

Possibilités de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées au stockage de déchets

Matthias Staub, Jean-Pierre Gourc

LTHE, Université de Grenoble, BP 53 — 38041 GRENOBLE Cedex

Pour toute correspondance : matthias.staub@hmg.inpg.fr ; gourc@ujf-grenoble.fr

Résumé

Le stockage de déchets non dangereux occasionne la production de gaz issu de la biodégradation des déchets. Ce biogaz est notamment composé de méthane, qui est un puissant gaz à effet de serre (GES). La connaissance des performances environnementales d'une installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND) passe donc par une évaluation des émissions de GES et des potentialités de réduction de ces émissions. L'équivalence entre émissions de méthane et émissions de dioxyde de carbone est préalablement discutée. La valorisation énergétique du biogaz et la comptabilisation des émissions évitées du fait de cette valorisation sont également abordées. Nous montrons la sensibilité des performances environnementales des ISDND à l'efficacité de leur système de captage et de traitement du biogaz. Le stockage de déchets apparaît également comme un moyen de séquestrer d'importantes quantités de carbone fossile et d'éviter ainsi leur émission à l'atmosphère, dans une analyse globale du cycle du carbone. Si le stockage en ISDND n'est pas exempt d'impacts environnementaux, la gestion optimisée d'une telle installation permet clairement de réduire les nuisances, en diminuant de façon importante les émissions de méthane et en le valorisant énergétiquement.

Mots-clés

Stockage de déchets, ISDND, bioréacteur, développement durable, gaz à effet de serre, méthane, valorisation énergétique, cycle du carbone.

I. Introduction

Le cadre de cette étude

Le stockage de déchets non dangereux reste actuellement la principale méthode de traitement des déchets en France (FNADE 2007). De nombreuses recherches ont été menées ces dernières décennies sur l'optimisation du stockage et la minimisation de ses impacts environnementaux dans le contexte de la lutte contre le changement climatique et de forte pression sur les ressources énergétiques. Les émissions de biogaz liées au stockage de déchets sont le principal problème environnemental posé par les sites de stockage.

Dans le cadre de cet article, on se concentrera sur le confinement de couverture, qui permet le captage du biogaz produit par les déchets, avant qu'il ne soit collecté et acheminé vers les installations de traitement et/ou de valorisation énergétique. La couverture d'une ISDND est généralement composite (sol et géosynthétique). Elle doit garder en particulier une fonction d'étanchéité au moins partielle vis-à-vis du biogaz, et ce malgré des tassements importants et hétérogènes des déchets sous-jacents (Gourc 2008). Pour les déchets non dangereux, il est spécifié, dans l'arrêté ministériel consolidé du 9 septembre 1997, qu'on appliquera une couverture semi-perméable permettant une humidification passive des déchets par les eaux de pluie. La tendance actuelle est de s'orienter, comme pour les couvertures d'installations de stockage de déchets spéciaux, vers une couverture étanche avec collecte des biogaz et injection active de lixiviats dans les déchets (installations de type bioréacteur). Nous prendrons en compte ces deux configurations en considérant des émissions diffuses résiduelles de 50 % pour les couvertures semi-perméables et de 10 % pour les couvertures « imperméables », comme expliqué au § 3 (Couturier 2002 ; Ademe 2006 ; Spokas et al. 2006 ; Cepia 2008).

Le biogaz produit par les déchets est composé à 60 % de méthane CH_4 , à 40 % de dioxyde de carbone CO_2 , et de composés en traces (Arigala et al. 1995 ; Reinhart et al. 1997). Le méthane et le dioxyde de carbone sont deux gaz à effet de serre (GES), mais la prise de conscience de l'importance du méthane dans sa contribution à l'effet de serre est récente (Dessus et al. 2008 ; Schmidt 2008). Les effets de ce gaz à faible durée de vie doivent être considérés à un certain horizon temporel pour être comparés aux effets du dioxyde de carbone. L'augmentation très importante de 150 % de la concentration de méthane dans l'atmosphère depuis 1750 doit en tout cas alerter, surtout que sur la même période de temps, les émissions de dioxyde de carbone n'ont augmenté que de 30 % (USEPA 2002 ; Zhang et al. 2008). Le méthane atmosphérique, en absorbant certaines fréquences du rayonnement infrarouge émis par la Terre, se révèle être un GES important, beaucoup plus absorbant que le dioxyde de carbone. Le méthane monte dans la troposphère où il sera en majorité oxydé en dioxyde de carbone en 8 à 9 années. 10 % rejoignent la stratosphère où il sera aussi oxydé (Schmidt 2008).

Nous proposons dans ce qui suit de réfléchir au bilan consolidé des émissions de GES résultant du stockage de déchets, c'est-à-dire au bilan prenant en compte non seulement les émissions de GES, mais aussi leur séquestration et les évitements dus à la production d'énergie sous forme d'électricité et/ou de chaleur. Cette étude poursuit un double objectif : identifier les potentialités de réduction des émissions de GES par l'établissement d'un bilan consolidé, et identifier la sensibilité des performances environnementales aux différentes options de traitement des déchets. Nous allons tout d'abord réfléchir à la prise en compte des différents gaz à effet de serre, puis détailler la méthodologie de notre étude. Nous discuterons ensuite des résultats selon différents scénarios de gestion des déchets.

Avertissement

Cette étude s'intéresse aux émissions issues des installations de stockage de déchets non dangereux en exploitation en France. Elle ne constitue pas une analyse de cycle de vie. Le CO₂ et le CH₄ sont les seuls GES inclus dans les calculs des émissions. Enfin, des éléments de comparaison par rapport à l'incinération des déchets non dangereux seront donnés à titre de repère, même s'il ne s'agit pas là de l'objectif premier de cet article. Les calculs d'émissions issues du traitement des déchets sont souvent entachés d'une certaine incertitude, et les résultats donnés ci-après sont à interpréter avec prudence.

