Orge d'hiver et l'épandage sera réalisé avant l'Orge d'hiver</li> </ul>
Caractéristiques de la culture réceptrice	<p>Nous avons considéré que les besoins de l'orge d'hiver étaient de (PRADEL, 2010):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>115,40 Kg N/ha</li> <li>57,40 Kg P/ha</li> <li>83,22 Kg K/ha</li> </ul>
Caractéristiques de la boue	<p>La totalité des éléments fertilisants contenus dans les boues n'est pas directement assimilable par la plante, il faut donc utiliser des coefficients d'équivalence pour déterminer cette part (PRADEL, 2010):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Coefficient pour N (boue liquide) : 0.45</li> <li>Coefficient pour N (boue pâteuse ou solide) : 0.35</li> <li>Coefficient pour P : 1</li> <li>Coefficient pour K : 1</li> </ul>
	<p>Nous allons considérer que la totalité de la part assimilable des éléments fertilisants contenus dans la boue sera disponible l'année de l'épandage.</p>
Produits chimiques évités	<p>Nous avons choisi d'utiliser des engrais simples pour faciliter les calculs :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>L'ammonitrate 33.5 pour l'apport d'azote (33,5% de N)</li> <li>Le triple superphosphate pour la fertilisation phosphorée (45 % de P)</li> <li>Le chlorure de potasse pour l'apport de potasse (60 % de K)</li> <li>La dolomie pulvérisée comme amendement calcique (<math>VN^3 = 59,10</math> kg équiv. CaO)</li> </ul> <p>Les quantités de N, P et K contenues dans les boues, ainsi que leur valeur neutralisante ont permis de calculer les quantités d'engrais dont l'apport avait été évité.</p>

Tableau 7: Hypothèses réalisées pour la valorisation agricole

<sup>3</sup> VN : La Valeur Neutralisante d'un produit représente la quantité d'équivalent CaO qui a la même capacité de neutralisation que 100 Kg du produit (CHAMBRE D'AGRICULTURE MIDI-PYRENEES, 1992)

## ❖ Les allocations

Le Tableau 8 présente l'ensemble des hypothèses réalisées lorsque des allocations étaient nécessaires.

Phase concernée	Hypothèses
Transport par camion (Station → Stockage)	A long terme, les camions n'étant pas uniquement utilisés pour transporter des boues, il faut en allouer « une partie » à cette activité. Nous avons choisi d'utiliser les mêmes valeurs d'allocation que celles présentes dans la base de données du logiciel ACV SimaPro.
Transport par matériel agricole (Stockage/ Station → Zone D'épandage)	De la même façon, le matériel agricole n'est pas seulement utilisé pour transporter les boues. L'allocation a été effectuée suivant la masse de la machine, sa durée de vie et la durée de l'opération considérée.
Stockage des boues	Il est également nécessaire d'allouer une partie des infrastructures au stockage des boues. Pour cela, nous avons pris en compte la quantité de matière sèche épandue par an et la durée de vie de l'installation.
Epandage	La valorisation agricole participe à la fertilisation des parcelles en plus de permettre l'élimination des boues. Ces boues peuvent donc se substituer à des engrais minéraux. Nous avons choisi d'effectuer une substitution par soustraction en retirant de notre système les apports d'engrais évités ainsi que leurs émissions.

Tableau 8: Hypothèses réalisées par rapport aux allocations

### 3.3.2. Inventaire des flux

A partir des hypothèses précédentes, l'inventaire des flux entrants et sortants a pu être réalisé pour chacun des procédés des trois filières étudiées.

Dans chaque cas, les quantités d'électricité, de réactifs et de carburant nécessaires au bon fonctionnement du traitement, ainsi que les quantités d'infrastructure mobilisées, ont été prises en compte en tant qu'intrants.

Au niveau des sortants, les retours en tête ainsi que l'ensemble des émissions directes (liées au traitement de la boue ou à la combustion du carburant par exemple) et des émissions indirectes (liées à la fabrication des polymères par exemple) ont été considérées.

La majorité des données utilisées concernant les retours en tête ou les émissions vers l'air, l'eau ou le sol proviennent d'analyses réalisées dans le cadre d'autres études d'IRSTEA (PRADEL et al., 2013 et GIRAULT et al., 2014). Grâce à ces données, nous avons ainsi pu déterminer la composition des boues tout au long des filières et schématiser les différents scénarios. La Figure 18 représente cette phase d'inventaire appliquée au scénario 1.

Sur ce schéma, l'unité « p » signifie « 1 pièce » et correspond à la quantité d'infrastructure nécessaire pour traiter l'unité fonctionnelle, c'est-à-dire, ici, 1 tonne de matière sèche de boue.

Grâce à cet inventaire, nous avons pu déterminer la quantité de boue restante en fin de filière de traitement ainsi que sa composition.

Légende:

- Intrants
- Emissions
- Composition boue

Boue de départ (pour 1 t MS)	
Quantité de boue de départ (t BB)	100
Taux de siccité (%)	1%
Quantité de MS (t MS)	1
C total (kg C)	362,48
N total (kg N)	78,80
Norg (kg Norg)	78,80
N-NH4 (kg N-NH4)	0,00
P total (kg P)	24,01
Ppart (kg P-Ppart)	24,01
K2O total (kg K-K2O)	10,29
Ca total (kg Ca)	42,10
Mg total (kg Mg)	4,64

Infrastructure	P
1.52E-04	

Electricité	kWh
10	

Boue épaisse	
Quantité MS (t MS)	0,95
Taux de MS (%)	3,0%
Quantité MB (t)	31,67
C total (kg Ctot)	344,36
N total (kg Ntot)	64,46
Norg (kg Norg)	64,35
N-NH4 (kg N-NH4)	0,11
P total (kg Ptot)	16,80
Ppart (kg P-Ppart)	16,55
K2O total (kg K-K2O/)	10,29
Ca (kg Ca)	39,15
Mg (kg Mg)	4,18

