

# Comparaison de procédés de valorisation énergétique de boues digérées par analyse environnementale

Luca ZANATTA<sup>1,2</sup>, Fabien DELALEUX<sup>1\*</sup>, Sylvain DANTU<sup>1,3</sup>, Jean-Félix DURASTANTI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Etudes et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes  
Université Paris-Est Créteil – 77567 Lieusaint

<sup>2</sup>Syndicat Intercommunal d'Aménagement, de Rivières et du Cycle de l'Eau  
58-60 Rue Fernand Laguide, 91100 Corbeil-Essonnes

<sup>3</sup>Société publique locale Confluence Seine Essonne Energie

1 Rue des paveurs, 91000 Évry-Courcouronnes

\*(auteur correspondant : fabien.delaleux@u-pec.fr)

**Résumé** - Dans le cadre de la transition énergétique, le Société Publique Locale Confluence Seine Essonne Energie, entreprend des projets de production d'énergie renouvelable à partir des ressources des stations d'épuration dont elle possède la gestion. Après l'optimisation de la production de biogaz par méthanisation la SPL s'intéresse aux solutions de valorisation des boues digérées. Cet article présente une étude comparative des procédés de valorisation thermique des boues d'épuration par approche environnementale. Le bilan des émissions de gaz à effet de serre des procédés d'incinération et de co-incinération sont analysés par rapport à la solution d'épandage actuellement mise en place sur les sites. Les résultats tendent à favoriser l'envoi des boues préalablement séchées à l'aide du biogaz produit en unité de co-incinération.

## 1. Introduction

Les stations d'épuration d'Evry, propriété du syndicat Grand Paris-Sud (GPS), et d'Exona, propriété du Siarce, de capacités de traitement respectives de 250000 EH et 96000 EH, sont deux stations d'épuration urbaines de grandes capacités qui présentent la particularité d'être juxtaposées. Les deux syndicats ont décidé en 2021 de mutualiser la gestion de leur STEP par la création de la Société Publique Locale (SPL) Confluence Seine Essonne Energie, dans le but notamment de réduire les coûts d'exploitation et de maintenance ainsi que d'étudier des solutions de production d'énergie renouvelable à partir de leurs ressources.

En 2022, la SPL a mené à bien un projet de purification et d'injection dans le réseau gazier d'Evry du biogaz produit sur site à l'aide de méthanisateurs déjà implantés dans le procédé de traitement des boues. A l'origine, le biogaz était majoritairement brûlé par des torchères, une partie servant tout de même à subvenir aux besoins thermiques des digesteurs. Aujourd'hui, la production de biogaz est optimisée grâce à l'installation de pompes à chaleur récupérant la chaleur fatale des effluents en sortie de station d'épuration d'Evry afin de fournir l'énergie thermique nécessaire au fonctionnement des digesteurs. Au total, 1270000 Nm<sup>3</sup> de biogaz est injecté dans le réseau par an, ce qui équivaut à 13100 MWh d'énergie thermique. Dans une volonté d'augmenter la production d'énergie renouvelable sur ses sites épuratoires, la SPL s'est tournée vers la possibilité de valoriser les boues après l'étape de méthanisation.

Afin d'avoir une vision durable des solutions de production d'énergie par valorisation des boues d'épuration, cet article se concentre sur l'étude comparative de l'impact

environnemental de procédés de valorisation thermique des boues digérées par rapport au procédé de traitement des boues actuellement en place sur les sites. L'ajout de ce critère aux aspects énergétique et économique permet d'avoir un troisième point d'inflexion quant à l'optimisation de la valorisation énergétique des ressources de station d'épuration. L'ajout du paramètre environnemental dans les études technico-économiques reflète une approche plus durable de la planification des projets de production d'énergie. Avec la recrudescence de réglementations prônant l'économie circulaire et les énergies renouvelables, les bilans environnementaux permettent d'obtenir des analyses objectives sur l'impact des procédés.