Le potentiel de réchauffement global des gaz à effet de serre

Le stockage de déchets ménagers génère des GES, le CO₂ et le CH₄ principalement (FNADE 2007). Le protoxyde d'azote N₂O n'est pas pris en compte dans la présente étude bien qu'il puisse être présent en faible proportion dans le biogaz ou dans les fumées des unités d'incinération (Ademe 2006 ; FNADE 2007). Pour comparer les GES entre eux, la notion de potentiel de réchauffement global (PRG) a été proposée par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Le PRG d'un GES se définit ainsi par (IPCC 2007 ; USEPA 2002) :

$$PRG(T) = \frac{\int_0^T a_{GES} \cdot C_{GES}(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(t) dt}$$

où :

— T est l'horizon temporel choisi pour calculer le PRG (on retient souvent la valeur de 100 ans pour les calculs),

— a est l'efficacité radiative du gaz (W/m²/ppm),

— C désigne la concentration relative du gaz en fonction du temps.

Le produit de a par C définit le forçage radiatif instantané du gaz, et donne une idée de sa nocivité.

Par définition, le PRG du CO₂ est égal à 1 quel que soit le temps T . Pour tous les autres gaz, le PRG doit être défini pour un horizon temporel T , même si cette information est souvent omise. Ainsi, le PRG du CH₄ vaut 25 pour T égal à 100 ans. Cette valeur est retenue depuis le dernier rapport du GIEC (IPCC 2007), et diffère de la valeur de 21 considérée auparavant, qui n'intégrait pas les effets indirects liés au méthane (IPCC 2001). On parle alors d'équivalent-CO₂ (eq-CO₂) pour toute émission de GES ramenée à une émission d'un kilogramme de CO₂. Ainsi, un kilogramme de méthane sera considéré comme équivalent à 25 kilogrammes d'équivalent-CO₂ (pour T égal à 100 ans). Le PRG du méthane est bien plus fort à court terme, puisqu'il vaut 101 à 5 ans, et 50 à 40 ans par exemple.

Au niveau français, près de 3 millions de tonnes de méthane ont été émises en 2004 (Jancovici 2008). Sur ces émissions, près de 16 % soit 0,5 millions de tonnes, proviennent des sites de stockage de déchets (Jancovici 2008). Les chiffres pour les Etats-Unis sont de 22 millions de tonnes de méthane émises en 2003 (USEPA 2006), dont un quart proviennent des ISDND. Le stockage des déchets est donc un domaine où une réduction significative des émissions aurait un effet concret. Les estimations des émissions de méthane des installations de stockage de déchets au niveau mondial, qui sont difficiles à réaliser en raison de l'absence complète de données pour de nombreux pays, varient entre 2 % et 15 % des émissions totales de GES, avec des estimations récentes situées entre 4 % et 10 % (Spokas et al. 2006 ; Zhang et al. 2008).

On voit clairement l'intérêt d'une réduction des émissions de méthane dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre. Les réflexions qui en découlent sur les stratégies à adopter en vue de la réduction des émissions de GES ont été discutées par d'autres auteurs (Dessus et al. 2008). La prise en compte du méthane par sa valeur de PRG à 100 ans ne doit pas faire oublier que le forçage radiatif instantané de ce gaz, et donc sa nocivité vis-à-vis de l'effet de serre, est très fort à courte échéance. On a donc intérêt à concentrer les actions sur des mesures visant à diminuer les émissions de méthane rapidement (Dessus et al. 2008 ; Schmidt 2008). Dans le cadre d'une meilleure gestion des sites de stockage de déchets, les recherches récentes sur des techniques optimisées, augmentant les taux de captage du biogaz produit, peuvent cibler cet objectif. Une réflexion sur l'intérêt du captage du biogaz dès la phase de stockage devra également être engagée.

2. Méthodologie de l'étude

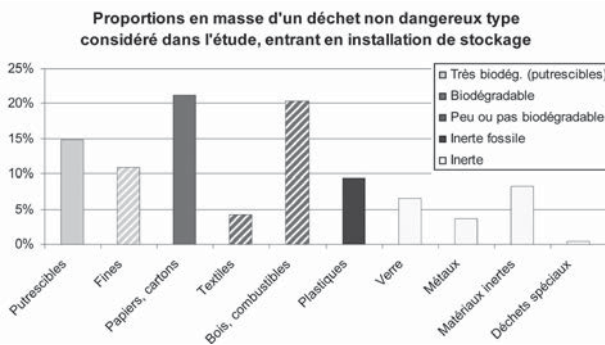
Composition des déchets considérés

Les déchets non dangereux entrant en installation de stockage sont des matériaux hétérogènes qui ont des propriétés physiques et chimiques variables en fonction de leur composition. Cette composition a évolué en fonction

du type de déchets enfouis, de l'évolution des procédés industriels et des modes de vie, et les déchets types entrants en ISDND sont actuellement composés, à part quasi égales, d'ordures ménagères (OM) et de déchets industriels banals (DIB). Nous considérerons donc un mélange d'OM types d'après l'enquête MODECOM™ (Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères ; Ademe 1993) d'une part, et de DIB dont la composition est issue de résultats moyens observés sur site.