Infrastructure	P
5,79E-04	

Boue stockées (avant chargement)	
Quantité MS (t MS)	0,85
Taux de MS (%)	2,7%
Quantité MB (t)	31,67
C total (kg Ctot/t MS)	263,64
N total (kg Ntot/t MS)	57,73
Norg (kg Norg)	51,84
N-NH4 (kg N-NH4)	5,74
P total (kg Ptot/t MS)	15,05
Ppart (kg P-Ppart)	14,30
K total (kg Ktot/t MS)	9,22
Ca (kg Ca/t MS)	35,06
Mg (kg Mg/t MS)	3,74

Carburant pour chargement	
Conso fuel (l)	1,548

Epaissement gravitaire

Stockage (SUR STEP)

Chargement des boues

EMISSIONS DIRECTES

Retour en tête	
MS (t MS)	0,05
C total (kg Ctot)	18,124
N total (kg Ntot)	14,341
Norg (kg Norg)	14,126
N-NH4 (kg N-NH4)	0,215
P total (kg Ptot)	7,202
Ppart (kg P-Ppart)	6,688
K2O total (kg K2O)	0,000
Ca (kg Ca)	2,947
Mg (kg Mg)	0,464

Emissions dans l'air	
CH4 (kg C-CH4)	22,98
CO2 (bactéries) (kg C-CO2)	8,35
NH3 (kg N-NH3)	0,14

Emissions dans l'air dues à la combustion du carburant lors du chargement	
CO (g)	4,94
NOx (g)	48,47
Hydrocarbures HC (g)	3,22
CO2 (kg)	4,06
SO2 (g)	1,31
CH4 (g)	0,17
C6H6 (g)	0,01
Cd (g)	0,00001
Cr (g)	0,00007
Cu (g)	0,0022
N2O (g)	0,16
Ni (g)	0,00009
Zn (g)	0,001
Benzot(a)pyrene (g)	0,00004
NH3 (g)	0,03
Se (g)	0,00001

EMISSIONS INDIRECTES



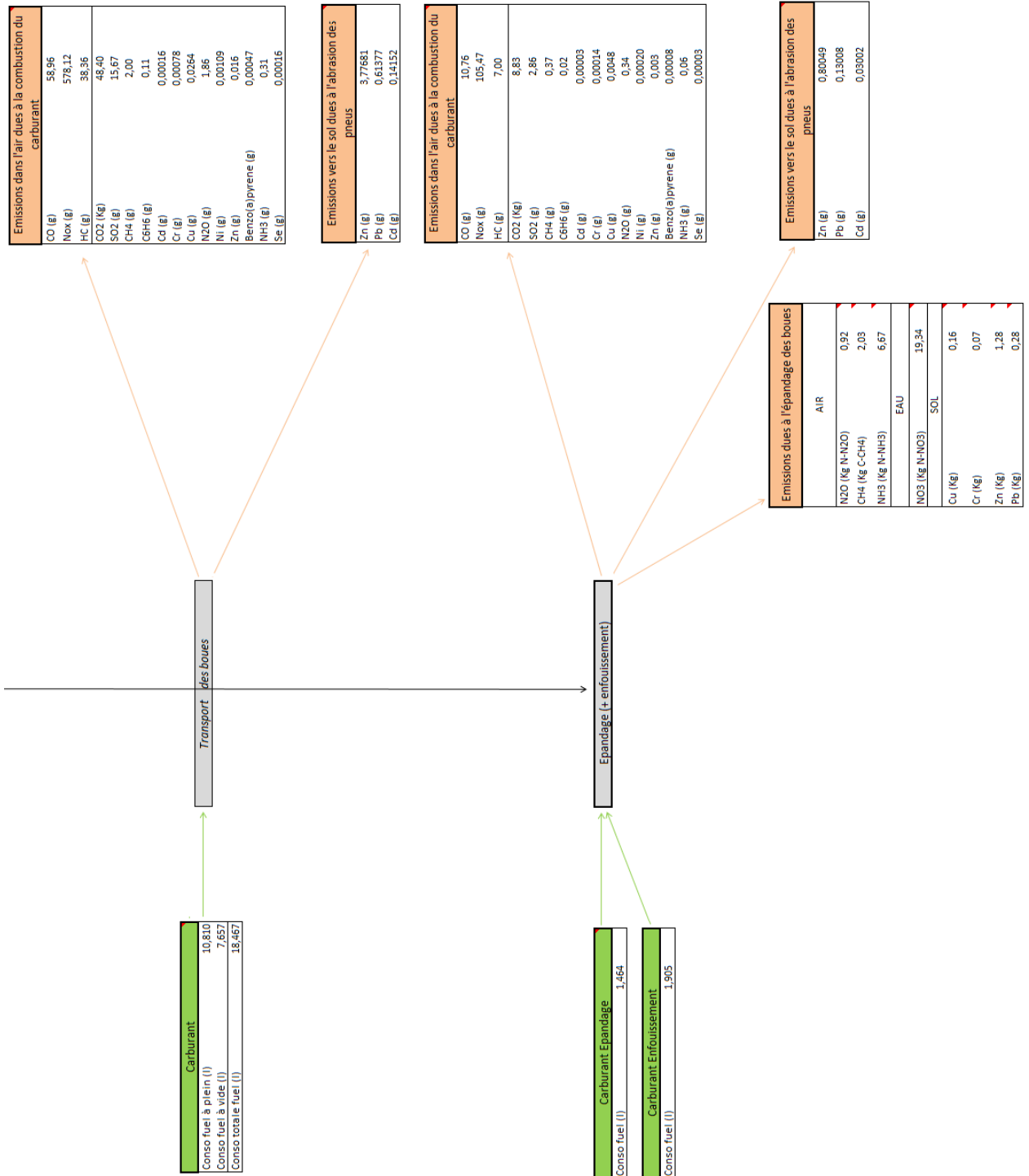


Figure 18: Représentation de l'inventaire des flux effectuée pour le scénario N°1

De plus, avec les hypothèses réalisées précédemment à propos des besoins de la plante (ici, de l'orge d'hiver), nous avons pu déterminer l'élément limitant ainsi que la dose maximale de boue à apporter par hectare. Il était important de déterminer cette dose maximale pour chacun des scénarios afin qu'ils soient réalistes et que les résultats obtenus grâce à l'ACV soient, eux aussi, réalistes et exploitables.

