

Bilans énergétiques et environnementaux des systèmes type dans les filières biogaz : Application au traitement des boues résiduaires en France

Essam ALMANSOUR, Jean-François BONNET

Laboratoire TREFLE UMR CNRS 8508 ENSAM U. Bordeaux 1, ENSCP, B,
Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex
essam.almansour@bordeaux.ensam.fr, jean-francois.bonnet@bordeaux.ensam.fr

Résumé - Le biogaz constitue, dans l'optique des transports durables, une solution possible pour la production de carburant renouvelable. Les bilans énergétiques et environnementaux doivent être produits et comparés afin d'évaluer les alternatives en bilan global. Pour la France, une filière type décrivant le traitement par méthanisation des boues des stations d'épurations urbaines en France a été définie et étudiée par enquêtes techniques, sous la forme de systèmes type. Le bilan environnemental est analysé, en utilisant le logiciel d'analyse du cycle de vie SimaPro, et comparé à celui d'une autre filière de traitement des boues, par compostage. L'analyse comparative montre un bilan environnemental nettement plus favorable pour la filière méthanisation.

Nomenclature

STEP	station d'épuration	Nm ³	normal mètre cube
ST	système type	ACV	analyse de cycle de vie

1. Introduction

Les voies de développement de solutions durables pour les transports reposent en partie sur le déploiement de carburants d'origine renouvelable. A côté des filières carburant liquide, les filières biogaz permettent d'envisager une forme de production renouvelable mobilisant des ressources potentielles très diversifiées (déchets solides, effluents industriels, boues d'épuration urbaine, productions de biomasse, ...). Les critères de respect de l'environnement, allant au-delà du seul bilan énergétique, deviennent incontournables pour étudier l'intérêt de ces filières. Le développement de filières biogaz en tant qu'énergie renouvelable nécessite que le bilan environnemental de ces solutions soit avantageux. Dans le cadre d'une recherche sur l'évaluation énergétique et environnementale des différentes filières biogaz, on s'intéresse ici à la situation du biogaz issu de boues des stations d'épuration (STEP) urbaines en France. Les bilans énergétiques et environnementaux permettent d'envisager des comparaisons entre filières de traitement, mais aussi entre filières d'énergies renouvelables. Parmi les approches disponibles, on s'intéresse à l'évaluation environnementale par analyse de cycle de vie (ACV). Plusieurs catégories d'impact sont à prendre en compte : changement climatique, écotoxicité, acidification, eutrophisation, combustible fossile, ...

On cherche, dans cet article, à comparer la production de biogaz à une autre forme de traitement des boues urbaines, intéressante au sens environnemental mais non productrice d'énergie renouvelable : le compostage. Bien que n'étant pas la ressource privilégiée pour le biogaz carburant, la filière boues permet de développer la démarche d'analyse et d'obtenir les premières comparaisons. La digestion anaérobie avec application des digestats sur les sols agricoles est en effet un traitement des boues des STEP urbaines qui apparaît favorable environnementalement en comparaison avec des autres voies de traitement, grâce à la baisse des émissions et de l'énergie consommée [1] [2] et à la réduction du contenu en matière sèche

dans les boues [3]. L'impact environnemental de la construction du système est moins important que celui du fonctionnement ou de l'épandage des matières traitées et celui de l'expansion du système pour les fertilisants artificiels évités [2]. Pour les STEP à petite capacité (moins de 20000 équivalent habitant), l'eutrophisation et l'écotoxicité terrestre sont les catégories d'impacts les plus significatives dans les ACV [4]. Ces études font appel à des bases de données internationales mais n'ont pas été conduites spécifiquement dans le contexte des stations urbaines en France : c'est l'objet de la présente étude.

2. Objectif et méthode

On cherche à rendre compte de la situation nationale en proposant une description réaliste des filières existantes, par l'identification et la définition des systèmes type qui y interviennent. L'objectif est de prendre en considération les caractéristiques réelles des systèmes, de mettre en évidence les lois physiques qui les gouvernent, afin de permettre ultérieurement de développer et d'enrichir des analyses environnementales et des études de potentiel. Les systèmes type sont identifiés et caractérisés par des enquêtes techniques et investigations de terrain. Le programme d'enquête a concerné 37 sites identifiés dans les recensements Ademe [5]. La démarche comprend : (i) définition des filières, identification des systèmes types, (ii) élaboration d'une fiche technique d'enquête, conduite de l'enquête technique, (iii) caractérisation des systèmes, (iv) réalisation du bilan énergétique et environnemental sur la base des systèmes définis.