Un gisement important de matière biodégradable existe dans les déchets des ménages français, puisque près de 54 % des déchets (masse humide) sont biodégradables d'après l'étude MODECOM™. De leur côté, les déchets industriels banals contiennent davantage de carbone, mais sous forme moins facilement biodégradable (bois, textiles, divers combustibles). Les déchets types ont été supposés avoir une teneur en eau moyenne de 27 % d'après la teneur en eau moyenne de chaque constituant (masse d'eau sur masse humide). Leur composition et leur répartition selon la biodégradabilité des fractions sont données en figure 1.

Figure 1 : Proportions massiques du déchet type entrant en installation de stockage (50 % OM, 50 % DIB, en masse humide). Les fines, textiles et combustibles sont répartis, à parts égales, dans deux catégories.

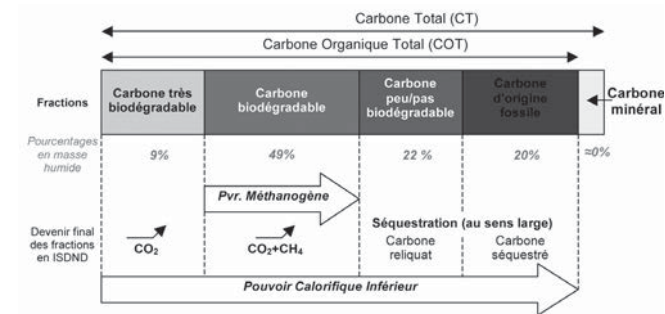


Nous considérerons par la suite, comme indiqué sur la figure 1, que la moitié des particules fines, la moitié des textiles et la moitié des combustibles sont biodégradables. L'autre moitié des fines sera considéré comme relevant de la fraction inerte des déchets, et l'autre moitié des textiles et des combustibles seront considérés comme peu ou pas biodégradables.

Pour l'évaluation de la teneur en carbone des déchets, nous nous sommes basés sur les résultats de l'étude MODECOM™ (Ademe 1993) pour la teneur en carbone total moyenne de chaque composant considéré. La pondération selon les fractions de la Figure 1 donne ainsi une teneur en carbone total (CT) de 242 kg par tonne de déchet humide mixte OM-DIB.

Cette valeur calculée sur la base d'une hypothèse de composition de déchet est très proche de données provenant de déchets stockés : des valeurs de CT voisines de 260 kg par tonne humide ont été considérées dans d'autres études (Gachet 2005 ; Bayard 2008 ; communication personnelle de R. Bayard 2008). Pour les déchets solides, on estime par ailleurs que la teneur en carbone minéral est négligeable, sa forme principale d'hydrates de carbone étant généralement absente des déchets. D'après les proportions du déchet type, 140 kg de carbone très biodégradable ou biodégradable sont ainsi disponibles par tonne humide de déchet. A cela s'ajoutent 54 kg de carbone peu ou pas biodégradable (réfractaire à la biodégradation) et 48 kg de carbone provenant d'une origine fossile.

Figure 2 : Visualisation des fractions du carbone et des pouvoirs méthanogène (pour un déchet destiné à être stocké) et calorifique (pour l'incinération). Représentation d'après CLIP, 1996 et RE.CO.R.D., 2002.



Toute la partie biodégradable du déchet ne contribue pas au pouvoir méthanogène de celui-ci, comme le montre la Figure 2. En effet, deux processus majeurs de biodégradation sont mis en œuvre dans les stockages de déchets : des réactions aérobies (présence d'oxygène de l'air) et des réactions anaérobies (absence d'oxygène). Les premières sont fortement exothermiques et aboutissent à la production de dioxyde de carbone CO₂, alors que les secondes sont endothermiques, nécessitent une teneur en eau minimale et aboutissent à la formation de biogaz composé de dioxyde de carbone CO₂ et de méthane CH₄. On comprend donc bien que les premières auront lieu au moment où les déchets sont encore en contact avec l'atmosphère (avant la mise en place d'une couverture), alors que les secondes auront lieu durant la phase de stockage à proprement parler, lorsque tout l'oxygène disponible au sein du massif de déchets aura été consommé. Le pouvoir méthanogène des déchets est donc compris dans la fraction qui sera dégradée en phase anaérobie (absence d'oxygène), alors que la fraction très biodégradable se dégradera avant la mise en place de la couverture des sites, c'est pourquoi nous ne la comptabiliserons pas dans la fraction méthanogène du déchet. De plus, le carbone organique peu ou pas biodégradable (composé par la moitié des textiles et du bois) et le carbone d'origine fossile (essentiellement présent dans les plastiques) ne sont pas valorisés par la filière stockage, mais seront séquestrés *in situ*.

Comptabilisation des émissions de GES

Le dioxyde de carbone CO_2 et le méthane CH_4 sont les seuls gaz pris en compte ici. Des PRG de 1 et 25 ont respectivement été considérés par le GIEC pour le CO_2 et le CH_4 (IPCC 2007). En plus de cette valeur choisie au niveau international comme référence, nous avons également considéré à titre de comparaison un PRG de 50 pour le CH_4 , qui correspond à un horizon temporel de 40 ans et ainsi à l'ordre de grandeur de la durée de suivi en post-exploitation d'un centre de stockage. Nous nous limiterons à ces deux valeurs ici, bien qu'il soit évidemment possible de considérer des PRG encore plus forts sur de courtes périodes.