Pour le scénario 1 par exemple, l'élément limitant était le phosphore et la quantité de boue à apporter était de 120 tonnes de matière brute par hectare, ce qui correspond environ à 3 tonnes de matière sèche. Avec ces données, nous avons alors pu calculer les quantités d'engrais synthétiques dont l'apport avait été évité grâce à l'épandage des boues, ainsi que toutes les émissions liées à leur fabrication, leur transport et leur épandage.

### 3.3.3. Evaluation des impacts environnementaux

Pour réaliser cette phase de l'ACV, le logiciel SimaPro a été utilisé. La méthode de travail de ce calculateur reprend les grandes étapes de l'ACV. Tout d'abord, l'onglet « Objectifs et portée » permet de récapituler les principales informations utiles avant de réaliser l'ACV. Puis, un second onglet nommé « Inventaire » nous permet de rentrer les données recueillies lors de la seconde phase de l'ACV. Les impacts environnementaux liés à la filière modélisée ont alors pu être calculés.

Bien qu'il existe de nombreuses autres méthodes (IMPACT 2002+, CML 2...), nous avons choisi d'utiliser la méthode « Recipe » premièrement car elle est relativement récente puisqu'elle date de 2008 et c'est également une méthode qui permet de modéliser les impacts environnementaux à la fois au niveau mid-point et au niveau end-point. De plus, c'est une des méthodes de calcul les plus complètes, qui fait appel à davantage de catégories d'impacts environnementaux que les autres méthodes. Recipe analyse effectivement 18 catégories d'impacts différentes, qui sont présentées dans le Tableau 9.

Impact	Description de l'impact	Unité de référence
<b>Changement climatique à 100 ans</b> (Climate change)	Impact des émissions anthropiques sur le forçage radiatif de l'atmosphère contribuant à augmenter l'effet de serre. Les principaux gaz contributeurs sont le CO <sub>2</sub> , le CH <sub>4</sub> , le N <sub>2</sub> O, le SF <sub>6</sub>	<b>Kg CO<sub>2</sub></b>
<b>Destruction de la couche d'ozone</b> (Ozone Depletion)	Impact des émissions anthropiques sur la destruction de la couche d'ozone (ozone stratosphérique)	<b>Kg CFC-11</b> (trichlorofluorométhane)
<b>Acidification</b> (Terrestrial acidification)	Impact de l'émission de substances acidifiantes dans l'air (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> ). Ces substances donnent naissance à différents composés acides transportables sur de longues distances et finissant par retomber au sol ou dans le milieu aquatique en les acidifiant.	<b>Kg SO<sub>2</sub></b>
<b>Eutrophisation</b> (Fresh water Eutrophication, Marine Eutrophication)	Impact des émissions contribuant à l'enrichissement des milieux aquatiques en éléments nutritifs (N et P notamment) entraînant à terme une dégradation du milieu et une perte de biodiversité.	<b>Kg P</b> <b>Kg N</b>

<b>Impact</b>	<b>Description de l'impact</b>	<b>Unité de référence</b>
<b>Formation de pollution photochimique</b> (Photochemical oxidant formation)	Impact des émissions anthropiques sur la création d'ozone troposphérique. Sous l'influence des rayonnements solaires, les polluants atmosphériques (COV, NOx, CO...) vont se transformer en ozone troposphérique (aussi appelé « mauvais ozone ») et autres composés oxydants qui auront des effets néfastes sur les êtres vivants.	<b>Kg COVNM</b> (Composés Organiques Volatils Non Méthaniques)
<b>Formation de particules</b> (Particulate matter formation)	Impact des émissions anthropiques sur la formation de particules en suspension dans l'air ambiant qui peuvent, à terme, affecter la santé des êtres vivants.	<b>Kg PM<sub>10</sub></b> (Particules en suspension dans l'air d'un diamètre <10 µm)
<b>Toxicité humaine</b> (Human Toxicity)	Impact des molécules et substances chimiques émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur la santé de l'homme.	<b>Kg 1,4 DB</b> (dichlorobenzene)
<b>Ecotoxicité</b> (Fresh water Ecotoxicity, Marine Ecotoxicity, Terrestrial Ecotoxicity)	Impact des molécules et substances chimiques émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur les écosystèmes.	
<b>Radiation ionisante</b> (Ionizing radiation)	Impact des émissions anthropiques sur la présence de radiations ionisantes, elles-mêmes dues à la présence de composés radioactifs.	<b>Kg <sup>235</sup>U</b>
<b>Occupation du territoire</b> (Agricultural land occupation, Urban land occupation)	Impact des activités anthropiques sur l'occupation des territoires agricoles et urbains.	<b>m<sup>2</sup> * ans</b>
<b>Transformation de l'espace naturel</b> (Natural land transformation)	Impact des activités anthropiques sur la transformation de l'espace naturel.	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>Epuisement de la ressource en eau</b> (Fresh water depletion)	Impact des activités anthropiques sur la consommation en eau douce.	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Epuisement de la ressource en métaux</b> (Metal depletion)	Impact des activités anthropiques sur les teneurs en minerais (Cd, Cr, Ni, Pb, Hg...).	<b>Kg Fe</b>
<b>Epuisement des ressources fossiles</b> (Fossil fuel depletion)	Impact des activités anthropiques sur les volumes d'extraction des énergies fossiles.	<b>Kg Oil</b>

Tableau 9: Les 18 catégories d'impacts analysées par la méthode Recipe (adapté de PRADEL et al., 2013)

Avec Recipe, ces catégories d'impacts, ou « indicateurs mid-point » peuvent ensuite être regroupés dans trois catégories de dommage ou « indicateurs end-point » sur la santé humaine, les écosystèmes et l'évolution des ressources. Cependant, lors de l'étude d'impact, nous avons choisi de ne considérer que les indicateurs « mid-point » car lorsque l'analyse est réalisée grâce à une méthode « end-point », les résultats sont beaucoup trop agrégés (car ils sont regroupés en 3 catégories) pour pouvoir être correctement interprétés.