3. Définition du système type

Les informations nécessaires pour décrire le système type ont été collectées par enquête technique, à distance ou de terrain. Le système type retenu correspond au cas général le plus rencontré aux situations moyennes dans 17 réponses reçues sur les 37 stations d'épurations urbaines contactées. Il permet de déterminer en particulier les matériaux et l'énergie mobilisés pour la fabrication et l'implantation des équipements, ainsi que les paramètres techniques en fonctionnement. A titre d'exemple, la Figure 1 présente pour un ratio technique, le volume du biogaz produit (m^3) par le volume des effluents à l'entrée de STEP (m^3), les différentes valeurs et la moyenne obtenue pour les 17 stations ayant répondu.

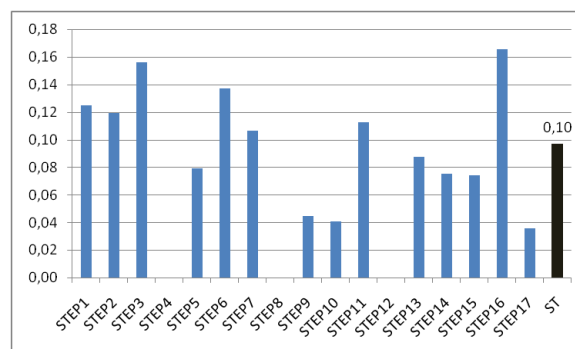


Figure 1: exemple du calcul des indices du fonctionnement du système type

Des consultations auprès des fournisseurs d'équipement ont été effectuées pour déterminer les équipements type les plus en accord avec ces enquêtes. Le point de départ pour la définition est le débit journalier à l'entrée du digesteur. La valeur moyenne des enquêtes qui ont précisé cette valeur (7 stations) est $226 m^3/j$. On retient une valeur type de $200 m^3/j$ de boues à l'entrée digesteur. Le volume des effluents à l'entrée de la station dans le système est $30\ 000 m^3/j$, ce qui correspond à $200\ 000$ équivalents habitants (EH). Ainsi, on peut retenir un ratio de $150 m^3$ d'effluents traités par m^3 de boues à l'entrée du méthaniseur. La valeur moyenne du rapport entre le biogaz produit et l'effluent traité est 0,1 et le volume du biogaz

produit dans le système est $3000 \text{ Nm}^3/\text{j}$. Les infrastructures nécessaires aux étapes successives du traitement ont une durée de vie de 30 ans, auxquels s'ajoutent 3 ans de construction. La Figure 2 a) montre le système type qui décrit le traitement des boues dans les STEP urbaines avec une étape de méthanisation. On peut voir les étapes successives du traitement, l'utilisation du biogaz produit et la valorisation des digestats avec des chiffres qui précisent les caractéristiques et les quantités des effluents entre les étapes. La masse volumique du compost est 575 kg/m^3 . Cette valeur est une valeur moyenne dans la bibliographie [6] [7].