La comptabilité généralement adoptée en termes d'émissions est la suivante : le CO_2 biogénique émis (provenant notamment de la phase aérobie de la biodégradation, mais également de la combustion du méthane en torchère) n'est pas comptabilisé dans les émissions de CO_2 . Seul le CO_2 émis à partir du carbone d'origine fossile est comptabilisé. Les émissions de CH_4 sont quant à elles comptabilisées, bien qu'étant issues de la fraction biogénique du carbone, en raison du PRG de ce gaz. Ici, nous distinguons bien les émissions de chaque fraction, mais nous indiquerons également les émissions provenant de carbone d'origine biogénique sur les graphiques. Les émissions de carbone biogénique ne seront toutefois pas reprises dans le bilan consolidé final, afin de faciliter la comparaison avec d'autres études.

La répartition des effluents gazeux en centre de stockage a été considérée sur la base des proportions massiques moyennes du biogaz. Ainsi, un biogaz composé à 60 % de CH_4 et à 40 % de CO_2 (en volume) revient à considérer une proportion massique de 35 % de CH_4 et 65 % de CO_2 . Enfin, l'incinération est supposée produire exclusivement du dioxyde de carbone CO_2 , l'eau vaporisée n'étant pas considérée ici.

3. Résultats sur les émissions brutes de GES selon différents scénarios de captage

Hypothèses de rendements des systèmes de captage et de traitement du biogaz

Nous avons considéré plusieurs scénarios de rendements de captage, selon que l'installation est gérée de façon optimisée ou non (au sens du captage du biogaz). Les rendements de captage considérés pour les calculs, c'est-à-dire la quantité de gaz captés par rapport à la quantité supposée de gaz émis, sont de 50 % pour un site de stockage conventionnel, et de 90 % et 100 % pour les sites optimisés, cette dernière valeur étant considérée comme un objectif. En effet, des rendements de captage de 90 % à 95 % sont

obtenus sur certains sites de stockage français en exploitation (Couturier 2002 ; Ademe 2006 ; Spokas et al. 2006 ; Cepia 2008). Des valeurs guides de 50 % pour un stockage classique, de 70 % pour un stockage « *traditionnel globalement bien exploité* » et de 90 % pour les bio-réacteurs, qui sont des installations de stockage optimisées avec accélération de la biodégradation, ont été choisis par d'autres auteurs (Ademe 2006). Le captage du biogaz en vue de sa valorisation ou de son brûlage dans les ISDND entraîne la combustion de méthane CH_4 pour donner du dioxyde de carbone CO_2 , à PRG plus faible. La combustion du méthane atteint des rendements très élevés proches de 100 % selon les exploitants, valeur considérée ici. L'hypothèse est faite dans un premier temps, dans le cadre de ce paragraphe, que seule une installation de brûlage des gaz par torchère est installée.

Emissions théoriques de GES selon les différentes options de traitement

Les émissions de CO_2 et de CH_4 ont été quantifiées selon les différents scénarios déjà envisagés (cf. supra, traitement dans une ISDND avec captage à efficacité variable du biogaz : 100 %, 90 % et 50 % et comparaison à l'incinération). Notre analyse n'inclut pas les émissions liées au transport de déchets ou d'autres matériaux, et se distingue en ce sens d'une analyse de cycle de vie (ACV). Cependant, les ACV réalisées sur des sites de stockage montrent que c'est principalement la biodégradation qui est émettrice de GES, très loin devant les autres émissions marginales (Camobreco et al. 1999 ; FNADE 2007). La Figure 3 donne les émissions de GES en équivalent- CO_2 selon le PRG du méthane considéré : 25 pour un PRG à 100 ans ou 50 pour un PRG à 40 ans. Les contributions aux émissions du dioxyde de carbone biogénique, du méthane (biogénique) et du dioxyde de carbone fossile sont indiquées. Le Tab 1 donne les résultats numériques de ces calculs.

Figure 3 : Emissions de GES issus du CO_2 et du CH_4 .

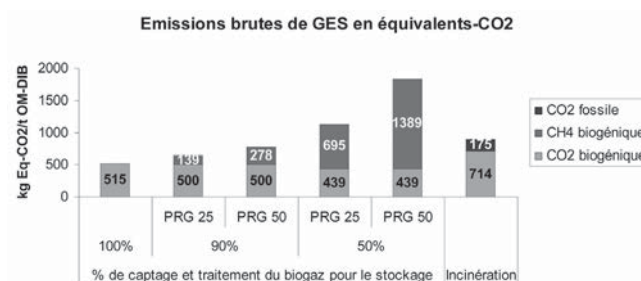


Tableau 1 : Résultats des estimations des émissions selon les différents scénarios.

Efficacité de captage		Fuite à travers la couverture		Emission de CO ₂ biogénique		Emission de CO ₂ fossile		Emissions de CH ₄ (kg eq-CO ₂)	
		kg C	kg CH ₄	kg C	kg CO ₂	kg C	kg CO ₂	PRG 25	PRG 50
Stockage	100 %	0	0	141	515	0	0	0	0
	90 %	12	6	136	500	0	0	139	278
	50 %	59	28	120	439	0	0	695	1389
Incinération		S.O.	S.O.	195	714	48	175	0	0

Nous trouvons des résultats globalement proches de ceux donnés par l'Ademe (mesures réalisées sur des OM et ne prenant pas en compte le CO₂ biogénique), qui avance les chiffres de 250 à 400 kg d'équivalent-CO₂ pour l'incinération, et de 100 à 1000 kg d'équivalent-CO₂ pour le stockage (Ademe 2006).