## **2. Méthodologie de comparaison des procédés de valorisation des boues d'épuration**

L'analyse de cycle de vie (ACV) représente la méthodologie la plus complète pouvant être appliquée dans ce domaine. Le principe de l'ACV repose sur la quantification des flux de matière et d'énergie tout au long du cycle de vie d'un système, autrement dit « du berceau jusqu'au cercueil ». Ces flux sont ensuite traduits en différents impacts environnementaux potentiels : le potentiel de réchauffement climatique, la déplétion des ressources, l'eutrophisation, la toxicité ou encore l'écotoxicité terrestre et aquatique. Dans le cadre de la valorisation énergétique des boues d'épuration, l'étude ACV est souvent utilisée pour comparer l'impact environnemental de différents procédés d'élimination des boues [1] [2] [3]. Les résultats de ces études montrent l'avantage des procédés de valorisation thermique des boues (grâce au pouvoir calorifique des boues) par rapport à leur valorisation chimique et biologique [4], et insistent particulièrement sur l'importance du paramètre d'impact concernant le potentiel de réchauffement climatique [5].

Cette étude s'est focalisée sur l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre engendrées par les étapes de différents procédés de valorisation thermique des boues d'épuration, en se basant sur la méthode du bilan carbone instauré par l'ADEME [6]. Pour ce faire, le logiciel GESTABoues, développé par l'INRAE, a été utilisé. En entrant les données de fonctionnement des différentes étapes de traitement des boues de sa station d'épuration, comme la quantité de boues produites, la consommation énergétique des équipements, la quantité de réactif utilisé, ou encore la distance parcourue par les camion transportant les boues pour être valorisées, l'utilisateur de ce logiciel obtient un bilan détaillé de la quantité de gaz à effet de serre (GES), exprimée en tonne équivalente CO<sub>2</sub>, émise par les différentes étapes de traitement des boues en fonction de l'origine des émissions ou le type de gaz émis.

### **2.1. Périmètre de l'étude**

Dans le cadre de cette étude, le bilan des émissions de gaz à effet de serre s'est porté sur la comparaison de trois procédés de traitement et de valorisation des boues pouvant être établis dans le cas d'une station d'épuration urbaine de grande capacité. A cause du manque de données techniques pour la STEP d'Evry, cette comparaison se restreint au périmètre de la station d'épuration d'Exona. Toutes les données nécessaires à l'établissement de ce bilan ont été récupérées ou extrapolées à partir des rapports techniques mensuels de fonctionnement de la station d'épuration, fournis par le délégataire.

Le premier procédé, dont le schéma de principe est représenté sur la figure 1a, correspond au traitement des boues mis en place actuellement sur la STEP Exona. Après une phase d'épaississement par flottation, les boues sont envoyées dans les digesteurs afin de produire

du biogaz. Ensuite, 85 % des boues sont déshydratées mécaniquement par centrifugation puis compostées sur site avec des déchets verts. L'autre partie des boues est quant à elle déshydratée par filtre presse. Enfin, la totalité des boues est envoyée en épandage agricole. En termes d'émissions évitées, ce procédé, nommé procédé REF par la suite, permet notamment de réduire la part de gaz naturel dans le réseau de gaz grâce à l'injection du biogaz produit par les méthaniseurs ainsi que de réduire les émissions de gaz à effet de serre dû à l'utilisation de fertilisants chimiques pendant l'épandage.

Le deuxième procédé, schématisé sur la figure 1b, considère l'incinération spécifique des boues sur site. Après la phase d'épaississement par flottation et de stabilisation par digestion anaérobie, les boues sont déshydratées à l'aide d'une centrifugeuse avant d'être envoyées dans un incinérateur à lit fluidisé présent dans le périmètre de la station d'épuration afin de produire de la fumée et des cendres. Ces dernières sont ensuite transportées vers un centre d'enfouissement de déchets non dangereux tandis que les fumées sont traitées par voie humide, grâce à un traitement à la soude, avant d'être relâchées dans l'atmosphère. En plus de produire du biogaz qui est directement réinjecté dans le réseau, ce procédé, appelé procédé INCI dans la suite du travail, permet de valoriser les fumées d'incinération par production de chaleur ou par cogénération. Les deux solutions sont comparées en termes d'émissions de GES évitées.