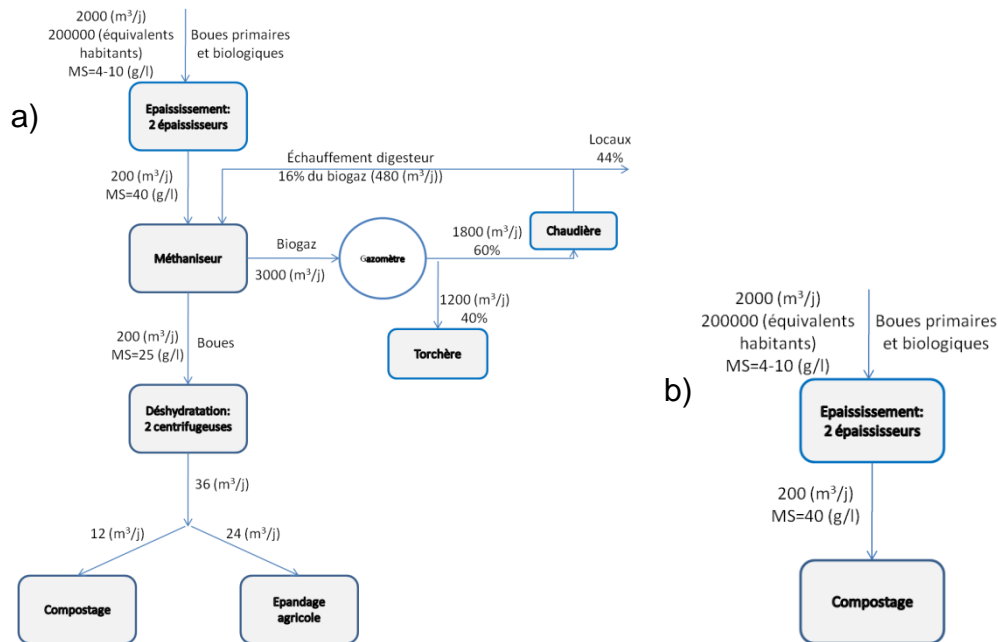


Figure 2: Filières étudiées : a) Système type de traitement des boues des STEP urbaines ; b) Système de comparaison par compostage des boues des STEP urbaines

Chaque sous-système est caractérisé techniquement, d'après les enquêtes, en tenant compte de la fabrication, des matières premières utilisées et des effluents produits.

3.1. Epaisseur

Deux épaisseur herses équipent deux ouvrages circulaires en béton de 480 m^3 de volume 12 m de diamètre, et 4,25 m de hauteur chacun. L'épaisseur, de masse moyenne 2800 kg, est fabriqué en majorité en acier inoxydable 304 L, avec des quantités faibles d'autres matériaux (fonte, cuivre, ...)

3.2. Méthanisation

Le méthaniseur couramment rencontré est un réacteur infiniment mélangé, fonctionnant à une technologie mésophile de 35°C , isolé thermiquement de l'extérieur. Il est brassé par recirculation (après compression) d'une partie du biogaz produit et par recirculation des effluents, servant également à échauffer le digesteur. Le volume du digesteur est de 6000 m^3 . Les besoins thermiques du digesteur sont fournis par une chaudière fonctionnant à 16% du biogaz produit. Le biogaz produit ($3000 \text{ m}^3/\text{j}$) est stocké dans un gazomètre de 625 m^3 à une pression relative de 20 mbar. Ensuite, il est divisé en deux parties : l'une est brûlée dans une chaudière pour échauffer le digesteur et fournir les besoins thermiques des locaux, et l'autre, qui constitue le biogaz excédentaire, est brûlée dans une torchère¹ (dans la situation actuelle couramment rencontrée). Le biogaz n'est pas épuré avant l'utilisation, pour 11 cas sur 17. La

¹ Quand le gazomètre arrive à un contenu biogaz de 80% de la capacité, le biogaz part vers la torchère. Cette opération s'arrête en arrivant à un contenu de 60% de la capacité du gazomètre.

puissance de la chaudière est de 715 kW (valeur moyenne calculée ici). Le biogaz est comprimé à 20 mbar par des compresseurs avant d'être introduit dans le gazomètre. La quantité des lubrifiants utilisés dans le digesteur, le gazomètre et le circuit du biogaz et des effluents est 520 kg pendant la durée de vie de l'installation.

3.3. Déshydratation

Trois centrifugeuses d'une capacité de 20 m³/h chacune sont considérées avec une durée de vie de 30 ans. Ces centrifugeuses sont chargées par 75% de leur capacité pour arriver à une siccité de 32% et à un volume des boues de 36 m³/j après la déshydratation. Chaque centrifugeuse est équipée de deux pompes, la première sert à injecter les boues dans la centrifugeuse et la deuxième injecte de l'eau pour nettoyer le tamis filtrant.

3.4. Valorisation des digestats

Les digestats sont valorisés dans les proportions suivantes :

- Deux tiers (24 m³/j) sont épandus sur des sols agricoles.
- Un tiers (12 m³/j) est composté et épandu par la suite sur des sols agricoles.

3.4.1. Epandage agricole

Il inclut le transport des digestats sur une distance de 25 km jusqu'aux terrains agricoles tous les jours dans des bennes. Les digestats sont ensuite épandus sur les sols agricoles.