Nos résultats sont légèrement plus faibles du fait du type de déchet original considéré ici (mélange OM-DIB), qui présente davantage de carbone, mais sous forme moins biodégradable. On aura donc une production de biogaz plus faible avec un mélange OM-DIB qu'avec des OM, et donc globalement moins d'émissions de GES issues des ISDND. Les résultats montrent l'importance d'un système performant de captage, d'acheminement et de traitement du biogaz. Si l'on comptabilise toutes les émissions, le stockage conventionnel émet en effet plus de 2 fois plus de GES que le stockage en ISDND optimisée — voire près de 4 fois plus si l'on considère un PRG de 50. Même sans valorisation énergétique, une torchère brûlant le méthane est donc déjà très efficace pour réduire les émissions de GES. Ce type d'équipement permet donc une nette amélioration de l'impact climatique des sites de stockage. L'efficacité du système de collecte du biogaz est le point clé dans la limitation des émissions de GES, puisqu'une fuite de 10 % sur le site fait apparaître des émissions de CH₄ non négligeables (139 kg d'équivalent-CO₂ par tonne humide si l'on considère un PRG de 25). Enfin, on peut constater que les émissions de GES sont assez comparables pour les incinérateurs et les installations de stockage avec un fort rendement de captage et traitement (90 %). Dans l'hypothèse où la totalité du biogaz est capté, une ISDND pourrait émettre même 40 % de GES en moins qu'un incinérateur. Cette hypothèse ne paraît cependant pas solide sur le long terme, car généralement les flux de gaz ne sont plus suffisants pour rentabiliser un dispositif de valorisation ou de traitement à terme.

Ceci peut être fait par exemple grâce un système de couverture oxydante ou une unité de biofiltration, dont les performances semblent prometteuses (Zeiss 2006, Perdikea et al. 2008). Notons enfin que la convention classique de ne pas comptabiliser les émissions de CO₂ d'origine biogénique fait apparaître une ISDND avec des rendements de captage de 100 % comme absolument neutre en termes d'émissions.

4. Résultats en termes de valorisation énergétique et d'émissions consolidées de GES

Hypothèses relatives à la valorisation énergétique et au rendement des installations de valorisation

La formulation d'un bilan consolidé nécessite la connaissance des émissions évitées du fait de la valorisation énergétique du biogaz ou des déchets. Nous avons considéré un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de 35,6 MJ/Nm³ de méthane pour la méthanisation en ISDND, avec l'hypothèse d'un biogaz composé à 35 % en masse de méthane. Pour la comparaison avec l'incinération, un PCI de 8,63 MJ/kg a été considéré pour les déchets bruts, sur la base des résultats du PCI par fraction de l'étude MODECOM™ (Ademe 1993).

La valorisation énergétique peut se faire soit sous forme d'électricité (génération d'électricité à partir d'une turbine), soit sous forme de chaleur (réseau de chaleur), soit en combinant les deux, pour donner lieu à de la cogénération. Cette dernière option présente de bien meilleurs rendements, et elle est privilégiée lorsqu'elle est possible. Un rendement η de 24 les installations en cogénération, pour tenir compte des aléas d'exploitation (EC 2006 ; FNADE 2007 ; communication personnelle de Ph. Bajart 2008). En cogénération, sur 1 MJ produit, une répartition de 59 %-41 % a été prise pour la production respective d'énergie thermique et électrique en se basant sur des valeurs moyennes considérées pour la cogénération (Ademe 2007). Le biogaz des sites de stockage contenant des impuretés, le rendement a été minoré de 10 % pour calculer la récupération potentielle d'énergie à partir de la dégradation anaérobie.

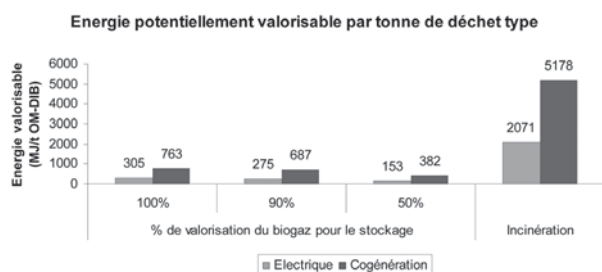
Les calculs sont réalisés dans des hypothèses théoriques de fonctionnement d'installations performantes. Ne sont ainsi pas considérées les installations ne valorisant pas énergétiquement le biogaz des déchets. On gardera à l'esprit qu'en 2004 en France, environ 33 % des volumes de biogaz produits seulement ont fait l'objet d'une valorisation énergétique. Pour la même année, 95 % des déchets incinérés ont été valorisés énergétiquement (FNADE 2007), ce qui peut amener à nuancer les résultats.

Récupération potentielle d'énergie selon les différentes options de traitement

La valorisation énergétique a été évaluée pour les mêmes différentes options de traitement que précédemment, soit le traitement dans une ISDND optimisée avec valorisation du biogaz et l'hypothèse d'une valorisation énergétique de respectivement 100 % et 90 % du biogaz produit, et le traitement dans une ISDND dite « classique », où l'on suppose que seul 50 % du biogaz produit est valorisé.

Rappelons que nous parlons ici d'installation de stockage de déchets de type optimisé au sens du captage du biogaz. L'incinération des déchets est quant à elle considérée à titre de comparaison. La Figure 4 donne les résultats de nos calculs pour ces différents scénarios.

Figure 4 : Energie valorisable avec différents scénarios.



Les déchets sont une ressource potentielle disponible d'énergie renouvelable, et cela d'autant plus que l'installation de captage-valorisation est performante. A titre de comparaison, si l'on considère un rendement égal des installations, une tonne de bois permettrait une valorisation maximale en cogénération de 7 200 MJ/t (Ademe 2008), soit près de 9 fois plus que la méthanisation de déchets, et 40 % de plus que leur incinération. Comme nous l'avons fait remarquer au paragraphe précédent, on constate bien que l'incinération permet une valorisation plus poussée de l'énergie des déchets. Une ISDND optimisée qui capterait l'intégralité du biogaz valoriserait 6,5 fois moins d'énergie qu'une unité d'incinération des ordures ménagères. Pour une ISDND ne valorisant que 50 % de son biogaz, le ratio tombe logiquement à 13. La valorisation énergétique permet d'éviter des émissions de GES qui auraient été nécessaires pour produire la même quantité d'énergie. Ces émissions évitées sont comptabilisées ci-après dans la consolidation du bilan des émissions.