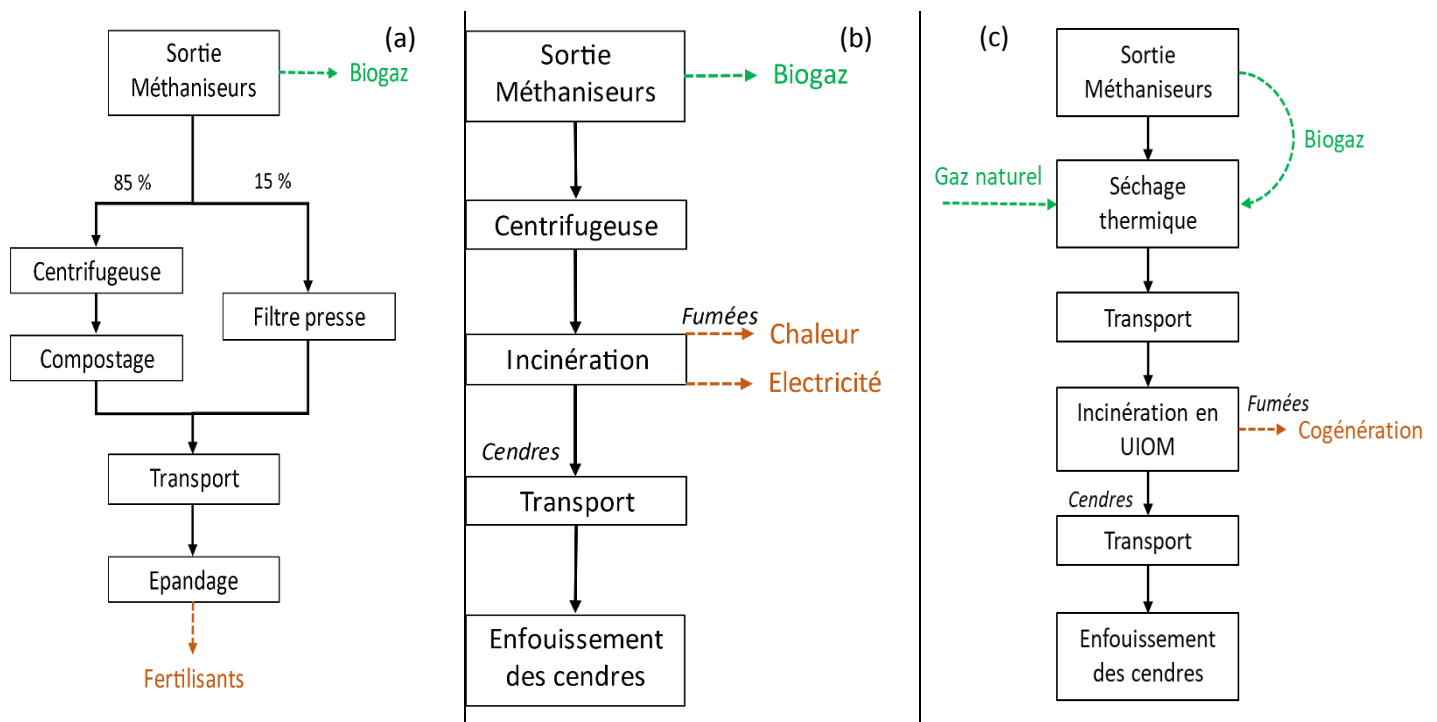


Figure 1 : Représentation schématique des procédés de traitement et de valorisation des boues : a) par compostage et épandage (procédé REF), b) par incinération spécifique (procédé INCI), c) par co-incinération (procédé UIOM)

Le dernier des trois procédés comparés, schématisé sur la figure 1c, correspond à l'envoi des boues sèches dans un centre d'incinération dédié. Après la phase d'épaississement par flottation et de stabilisation par digestion anaérobie, les boues sont déshydratées par centrifugation puis séchées afin d'atteindre une siccité de l'ordre de 90% à l'aide d'un sécheur

thermique. Elles sont ensuite transportées vers un site de co-incinération afin d'être réduites à l'état de cendres en présence d'autres déchets, comme des déchets alimentaires ou des déchets végétaux, pour enfin être transportées vers un centre d'enfouissement de déchets non dangereux. Ce procédé permet de produire du biogaz pendant la digestion anaérobie qui est réinjecté dans le réseau et de valoriser les fumées issues de la co-incinération par cogénération. Pour ce procédé, appelé procédé UIOM par la suite, deux cas de figure sont distingués suivant si le séchage thermique des boues est effectué à l'aide de gaz naturel ou par autoconsommation du biogaz produit sur site.