### 3.3.4. Présentation des résultats et interprétation

Afin d'illustrer l'application de la méthode présentée ci-dessus, voici les résultats obtenus pour le premier scénario. La Figure 19 représente tout d'abord les résultats des impacts ACV étudiés pour le scénario N°1. Il est possible de voir que chacun des procédés a un impact plus ou moins important suivant l'indicateur « mid-point » considéré.

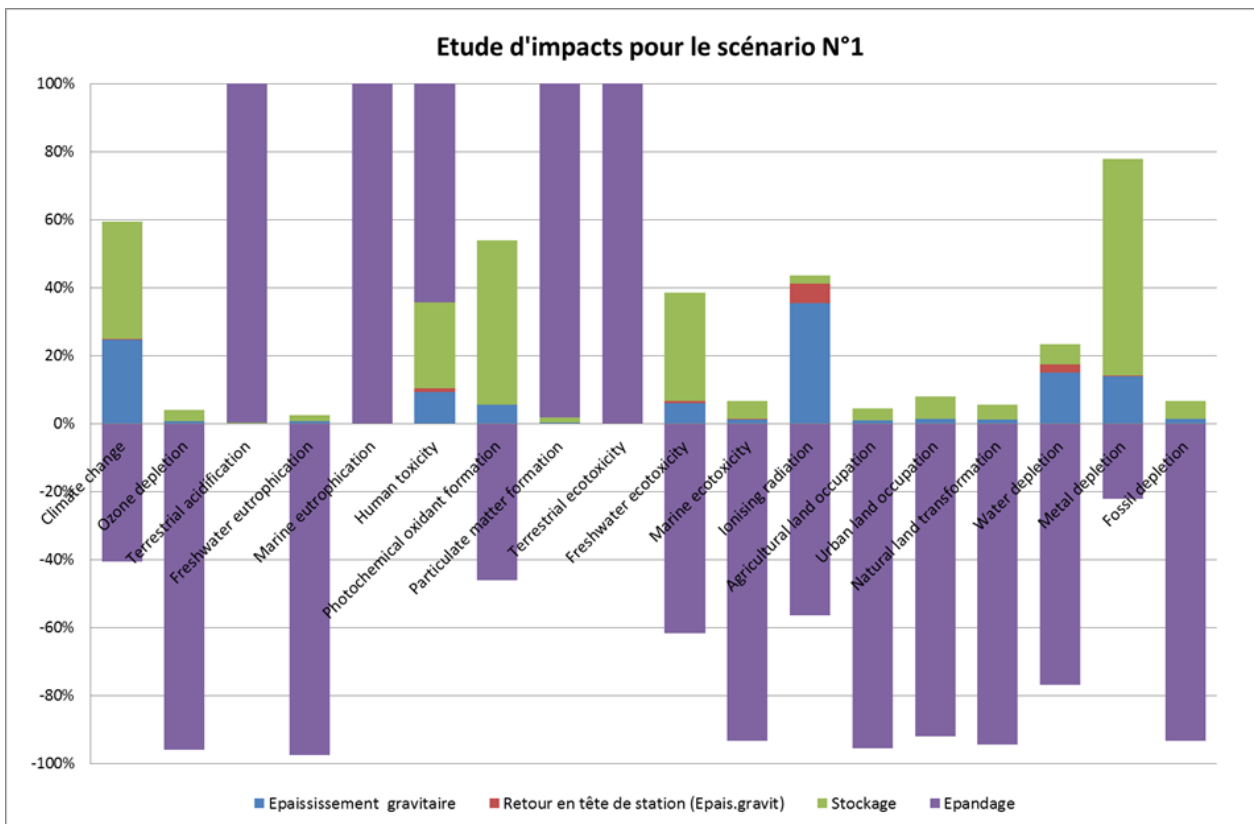


Figure 19: Etude d'impacts pour le scénario N°1

L'analyse des résultats montre que l'épaississement gravitaire n'a globalement que peu de conséquences sur les différentes catégories d'impacts étudiées par rapport aux autres procédés ; excepté pour trois des indicateurs analysés. En effet, comme le montre la Figure 19, ce procédé a un impact relativement important sur le changement climatique, majoritairement dû à l'émission de gaz à effet de serre (CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>) lors de l'épaississement. C'est également le procédé qui a l'impact le plus important sur les radiations ionisantes ainsi que sur l'épuisement des ressources en eau, principalement à cause de l'électricité qui est nécessaire au fonctionnement de l'épaississeur. En effet, lors de la modélisation de l'électricité utilisée par le procédé, nous avons choisi le mix énergétique français, dont l'origine est par ordre décroissant nucléaire, hydraulique, à base de charbon, à base de gaz naturel et enfin de pétrole.

L'énergie nucléaire produisant des déchets radioactifs (SCIENCE.GOUV, 2011), l'utilisation d'électricité participe donc à augmenter la part de radiations ionisantes. De plus, la production d'énergie consomme également beaucoup d'eau, surtout lorsqu'elle est produite à partir de charbon, de gaz ou de pétrole (TOTAL, 2013).

Ensuite, pour ce qui est du stockage des boues, il est possible de voir sur la Figure 19 que les impacts environnementaux liés à cette phase du scénario concernent globalement quatre indicateurs. On retrouve tout d'abord d'importantes conséquences sur le changement climatique, à cause des émissions de CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>. Le méthane émis est également responsable de l'impact du stockage sur la formation de pollution photochimique puisque le CH<sub>4</sub> est un polluant primaire qui, associé à de l'énergie, peut former de l'ozone et d'autres composés. Ce procédé a également d'importantes conséquences sur l'écotoxicité en eau douce, ce qui est dû au processus de fabrication de l'acier utilisé dans les infrastructures de stockage. Enfin, il a de lourdes conséquences sur l'épuisement des ressources en métaux, du fait de leur utilisation dans les zones de stockage.

Pour finir, l'épandage est la phase qui a le plus d'impacts sur l'environnement dans ce scénario. Cette étape regroupant un certain nombre d'éléments différents, la Figure 20 y représente le détail de l'analyse de cette étape.