3.4.2. Compostage et valorisation du compost

Le digestat est transporté tous les jours sur une distance de 25 km vers une unité de compostage, produisant une quantité journalière de 9,84 tonnes de compost à une siccité de 50% [8]. Le compost est ensuite transporté jusqu'aux terrains agricoles pour y être épandu.

4. Système de comparaison

Dans ce système (Figure 2 b), les boues épaisses entrent sans transport dans l'unité de compostage. Après le compostage, on obtient une quantité journalière de 108 tonnes de compost. Le compost est ensuite transporté sur une distance de 25 km jusqu'aux terrains agricoles où il est épandu par un camion citerne sur les sols agricoles.

5. ACV des systèmes : résultats et discussion

Suite à la description détaillée du cycle de vie de la filière biogaz et de la filière compostage, qui précise étape par étape les différentes composantes de fabrication, de fonctionnement et d'élimination, une analyse environnementale a été établie en utilisant le logiciel SimaPro. L'unité fonctionnelle retenue est le traitement de 1 m³ de boues des STEP urbaines. Les résultats montrent les impacts environnementaux des deux systèmes et de sous-systèmes composants et permettent de comparer les deux filières. La Figure 3 montre cette comparaison par catégorie d'impact. L'impact de la filière biogaz est favorable pour les catégories d'impact « changement climatique » et « énergies fossiles ». La production du biogaz, comme une énergie de substitution aux énergies non renouvelables, joue un rôle essentiel dans ces résultats. La filière biogaz est plus avantageuse que le compostage pour 10 catégories d'impact sur 11, en particulier pour « la pollution par organiques volatiles », « le changement climatique », « l'acidification/eutrophisation » et « les énergies fossiles ». En revanche, l'impact potentiel « carcinogènes » est plus favorable pour le compostage.