Consolidation du bilan : émissions générées et évitées selon différentes options de traitement

Afin d'effectuer une synthèse complète des émissions pour différentes options de traitement, une consolidation du bilan des émissions incluant les émissions évitées par la production de chaleur et d'électricité s'avère nécessaire. La séquestration de carbone fossile par la filière stockage sera également considérée. Pour ce faire, nous n'avons considéré ici que le cas favorable de la cogénération, avec les mêmes hypothèses précitées. Pour estimer les émissions évitées, nous nous sommes basés sur les données de l'Ademe pour le contexte français. Ces valeurs sont toutefois très différentes selon les auteurs : 560 g eq-CO₂ / kWh_e pour la production d'électricité et 242 g eq-CO₂ / kWh_{th} pour la production de chaleur selon certains auteurs (Ademe 2005 ; RTE-Ademe 2007 ; également reprises par FNADE 2007), mais d'autres auteurs ont utilisé des valeurs nettement différentes : 60 g eq-CO₂/kWh_e et 264 g eq-CO₂/kWh_{th} (EDF 2005 ; Ademe 2006).

Cette différence importante sur le kilowattheure électrique provient du fait que les premiers considèrent un kilowattheure marginal qui correspond aux émissions qu'aurait générées la production d'une unité d'énergie supplémentaire de substitution, les seconds un kilowattheure moyen produit par le parc de production d'électricité français. La première méthode basée sur le kilowattheure marginal est toutefois préconisée pour la prise en compte de la production d'énergie à partir de sources renouvelables, tels les déchets (RTE-Ademe 2007).

Dans un souci d'impartialité, nous présenterons les bilans consolidés avec les deux méthodes. Les résultats de la consolidation des bilans pour un PRG du méthane de 25 sont donnés en Figure 5. Les émissions évitées sont signalées en négatif (séquestration et production d'énergie). Les résultats numériques sont précisés dans le Tableau 2. Les émissions évitées par la séquestration ne concernent que les émissions de CO₂ d'origine fossile.

Figure 5 : Emissions générées et évitées pour différentes options de traitement, pour un PRG du méthane valant 25. Les émissions négatives sont par convention les émissions évitées.

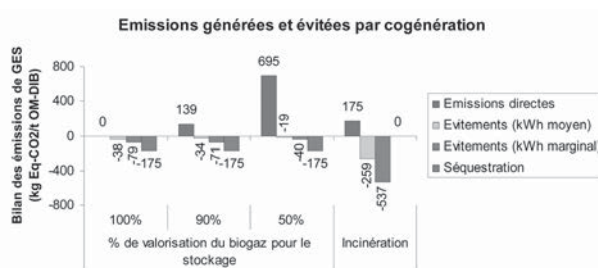


Tableau 2 : Résultats des estimations des postes du bilan consolidé selon les différents scénarios.

Efficacité de captage		Emissions directes selon contribution			Emissions séquestrées		Emissions évitées	
		kg CO ₂ (CO ₂)	kg eq-CO ₂ (CO ₂)	kg eq-CO ₂ (CH ₄) (Total)	kg C	kg eq-CO ₂	kg CO ₂ (base kWh moyen)	kg CO ₂ (base kWh marginal)
Stockage	100 %	0	0	0	-48	-175	-38	-79
	90 %	0	139	139	-48	-175	-34	-71
	50 %	0	695	695	-48	-175	-19	-40
Incinération		175	0	175	0	0	-259	-537

Le stockage de déchets occasionne la séquestration de 175 kg d'équivalent-CO₂ par tonne de déchet OM-DIB, soit un peu moins que les résultats d'autres études sur des OM (286 kg eq-CO₂/t pour des OM dans l'étude FNADE 2007). Ceci s'explique par une plus forte présence de plastiques dans les ordures ménagères. De plus, les émissions évitées par la production d'énergie des sites de stockage ne sont pas négligeables et peuvent atteindre plus du tiers des quantités de carbone évité dans le scénario le plus favorable, sur la base d'un kWh marginal.

On voit ici que les effets de la réduction des émissions de GES et de la production d'énergie se cumulent et deviennent très avantageux en termes de bilan : si le traitement

(brûlage) du biogaz constitue une première étape, la valorisation énergétique permet d'aller plus loin dans le bilan des émissions de GES. Dans ce contexte, le stockage optimisé en bioréacteur, qui permet une concentration de la production de biogaz sur une durée plus courte, est une technique séduisante, car elle augmente ainsi les rendements de production. Elle permet en effet de réunir les conditions nécessaires à un fort taux de captage et de valorisation du biogaz, tout en étant économiquement intéressante à développer pour les exploitants.

Compte tenu de la forte production d'énergie associée à l'incinération des ordures ménagères, cette filière apparaît, au point de vue du bilan consolidé, encore plus performante que le stockage. Pour améliorer davantage le bilan consolidé des émissions, on peut signaler pour finir les projets en cours sur la séquestration du CO₂ issu des sites de stockage ou d'incinérateurs.