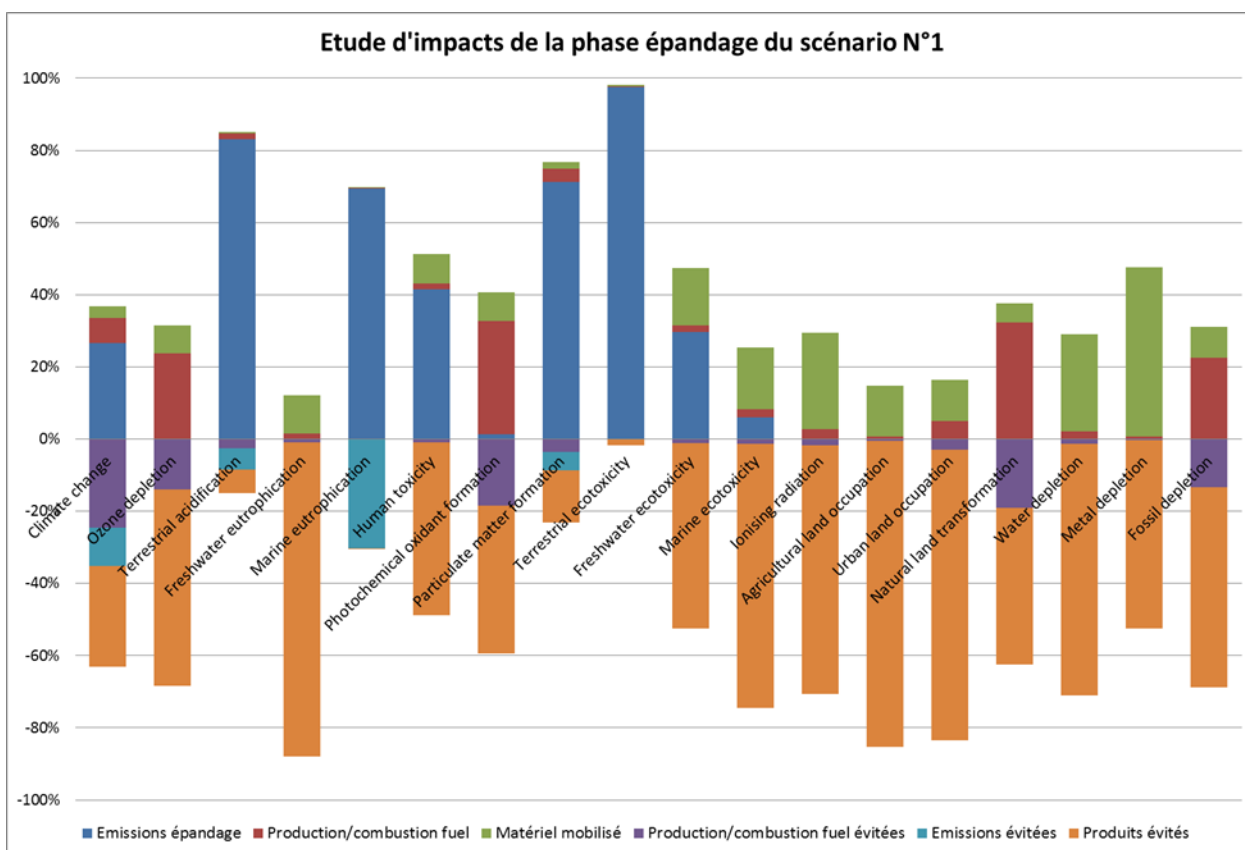


Figure 20: Etude d'impacts de la phase épandage du scénario N°1

Pour réaliser la modélisation, les émissions liées à l'épandage des boues (en bleu foncé) ont été différenciées des émissions liées à la production et à la combustion du fuel lors de l'utilisation du tracteur (en rouge), ainsi que des émissions liées au matériel mobilisé lors de l'épandage (en vert).

Les boues étant considérées dans ce cadre-là comme une ressource de par les éléments nutritifs N et P qu'elles apportent aux cultures, elles peuvent se substituer à des engrais minéraux azotés et phosphatés. Les émissions et produits chimiques dont l'apport a ainsi été évité grâce à l'épandage de boues ont également été modélisés et apparaissent en négatif sur la figure 20. De la même façon que pour les émissions générées, les émissions évitées liées au non-épandage des engrais chimiques (en bleu clair) ont été différenciées des émissions évitées liées au fuel (en violet), et des quantités d'engrais minéraux évités (i.e. fabrication et transport, en orange).

Chacun de ces éléments constituant la phase épandage (en dehors des éléments évités) aura un effet plus ou moins important sur l'environnement, suivant l'indicateur considéré.

Ainsi, les émissions post-épandage des boues auront d'abord un effet significatif sur le réchauffement climatique, lié au CH<sub>4</sub> et au N<sub>2</sub>O émis ; et sur l'acidification terrestre, qui sera due à l'émission de NH<sub>3</sub>. Les effets sur la toxicité humaine ainsi que sur les écotoxicités terrestres et aquatiques, tous trois dus à l'émission d'éléments traces métalliques (ETM) dans le sol, seront également importants. De plus, les émissions issues de l'épandage auront des conséquences sur la formation de particules dans l'air, le NH<sub>3</sub> émis pouvant s'associer avec d'autres gaz (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) pour former des particules secondaires. Enfin, il y aura aussi des impacts sur l'eutrophisation marine à cause des émissions de NH<sub>3</sub> et de NO<sub>3</sub>. Concernant ce dernier paramètre, il est important de savoir que le logiciel SimaPro considère que seules les émissions d'azote participeront à l'eutrophisation des milieux marins et que les émissions de phosphore uniquement engendreront l'eutrophisation des milieux d'eau douce.

Les émissions liées à la production et la combustion du diesel auront des conséquences différentes de celles dues aux émissions azotées post-épandage. D'abord, elles participeront à la destruction de la couche d'ozone à cause des émissions ayant lieu lors de la combustion du carburant. Elles impacteront ensuite le niveau de pollution photochimique à cause des émissions de NO<sub>x</sub> et de CO, principalement. Elles contribueront aussi à la transformation de l'espace naturel, par exemple, via la multiplication des zones d'extraction de pétrole, et, à l'épuisement des ressources fossiles.