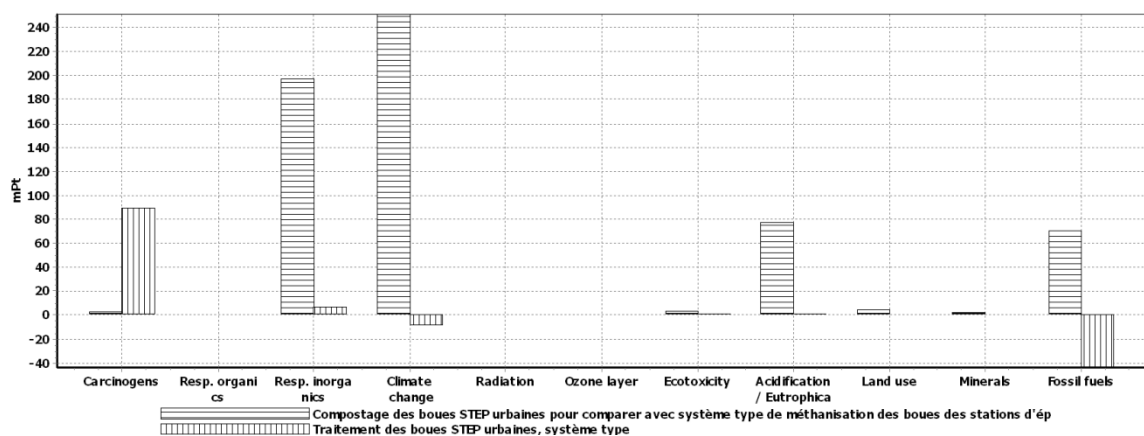


Figure 3: Comparaison par catégorie d'impact

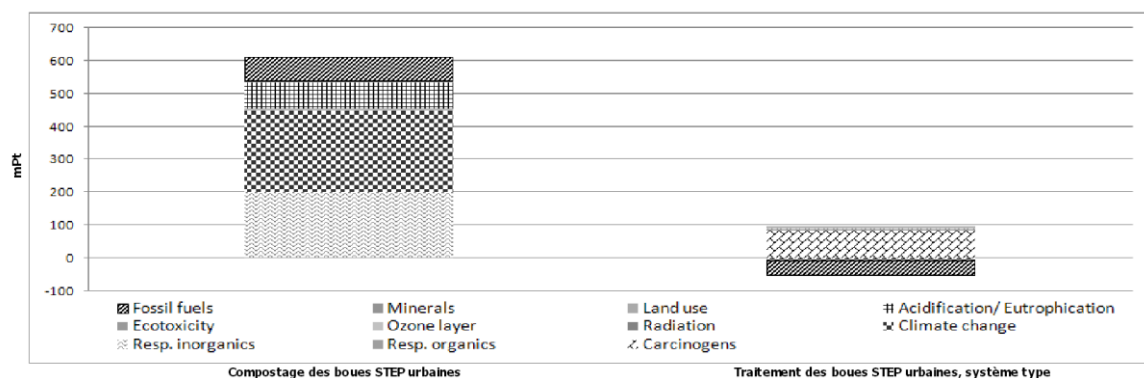


Figure 4: Score unique

Catégorie d'impact	Unité	système de comparaison (compostage)	système type (méthanisation)
Total	mPt	609,4	4,55
Carcinogènes	mPt	2,64	47,4
Organiques volatiles	mPt	0,23	0,0047
Inorganiques volatiles	mPt	197,08	6,68
Changement climatique	mPt	251,31	-8,42
Rayonnement	mPt	0,36	0,04
Couche d'ozone	mPt	0,01	0,0008
Ecotoxicité	mPt	3,58	0,72
Acidification/ Eutrophication	mPt	77,26	1,05
Usage des sols	mPt	4,58	0,29
Minéraux	mPt	1,93	0,27
Combustibles fossiles	mPt	70,43	-43,49

Tableau 1: Résultats de comparaison entre les deux systèmes en SimaPro

Une comparaison par score unique est illustrée dans la Figure 4 : la filière méthanisation présente, là encore, de meilleurs résultats en comparaison avec la filière compostage. L'impact de cette filière est presque neutre puisque l'impact favorable sur le changement

climatique et sur les énergies fossiles compense l'impact défavorable sur les autres catégories d'impact. Ces résultats sont explicités dans le Tableau 1 à l'aide du score unique de la méthode Eco-Indicator 99 qui normalise puis agrège l'ensemble des catégories d'impacts dans la même unité Pt (écopoint). En termes environnementaux, l'épandage de digestats ou de composts peut poser des problèmes spécifiques, que les méthodes d'ACV ne décrivent pas complètement. Les résultats comparatifs présentés ici gagneront à être complétés par une étude plus fine de ces aspects.

6. Conclusion

Deux filières de traitement ont été comparées avec la même unité fonctionnelle (traitement de 1 m³ des boues résiduaires urbaines). La première, par méthanisation avec une valorisation du biogaz -même incomplète- et du digestat produits et la deuxième, par compostage des boues avec valorisation du compost produit. L'analyse comparative en ACV montre que le bilan environnemental de la méthanisation est nettement plus favorable. Le biogaz valorisé joue un rôle essentiel dans ce bilan, permettant d'avoir un impact très favorable dans les catégories d'impact « changement climatique » et « énergies fossiles ». Une valorisation plus complète du biogaz en évitant le recours aux torchères, et l'extension des sources de matière organique pour la filière sont des perspectives importantes de développement.

Références

- [1] Y. J. Suh, P. Rousseaux, An LCA of alternative wastewater sludge treatment scenarios, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Resources, Conservation and Recycling, May 2002, 191-200.
- [2] K. Johansson, M. Perzon, M. Fröling, A. Mossakowska, M. Svanström, Sewage sludge handling with phosphorus utilization - life cycle assessment of four alternatives, Journal of Cleaner Production, January 2008, 135-151.
- [3] J. Hong, J. Hong, M. Otaki, O. Jolliet, Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan, Waste Management, February 2009, 696-703.
- [4] A. Gallego, A. Hospido, M. T. Moreira, G. Feijoo, Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations, Resources, Conservation and Recycling, April 2008, 931-940.
- [5] ADEME, Projet SINOE, Méthanisation : unités opérationnelles, 10 Fév. 2009.
- [6] Centre des Technologies Agronomiques, Rapport final du projet : Mise en œuvre de la technique du Bois Raméal Fragmenté (BRF) en agriculture wallonne, Projet subventionné par le Ministère de la Région Wallonne Direction Générale de l'Agriculture Direction de l'Espace Rural, Juin 2006.
- [7] Syndicat Centre Hérault, *Compost infos*, Publication d'informations sur la production du compost de la plate-forme de compostage d'Aspiran, Nov. 2006.
- [8] Ecoinvent database v2, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2000.