Remarquons enfin que selon les hypothèses de comptage du CO₂ que l'on choisit, il est possible de concevoir un bilan net consolidé avec davantage d'émissions évitées que générées à l'atmosphère, ce qui avait déjà été souligné par d'autres auteurs (Couturier 2002). Nous n'avons pas souhaité faire apparaître ces bilans « nets », qui peuvent être mal interprétés. Ces résultats montrent cependant bien que les déchets sont une véritable ressource, mais présupposent un rôle positif de la séquestration qu'on peut remettre en question. Dans son étude, la FNADE (2007) constate des bilans légèrement déficitaires pour le stockage comme pour l'incinération. Cela est dû à la prise en compte dans le parc français des ISDND et des unités d'incinération ayant des taux de valorisation faibles voire nuls, et à des calculs réalisés sur un déchet type différent.

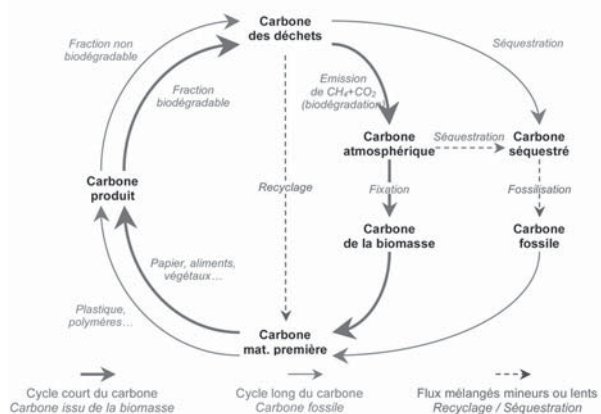
Approche du cycle du carbone des déchets en filière stockage

Pour finir, il paraît pertinent de replacer le stockage des déchets dans le cycle du carbone, classiquement considéré sous sa forme géochimique comme un ensemble de flux entre réservoirs de carbone. A l'échelle biochimique globale, l'atmosphère n'est qu'un petit réservoir de carbone, qui est presque négligeable comparé aux réservoirs terrestre et océanique. Dans le cadre de l'analyse de l'impact anthropique de la gestion des déchets, c'est pourtant l'atmosphère qui concentre toutes les attentions, compte tenu des enjeux actuels sur le réchauffement climatique.

Comme précédemment, nous allons distinguer le carbone d'origine fossile et le carbone provenant de la biomasse. Ces deux origines du carbone donnent naissance à deux cycles imbriqués : un cycle court du carbone provenant de la biomasse, s'opposant au cycle long du carbone fossile. La Figure 6 montre le cycle du carbone pour le stockage de déchets, en séparant les cycles du carbone fossile et du carbone biomasse.

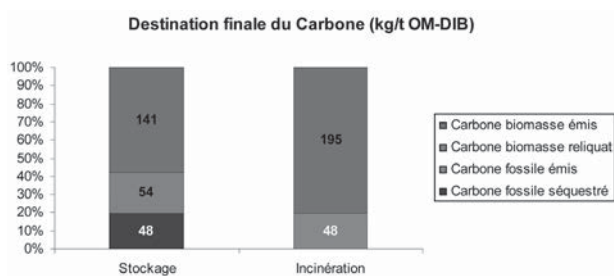
Notons que d'après cette schématisation, le réemploi des matières premières (tri, recyclage) paraît constituer l'objectif le plus souhaitable (Cossu and Piovesan 2007), même si le recyclage ne fait pas l'objet de la présente étude.

Figure 6 : Schématisation des cycles de carbone liés au stockage de déchets.



Le carbone présent dans le biogaz des sites de stockage sous forme de CH₄ et de CO₂ est issu de la biomasse. Il suit un cycle court du carbone, bien distinct du cycle long du carbone fossile. Ce dernier est séquestré *in situ* une fois stocké, jusqu'à ce qu'il soit fossilisé. En ce sens, les sites de stockage constituent un « puits de carbone potentiel » (Cossu and Piovesan 2007), puisqu'ils séquestrent du carbone dans une structure géologique, même s'il s'agit la plupart du temps d'un stockage à la surface de la biosphère. Notons en revanche que la destination du carbone lors de l'incinération est exclusivement l'atmosphère, qu'il s'agisse de carbone issu de la biomasse ou de carbone fossile, la combustion ayant lieu sans distinction. L'incinération occasionne donc un déstockage de matières premières fossiles, ce qui n'est pas le cas pour le stockage de déchets. Le carbone fossile libéré dans l'atmosphère peut ensuite être séquestré à nouveau, par les océans notamment.

Il y a de plus une forme de réversibilité au stockage de déchets au sens du cycle du carbone : le stock de carbone enfoui ne se fossilisera qu'à une échelle des temps géologique, et reste disponible si des techniques rendaient à l'avenir sa réutilisation possible et rentable — ne serait-ce que pour être valorisé énergétiquement. Près de 42 % du carbone initialement présent dans les déchets, dont l'intégralité du carbone d'origine fossile, est ainsi séquestré sur place quel que soit le mode de gestion envisagé pour l'ISDND (voir Figure 7).

Figure 7 : Destination finale du carbone selon les scénarios envisagés.

Au final, un site de stockage ne conserve qu'environ 67 % de la masse initiale, alors que l'incinération occasionne, elle, de l'ordre de 30 % de résidus solides. Donc la réduction en masse et volume de déchets est plus faible avec le stockage. En termes de volume, l'incinération permet de réduire le volume solide de déchets de près de 90 %, alors que pour le stockage, le volume n'est réduit que de 50 % au mieux (effet de la compaction, puis des tassements avec la contrainte, le temps et la biodégradation croissants). Il est évident que ces paramètres peuvent être déterminants dans la stratégie choisie pour le traitement des déchets, surtout pour des territoires densément peuplés, soumis à une forte pression foncière.