Ensuite, le matériel utilisé lors de l'épandage va, lui, participer indirectement à la création de radiations ionisantes à cause de l'électricité utilisée lors de sa fabrication. Il va également jouer sur l'occupation des territoires urbains et agricoles, par exemple avec la destruction de parcelles forestières afin d'utiliser le bois dans les infrastructures de stockage du matériel. Enfin, il va aussi impacter l'épuisement des ressources en eau et en métaux à cause de la fabrication de ce matériel.

Enfin, en ce qui concerne l'ensemble des éléments évités, on peut remarquer que l'impact des émissions évitées liées à la non-utilisation du fuel ainsi que celles associées au non-épandage des engrais chimiques sont relativement faibles par rapport à l'impact de la fabrication des engrais minéraux évités. Les résultats obtenus concernant ces produits sont en effet significatifs pour la quasi-totalité des indicateurs «mid-point». Cela s'explique principalement par le fait que les productions de l'ammonitrate et de triple superphosphate sont des processus très impactants sur l'environnement. En effet, leur fabrication va d'abord induire l'émission de gaz à effet de serre et aura donc un effet sur le réchauffement climatique.

Elle va également induire la production de molécules altérant la couche d'ozone, participant à la formation de la pollution photochimique et, enfin, d'agents chimiques responsables de l'accroissement de l'écotoxicité marine. Enfin, le fait de ne pas fertiliser une parcelle avec des engrais synthétiques va également permettre d'alléger le bilan concernant l'occupation des espaces agricoles et urbains.

Au final, la substitution réalisée a permis d'améliorer considérablement le bilan environnemental de la filière de traitement modélisée dans le scénario N°1 et justifie le fait qu'aujourd'hui, l'épandage soit la première filière de valorisation des boues d'épuration en France.

L'analyse réalisée précédemment sera réalisée pour l'ensemble des scénarios modélisés, nous permettant ainsi d'évaluer l'impact environnemental de filières de traitement et de valorisation de boues globales. Ce travail sera ensuite suivi d'une analyse de sensibilité.

### 3.4. Analyse de sensibilité (deuxième partie du stage)

La seconde partie du stage sera principalement consacrée à la réalisation de l'analyse de sensibilité, ainsi qu'à la modélisation et l'analyse des autres scénarios.

L'intérêt de réaliser cette analyse de sensibilité est de pouvoir déterminer le ou les paramètres ayant la plus forte influence sur chaque indicateur d'impact, et donc de déterminer les données devant être connues avec le plus de précision. Cela permettra ainsi de minimiser l'incertitude des résultats.

Cette analyse de sensibilité sera réalisée en utilisant la méthode de calcul suivante : Pour chacun des paramètres à faire varier, nous allons modifier certaines des valeurs initialement choisies lors de la réalisation de la première ACV et calculer l'impact de ces nouvelles valeurs. Par exemple, si la valeur du paramètre initial est notée  $x$ , la variation relative de ce paramètre sera notée  $\Delta_x/x$ . De la même façon, si l'impact correspondant au paramètre  $x$  est noté  $I$ , la variation relative d'impact observable sera notée  $\Delta_I/I$ .

A partir de ces données, il sera alors possible de déterminer l'indicateur de sensibilité correspondant à ce paramètre. Cet indice se calcule de la façon suivante :

$$S_{xi} = \Delta_I/I / \Delta_x/x$$

Suivant la valeur de cet indice, il sera ensuite possible de déterminer la contribution du paramètre étudié sur l'impact considéré.

Dans le cadre de cette analyse de sensibilité, nous avons choisi de modifier différents paramètres : tout d'abord, nous ferons varier certaines des **données d'inventaire** que nous avons recueillies, c'est-à-dire, les informations sur les quantités d'intrants nécessaires, les émissions directes et indirectes, etc.

Nous modifierons ensuite les **hypothèses** que nous avons pris en compte lors de la réalisation de cette ACV, notamment, celles concernant les retours en têtes de station, le transport et la substitution des engrais minéraux de synthèse.

Enfin, nous modifierons également les **paramètres des procédés de traitement**, comme par exemple, les taux de capture considérés pour la déshydratation filtre presse, le temps de passage de la boue dans le digesteur lors de l'étape de digestion anaérobie ou encore la quantité de chaux utilisée lors du chaulage.

# Conclusion

---

Pour répondre à notre problématique de départ qui était « Quels sont les procédés de traitement ou de valorisation des boues devant être optimisés en priorité afin d'améliorer leur impact environnemental respectif ? », nous avons mis en place une méthodologie basée sur l'application de l'ACV.

Celle-ci nous a permis d'obtenir certains résultats, mais, comme nous l'avons déjà dit, il est difficile d'affirmer, et de généraliser à l'ensemble des filières, qu'un des procédés étudiés a un impact environnemental beaucoup plus important que les autres. En effet, suivant la catégorie d'impact et la filière considérée, les procédés étudiés auront des conséquences plus ou moins importantes. Il est cependant possible de déterminer ceux qui ont globalement un impact environnemental fort des autres. Ainsi, dans l'exemple utilisé pour illustrer la méthodologie appliquée durant le stage, on peut remarquer que le procédé de stockage et la valorisation agricole sont les deux processus qui engendrent globalement le plus d'impacts.

Ces résultats sont cependant à prendre avec précaution. En effet, l'ACV réalisée est, comme nous l'avons vu, basée sur un grand nombre d'hypothèses que nous avons choisi d'effectuer. Ainsi, en modifiant quelques-unes de ces hypothèses, les résultats pourraient être significativement différents, d'où l'intérêt de réaliser une analyse de sensibilité. En effet, cette analyse, qui sera réalisée dans la seconde partie du stage, permettra de déterminer l'impact des hypothèses réalisées et l'importance de la fiabilité des données nécessaires.

De plus, pour réaliser les hypothèses et obtenir les informations, nous avons régulièrement voulu nous appuyer sur les références bibliographiques disponibles dans la littérature. Cependant, les procédés de traitement et de valorisation des boues ayant été globalement peu étudiés au niveau scientifique (excepté quelques techniques comme la digestion anaérobie ou le chaulage), il est relativement difficile de trouver de telles références. De plus, lorsque des données sont disponibles, il est encore plus difficile de vérifier leur exactitude. Ainsi, la fiabilité de nos hypothèses et données est également à prendre avec précaution.