Ainsi, pour l'ensemble des procédés étudiés dans cette étude, trois gaz à effet de serre sont pris en compte dans le bilan carbone, le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, le méthane CH<sub>4</sub> et l'oxyde nitreux N<sub>2</sub>O. Pour chacune des étapes de traitement des boues, trois différents types d'émissions sont comptabilisés : les émissions directes liées au fonctionnement des processus, les émissions indirectes liées à la fabrication des matériaux ou au transport des boues et des produits chimiques nécessaires au traitement, et les émissions dites évitées liées à la substitution d'une énergie d'origine fossile par une énergie produite par l'un des processus de valorisation énergétique ou la substitution d'engrais chimique par les boues d'épuration dans le cas de l'épandage.

### 3. Résultats et discussion

A partir des données de fonctionnement extraites des rapports techniques mensuels de la station d'épuration Exona, le bilan des émissions de gaz à effet de serre est calculé et présenté dans ce paragraphe. Pour chaque procédé, les bilans sont décomposés suivant les étapes de traitement des boues et l'origine des émissions émises et évitées.

#### 3.1. Procédé REF

La figure 2 présente l'émission de gaz à effet de serre du procédé actuellement mis en place sur la STEP Exona pour chaque étape de traitement des boues. Celui-ci servira de référence pour la suite de l'étude. L'origine des émissions de GES est précisée pour chaque étape de traitement.

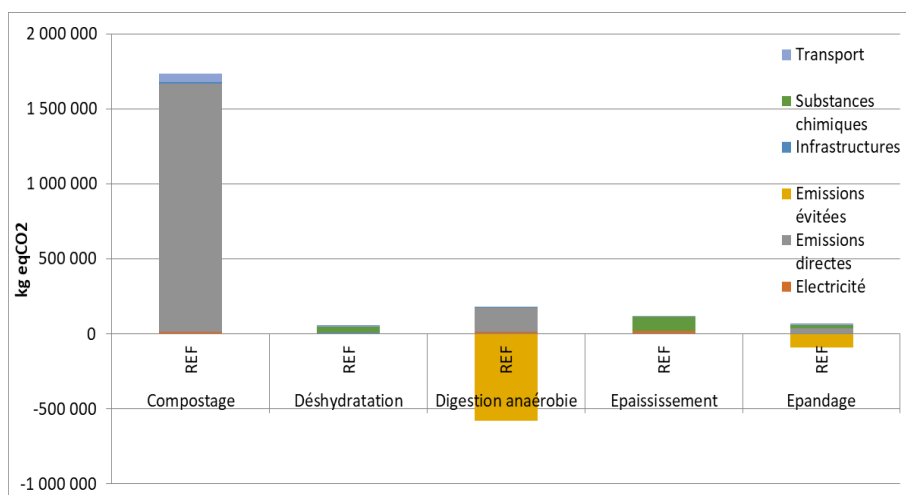


Figure 2 : Emissions de GES pour chaque étape de traitement en fonction des origines d'émission pour le procédé REF

Le compostage représente la plus grande quantité de CO<sub>2</sub> équivalent émise, représentant 1631 t eqCO<sub>2</sub>, avec notamment une grande partie due à des émissions directes de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O. Les étapes d'épaississement et de déshydratation des boues ne sont responsables que d'une faible quantité de GES émise, respectivement 23 t eqCO<sub>2</sub> et 221 t eqCO<sub>2</sub>, avec pour cause principale l'utilisation de substances chimiques. Les principales émissions de GES pour l'épandage des boues sont liées à l'utilisation de substances chimiques et aux émissions directes mais les émissions évitées grâce à la substitution d'engrais chimiques permettent de rendre le processus neutre vis à vis des émissions de GES. La digestion anaérobie permet quant à elle d'avoir une quantité de GES évitées équivalente à 577 t eqCO<sub>2</sub> grâce à la valorisation du biogaz produit, quantité suffisamment importante pour annuler son impact ainsi que ceux de l'épaississement et de la déshydratation.