Pour tenter de compenser ce problème de manque d'information dans la littérature, il pourrait être intéressant de procéder à des mesures sur le terrain. Cependant, cela demanderait un investissement non négligeable de temps et de financements.



# Bibliographie

---

- ADEME, 2005. Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), Note de synthèse externe, 14p.
- ADEME et COMITE NATIONAL DES BOUES, 2001. Dossier documentaire : « Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture ».
- AÏT KACI A., BENSALD SCHEMBA J., BERGER J., DEMOULIERE R. et ROUGIER F., 2012. Les services publics d'eau et d'assainissement en France : Données économiques, sociales et environnementales, 88p., [[http://www.fp2e.org/userfiles/files/publication/etudes/Etude%20FP2E-BIPE%202012\\_FR.pdf](http://www.fp2e.org/userfiles/files/publication/etudes/Etude%20FP2E-BIPE%202012_FR.pdf)], (consulté le 02/08/2014)
- BAUDEZ J.C, DIEUDE-FAUVEL E. et REVERDY A.L., 2013. Etude de l'impact de la digestion anaérobie sur les performances épuratoires d'une STEU, 54p.
- BERTHELIN J., GIRARD M.C., MOREL J.L., REMY J.C. et WALTER C., 2011. Sols et environnement, 2<sup>e</sup> édition, 882p.
- BOUTIN C., HEDUIT A., RISCH E. et ROUX P., 2012. L'analyse de cycles de vie (ACV) des systèmes d'assainissement : un outil complémentaire d'aide à la décision, *Sciences Eaux & Territoires*, N°9, p. 82-91.
- CANLER J.P., DERONZIER G., DUCHENE P., HEDUIT A., LIENARD A., RACAULT Y. et SCHETRITE S., 2001. Traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités, Document technique FNDAE (Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau potable) N°25, 79p.
- CENTRE D'INFORMATION SUR L'EAU, 2012. Allons-nous manquer d'eau en France ?, [<http://www.cieau.com/allons-nous-manquer-d-eau-en-france>] (consulté le 19/06/2014)
- CHABAT L., 2013. Analyse du Cycle de Vie des filières de traitement des boues issues du traitement des eaux usées, Mémoire de fin d'étude Montpellier SupAgro, 100p.
- CHAMBRE D'AGRICULTURE MIDI-PYRENEES, 1992. Le chaulage, [[http://www.tarn.chambagri.fr/fileadmin/DocInternet/filieres/agronomie\\_environnement/chaulage\\_300dpi.pdf](http://www.tarn.chambagri.fr/fileadmin/DocInternet/filieres/agronomie_environnement/chaulage_300dpi.pdf)] (consulté le 14/08/2014)
- CHEVENEMENT J.P., KOUCHNER B., LE PENSEC L., VOYNET D. et ZUCCARELLI E., 1998. Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées, [[http://www.ineris.fr/aida/consultation\\_document/5659](http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/5659)] (consulté le 05/08/2014)
- COMMISSARIAT GENERAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE, 2012. Le financement de la gestion des ressources en eau en France (actualisation de janvier 2012), *Etudes et documents*, n°62, 84 p.
- DEGREMONT, 2005. Memento technique de l'eau, tome 2. Dixième édition, 931p.

FINNVEDEN G., 1999. Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems, *Resources, Conservation and Recycling*, volume 26, issues 3-4, p.173-187

GIRAULT R., REVERDY A.L., TOSONI J., 2014. Déshydratation mécanique des boues d'épuration. Etat des lieux des filières en France métropolitaine, 53p.

IRSTEA, 2013. L'Onema et Irstea : un partenariat qui dure, [<http://www.irstea.fr/toutes-les-actualites/onema-et-irstea-un-partenariat-qui-dure>] (consulté le 07/08/2014)

JOLLIET O., SAADE M. et CRETTEZ P., 2005. Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan, Presses polytechniques et universitaires romandes, 242p.

LEGIFRANCE, 1997. Décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées, [<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000739355&fastPos=1&fastReqlid=1194607325&categorieLien=id&oldAction=rechTexte>] (consulté le 13/09/2014)

MARCHAND M., 2013. Considération de la différenciation spatiale dans l'évaluation des impacts environnementaux locaux au moyen de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) – Application à la gestion des déchets ménagers, Thèse Université de Rennes 1, 292p.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE, 2011. Eau potable : La consommation, [<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/306/305/eau-potable-consommation.html>] (consulté le 13/09/2014)

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE, 2013a. L'assainissement collectif, [<http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-directive-sur-les-eaux,12217.html>] (consulté le 13/07/2014)

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE, 2013b. Les boues issues du traitement des eaux usées domestiques, [<http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-reglementation-europeenne-et,13890.html>] (consulté le 05/08/2014)

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, 2009. Eléments de contexte et réglementation française relatifs à la valorisation des boues issues du traitement des eaux usées, [[http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN\\_-\\_090504\\_lpd\\_i\\_boue\\_synthese\\_internet\\_francais\\_v1.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_-_090504_lpd_i_boue_synthese_internet_francais_v1.pdf)] (consulté le 04/08/2014)

MONTGINOUL M., 2013. La consommation d'eau en France : historique, tendances contemporaines, déterminants, *Sciences Eaux & Territoires*, N°10, p. 68-73

OTV, 1997. Traiter et valoriser les boues, éditions Lavoisier, 455p.

PRADEL M., 2010. Analyses du Cycle de Vie de chantiers d'épandage de boues de station d'épuration, livrable T3d du projet ECODEFI, 133p.

PRADEL M. et REVERDY A.L., 2010. Les filières de valorisation des boues d'épuration en France : Etat des lieux – Etat de l'art, 50p.

PRADEL M. et REVERDY A.L., 2011. Mise en place d'un outil de quantification des émissions de GES par les filières de traitement et de valorisation des boues, 68p.

PRADEL M., REVERDY A.L. et RICHARD M., 2013. Analyses du cycle de vie des filières de traitement et de valorisation des boues issues du traitement des eaux usées, 110p.

RICHARD M., 2013. Analyse du cycle de vie des filières de valorisation des boues issues du traitement des eaux usées, Mémoire de fin d'étude EME, 110p.