### 3.2. Procédé INCI

Dans le cas du procédé d'incinération spécifiques des boues sur site, deux types de valorisation énergétique possibles sont comparés. Le premier est la valorisation thermique des fumées d'incinération par récupération de la chaleur pour les besoins internes de l'incinérateur, appelé procédé INCI, alors que le second est la valorisation par cogénération, appelé procédé INCI\_CoG, avec de la récupération de la chaleur pour les besoins internes de l'incinération et l'installation d'une turbine à gaz pour la production d'électricité. La figure 3 présente la comparaison des émissions de GES pour chaque étape de traitement des deux procédés d'incinération spécifique en fonction des origines des émissions. Pour les deux procédés, l'émissions de GES des étapes de déshydratation, de digestion anaérobie et d'épaississement sont négligeables devant les émissions liées à l'incinération des boues. Le cumul des émissions évitées par les étapes de digestion anaérobie et d'incinération représente respectivement 737 t eqCO<sub>2</sub> et 734 t eqCO<sub>2</sub> dans le cas de la valorisation thermique seule des fumées et la cas de la production d'électricité par cogénération. La seule différence notable entre les deux cas de valorisation est la diminution des émissions directes de gaz lors de l'incinération des boues dans le cas de la valorisation par cogénération. Avec le contexte énergétique français pour lequel l'électricité est déjà fortement décarbonée, la valorisation par cogénération ne permet pas d'augmenter la quantité de GES évitée.

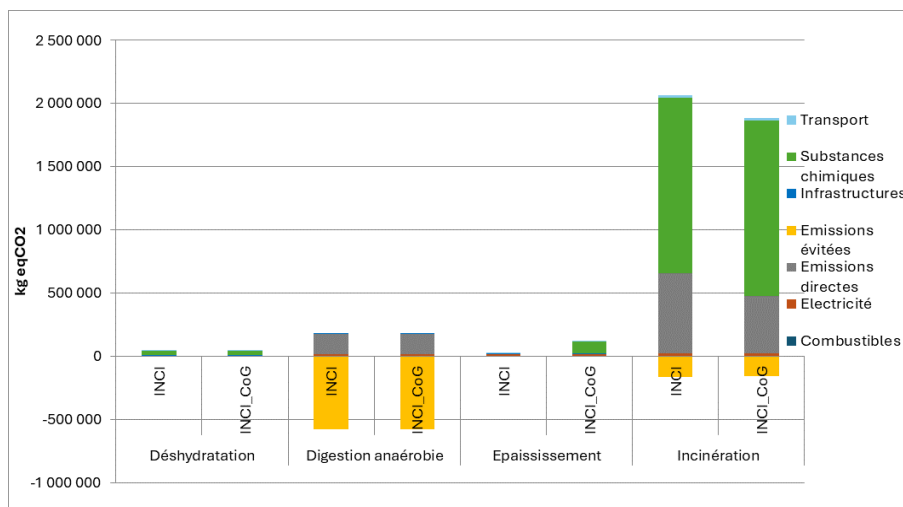


Figure 3 : Emissions de GES pour chaque étape de traitement en fonction des origines d'émission pour les procédés INCI et INCI\_CoG

### 3.3. Procédé UIOM

Ensuite, le procédé consistant à envoyer les boues séchées vers une unité de co-incinération est analysé en considérant lui aussi deux cas de figure. Le premier cas utilise du gaz naturel provenant du réseau gazier à proximité de la STEP afin de sécher thermiquement les boues. Le second, nommé procédé UIOM\_Biogaz, consiste à réutiliser une partie du biogaz produit par l'étape de digestion anaérobie afin de sécher les boues d'épuration. La comparaison entre les deux procédés de co-incinération des boues est présentée sur la figure 4. Alors que la quantité de gaz émise et évitée est la même dans les deux cas pour les étapes de co-incinération, de déshydratation et d'épaississement, les étapes de digestion anaérobie et de séchage diffèrent fortement d'une étude à l'autre. La quantité de GES émise lors du séchage des boues à cause de l'utilisation du gaz naturel, représentant 880 t eqCO<sub>2</sub>, est réduite à 137 t eqCO<sub>2</sub> dans le cas du séchage grâce au biogaz. Quant à la quantité de gaz à effet de serre évitée lors de l'étape de digestion anaérobie, l'autoconsommation du biogaz produit réduit cette valeur de 894 t eqCO<sub>2</sub> à 411 t eqCO<sub>2</sub>. Au global, la balance environnementale, représentant la somme des émissions de gaz à effet de serre émises et évitées, est de 793 t eqCO<sub>2</sub> dans le cas de l'utilisation de gaz naturel pour le séchage des boues, contre 533 t eqCO<sub>2</sub> si le biogaz produit est autoconsommé par le procédé de séchage. L'utilisation du biogaz produit lors de la digestion anaérobie permet de fortement réduire l'impact environnemental du procédé, au détriment d'une valorisation moindre des ressources produites.

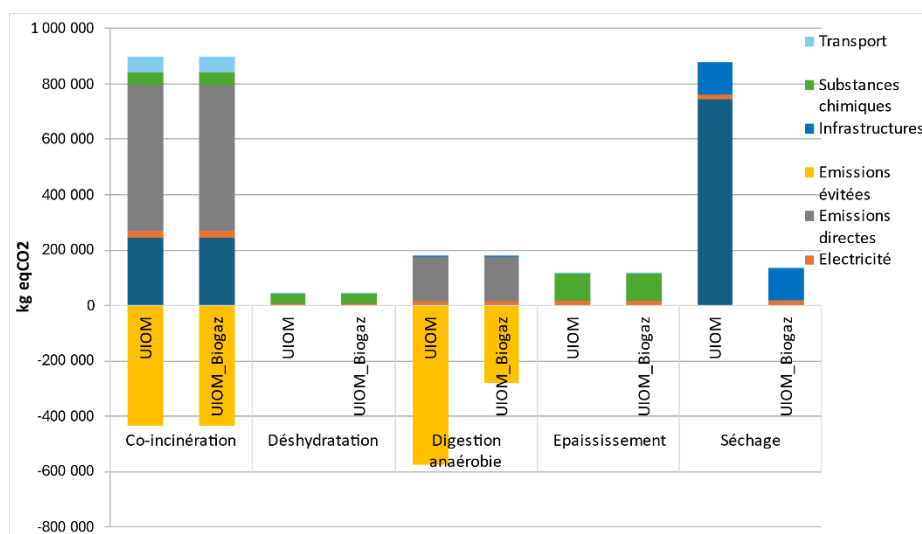


Figure 4 : Emissions de GES pour chaque étape de traitement en fonction des origines d'émission pour les procédés UIOM et UIOM\_Biogaz

### 3.4. Comparaison des procédés

Après avoir analysé individuellement le bilan carbone de chaque procédé, la comparaison des quantités de gaz à effet de serre émise est présentée dans la suite du travail. La figure 5 donne la répartition de la quantité totale de gaz à effet de serre émis selon la nature du gaz

pour chaque procédé étudié précédemment, soit de gauche à droite, l'incinération spécifique des boues avec cogénération, l'incinération des boues avec production d'électricité, l'épandage des boues préalablement compostées, l'envoi des boues en co-incinération avec le séchage des boues par injection de gaz naturel et enfin l'envoi des boues en co-incinération avec le séchage des boues par autoconsommation du biogaz produit sur site. D'un point de vue émissions de GES, le procédé UIOM\_Biogaz présente la plus faible quantité de GES émis, suivi par le procédé UIOM. Les deux cas d'étude de l'incinération spécifique des boues présentent une quantité de gaz à effet de serre émis sensiblement équivalente et le procédé REF émet légèrement plus de GES. Dans le cas des émissions évitées, le procédé UIOM présente la plus grande quantité de GES évitées. Viennent ensuite le procédé INCI, puis les procédés INCI-CoG et UIOM\_Biogaz avec la même quantité de GES évités et enfin le procédé REF.

A partir de ce graphique, il est possible de conclure que tous les procédés de valorisation thermique des boues digérées sont bénéfiques du point de vue émissions de gaz à effet de serre par rapport au procédé actuellement utilisé dans la STEP Exona. L'envoi des boues d'épuration dans un site dédié à leur co-incinération est une solution plus avantageuse que leur incinération spécifique, avec des balances environnementales respectives de + 793 t eqCO<sub>2</sub> et + 1370 t eqCO<sub>2</sub>, surtout si le biogaz produit à partir de la digestion anaérobie peut être réutilisé directement pour sécher les boues ; dans ce cas, la balance environnementale atteint + 533 t eqCO<sub>2</sub>.