SCIENCE.GOUV, 2011. Que savoir sur les déchets radioactifs ?, [<http://www.science.gouv.fr/fr/dossiers/bdd/res/2657/que-savoir-sur-les-dechets-radioactifs/>] (consulté le 21/08/2014)

SENAT, s.d. La valorisation des produits organiques par méthanisation (biogaz), [<http://www.senat.fr/rap/o98-415/o98-41510.html>] (consulté le 14/08/2014)

TOTAL, 2013. L'eau, une ressource indispensable pour produire de l'énergie, [<http://www.planete-energies.com/fr/energie-et-environnement/autres-impacts-environnementaux/eau-et-energie-600109.html>] (consulté le 21/08/2014)

Université Virtuelle Environnement & Développement Durable, 2012. Méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) – Limites, potentialités et applications de l'ACV, [[http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03\\_040\\_1-4.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_040_1-4.html)] (consulté le 07/08/2014)

# Table des figures

---

Figure 1: Représentation d'une station d'épuration (GIRAULT et al., 2014).....	11
Figure 2: les prétraitements des eaux usées (ADEME et COMITE NATIONAL DES BOUES, 2001) .....	12
Figure 3: Schématisation de la nitrification (CANLER et al., 2001).....	13
Figure 4: Schématisation de la dénitrification (CANLER et al., 2001).....	13
Figure 5: Filière de traitement des boues .....	16
Figure 6: Fréquence d'utilisation des procédés de déshydratation mécanique en France (GIRAULT et al., 2014).....	18
Figure 7: Le cycle de vie d'un produit schématisé.....	23
Figure 8: Les quatre étapes de l'ACV (RICHARD, 2013).....	23
Figure 9: Illustration de la phase de classification (BOUTIN et al., 2012) .....	25
Figure 10: Représentation de la phase de classification de l'ACV (JOLLIET et al., 2005) .....	25
Figure 11: Illustration de la substitution par addition (RICHARD, 2013).....	27
Figure 12: Illustration de la substitution par soustraction (RICHARD, 2013).....	27
Figure 13: Représentation du scénario N°1.....	30
Figure 14: Représentation du scénario N°2 .....	31
Figure 15: Représentation du scénario N°3 .....	32
Figure 16: Représentation du scénario N°4 .....	32
Figure 17: Représentation des frontières du système étudié (adapté de PRADEL et al., 2013).....	34
Figure 18: Représentation de l'inventaire des flux effectuée pour le scénario N°1 .....	40
Figure 19: Etude d'impacts pour le scénario N°1 .....	43
Figure 20: Etude d'impacts de la phase épandage du scénario N°1 .....	44

# Table des tableaux

---

Tableau 1: Teneurs limites en Composés-Traces Organiques dans les boues (CHEVENEMENT et al., 1998).....	21
Tableau 2: Teneurs limites en Eléments-Traces dans les boues (CHEVENEMENT et al., 1998).....	21
Tableau 3: Teneurs limites en Eléments-Traces Minéraux dans le sol (CHEVENEMENT et al., 1998) ..	22
Tableau 4: Les différents types de boues obtenus pour chaque scénario.....	33
Tableau 5: Hypothèses réalisées sur les procédés de traitement.....	36
Tableau 6: Hypothèses réalisées concernant la logistique .....	36
Tableau 7: Hypothèses réalisées pour la valorisation agricole .....	37
Tableau 8: Hypothèses réalisées par rapport aux allocations.....	38
Tableau 9: Les 18 catégories d'impacts analysées par la méthode Recipe (adapté de PRADEL et al., 2013).....	42

# Table des matières

---

Remerciements .....	2
Résumé .....	3
Abstract .....	4
Sommaire .....	5
Sigles et abréviations.....	6
Introduction.....	8
1. IRSTEA, un organisme de recherche pour l'environnement et l'agriculture .....	10
2. La filière de production des boues : Du traitement à la valorisation .....	11
2.1. Le traitement des eaux usées et la production de boues d'épuration .....	11
2.1.1. La phase de prétraitement .....	12
2.1.2. Les traitements des eaux usées.....	12
2.2. Les traitements des boues d'épuration.....	15
2.2.1. Le conditionnement des boues .....	17
2.2.2. L'épaississement des boues .....	17
2.2.3. La déshydratation des boues.....	18
2.2.4. Le séchage des boues .....	20
2.3. La valorisation des boues d'épuration .....	20
2.4. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) .....	22
3. Evaluation des performances environnementales de filières de traitement et de valorisation des boues d'épuration par l'ACV .....	29
3.1. Présentation de la mission .....	29
3.2. Choix des filières « boue » pour la réalisation de l'étude .....	30
3.3. Réalisation de l'ACV.....	33
3.3.1. Définition des objectifs et champ de l'étude .....	33
3.3.1.1. Objectifs de l'étude et frontières du système .....	33
3.3.1.2. Hypothèses réalisées.....	35
3.3.2. Inventaire des flux.....	38
3.3.3. Evaluation des impacts environnementaux .....	41
3.3.4. Présentation des résultats et interprétation.....	43
3.4. Analyse de sensibilité (deuxième partie du stage).....	46
Conclusion .....	47
Bibliographie.....	48

Table des figures.....	51
Table des tableaux.....	51
Table des matières .....	52
Annexes N°1 : Composition de la boue secondaire .....	54

# Annexes N°1 : Composition de la boue secondaire

---

Eléments	Unité	Boue secondaire
Taux de siccité	%	1
Matière sèche	<i>kg MS / t boue brute</i>	10
Matière volatile	<i>kg MV / t MS</i>	701
pH	-	6.9
C/N	-	4,6
Carbone	<i>kg C / t MS</i>	362,48
Azote total	<i>kg N / t MS</i>	78.80
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<i>Kg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> / t MS</i>	0
Phosphore	<i>kg P / t MS</i>	24.01
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	<i>kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> / t MS</i>	0
Potassium	<i>kg K / t MS</i>	10.29
Calcium	<i>kg Ca / t MS</i>	42.10
Magnésium	<i>kg Mg / t MS</i>	4.64

Annexe 1: Composition de la boue secondaire considérée dans l'ACV