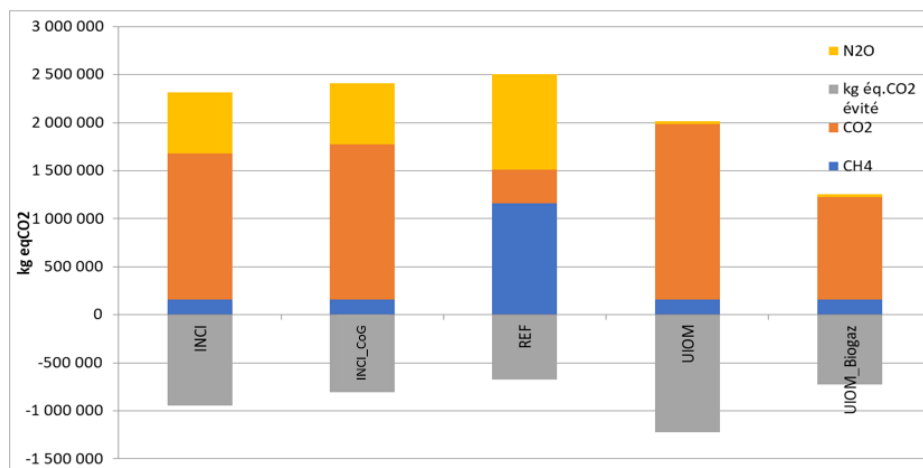


Figure 5 : Répartition des émissions de GES en fonction de la nature du gaz émis pour les différentes solutions de valorisation des boues

#### 4. Conclusions et perspectives

Dans le cadre de la valorisation énergétique du groupement des stations d'épuration Evry-Exona, la comparaison des procédés d'incinération et de co-incinération des boues d'épuration par rapport à leur compostage et envoi en épandage a été réalisée par approche environnementale. Pour ce faire, le choix s'est porté sur la méthode Bilan Carbone, qui permet de comptabiliser les émissions des principaux gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux. Il en résulte que les principaux postes émetteurs de GES sont le compostage pour le procédé référence, l'incinération des boues pour les procédés d'incinération spécifique et de co-incinération, et le séchage thermique pour le cas spécifique de l'utilisation de gaz naturel dans cette étape de traitement. En comparant les bilans de tous

les procédés entre eux, il apparaît que le procédé de co-incinération des boues séchées avec autoconsommation d'une partie du biogaz produit présente la balance environnementale la plus favorable.

La perspective directe de cette étude est sa complétion par l'ajout des facteurs d'impacts environnementaux issus de l'ACV comme la déplétion des ressources, l'eutrophisation, la toxicité, etc. De plus, la prise en compte des données issues de la station d'épuration d'Evry permettrait d'obtenir une étude environnementale complète dans le cadre de la gestion mutualisée de ces deux sites épuratoires.

Avec l'ajout des paramètres énergétiques et économiques, ces résultats permettent d'ouvrir des perspectives quant au développement d'un outil d'aide à la décision du choix des solutions de valorisation énergétique adaptées, en s'appuyant sur une méthode d'optimisation multicritère.

## Références

- [1] Y. Cao, A. Pawlowski, *Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: Evaluating energy and greenhouse gas emissions implication*, Bioresource Technology (2013), 81-91.
- [2] A. Ding, R. Zhang, H.H. Ngo, X. He, J. Ma, J. Nan, G. Li, *Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review*, Science of the Total Environment (2021), 144451.
- [3] C. Gourdet, R. Girault, S. Berthault, M. Richard, J. Tosoni, M. Pradel, *In quest of environmental hotspots of sewage sludge treatment combining anaerobic digestion and mechanical dewatering: A life cycle assessment approach*, Journal of Cleaner Production (2017), 1123-1136.
- [4] N. Mills, P. Pearce, J. Farrow, R.B. Thorpe, N.F. Kirkby, *Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies*, Waste Management (2014), 185-195.
- [5] G. Houillon, O. Jolliet, *Life cycle assessment of process for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis*, Journal of Cleaner Production (2005) 287-299.
- [6] ADEME, *Méthode pour la réalisation des bilans d'émissions de gaz à effet de serre*, Rapport version 5 (2022).