Conclusions - Perspectives

Nous avons balayé dans cet article plusieurs aspects liés aux émissions de GES issues du traitement des déchets. Ainsi, avec un captage et un traitement efficaces du biogaz, il est possible de limiter très fortement les émissions en brûlant et/ou en valorisant le méthane. Au niveau énergétique, les déchets stockés représentent une source disponible d'énergie, dont la valorisation peut être couplée à la lutte contre les émissions de GES. Le stockage de déchets permet de valoriser de l'énergie tout en conservant un stock important de carbone éventuellement remobilisable.

Nous avons cependant vu que les performances environnementales étaient sensibles à l'efficacité des systèmes de collecte et de traitement des biogaz sur site. La gestion optimisée d'une ISDND peut permettre d'atteindre un bilan faisant apparaître davantage d'émissions évitées que d'émissions générées, ce qui montre bien que la filière de stockage peut satisfaire à des objectifs de réduction des émissions de GES. Notons toutefois que l'influence du protoxyde d'azote N_2O , non pris en compte ici, mériterait d'être étudiée séparément compte tenu de l'important potentiel de réchauffement global de ce gaz.

Ainsi, si le stockage de déchets n'est pas exempt d'impacts environnementaux, sa gestion optimisée permet de réduire l'impact en agissant sur deux points : la diminution forte des émissions de méthane et la valorisation énergétique du biogaz des déchets. Les sites de stockage optimisés apparaissent comme une stratégie aux performances intéressantes, même en comparaison à l'incinération.

L'enjeu est notamment d'assurer un très bon captage du biogaz, ce qui est d'autant plus possible lorsque sa valorisation est économiquement viable. Le captage et le traitement du biogaz à tous les stades d'exploitation n'est toutefois pas aisé et reste un défi certain pour les gestionnaires, notamment en raison de flux difficiles à connaître et variables dans le temps. Une solution à explorer en ce sens peut être la mise en place, sur le long terme, de dispositifs oxydants de type biofiltre prenant la suite des équipements de valorisation du biogaz, qui permettent de traiter la quasi intégralité du méthane produit sur le long terme.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Benjamin Dessus, auteur de l'article paru dans *La Recherche* de Mars 2008, pour l'échange qu'ils ont pu avoir avec lui sur ce sujet, et pour la communication du détail de ses calculs, ainsi que Philippe Bajeat et Isabelle Hébé de l'Ademe, pour leur relecture critique et leurs remarques, et Rémy Bayard de l'INSA de Lyon, pour les échanges qu'ils ont pu avoir avec lui. Enfin, ils tiennent à remercier Olivier Guichardaz d'*Environnement & Technique* pour ses suggestions et son intérêt pour nos recherches.

Bibliographie

- ADEME (1993). MODECOM™, Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères. Guide de l'ADEME, coll. « Connaître pour agir », 61 p.
- ADEME (2005). Bilan environnemental du chauffage collectif (avec réseau de chaleur) et industriel au bois. Note de synthèse de l'ADEME, Décembre 2005, 19 p.
- ADEME (2006). Evaluation Environnementale des plans d'élimination des déchets. Guide de l'ADEME, coll. « Connaître pour agir », 74 p.
- ADEME (2008). Référentiel Combustible Bois-Energie : les plaquettes forestières. Définition et exigences. Etude de l'ADEME, Avril 2008, 45 p.
- Arigala S. G., Tsotsis T. T., Webster I. A., Yortsos Y. C., Kattapuram J. (1995). Gas Generation, Transport and Extraction in Landfills. *Journal of Environmental Engineering* 121, 33-44.
- Bayard R. (2008). Rapport de tâche ANR PRECODD - Tâche I.I.I : Préparation de la charge et caractérisation bio-physico-chimique. Rapport de Tâche — LGCIE INSA de Lyon, Février 2008, 33 p.
- Camobreco V., Ham R., Barlaz M., Repa E., Felker M., Rousseau C., Rathle J. (1999). Life-cycle inventory of a modern municipal solid waste landfill. *Waste Management and Research* 17, 394-408.

- Cepia S. (2008). Des déchets au gaz naturel. La Recherche 415 (Cahier Spécial « Objectif Terre 2050 »), Janvier 2008, 58-59.
- CLIP (1996). Déchets, Energie, Environnement - Etude prospective du potentiel de déchets mobilisables à des fins énergétiques en France à l'horizon 2020. Les cahiers du CLIP 5, Juillet 1996, 97 p.
- Cossu R., Piovesan E. (2007). Modern Role of Landfill as Geological Sink for Carbon and Other Elements. Proceedings of Sardinia 2007, 11th International Landfill Symposium, October 1st-5th, S. Margarita di Pula, Italy.
- Couturier C. (2002). Améliorer le bilan effet de serre des installation de stockage des déchets. Actes du colloque « Déchets, énergie et changement climatique », AMORCE-ACRR-Energies Cités-Ville de Paris, Paris, France, Décembre 2002.
- Dessus B., Laponche B., Le Treut H. (2008). Effet de serre, n'oublions pas le méthane. La Recherche 417, Mars 2008, 46-49.
- EDF (2005). Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kilowattheure d'usage en France. Note de Janvier 2005, 5 p.
- European Commission (2006). Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. Document de référence "BREF" de la Commission Européenne, Août 2006, 638 p.
- FNADE (2007). Le secteur des déchets ménagers et son rôle dans la lutte contre le changement climatique. Etude Bio Intelligence Service (deuxième édition), 16 p.
- Gourc J.-P. (2008). Several motives to bring the researches on landfill cap covers to the standard of the ones about bottom liners. Keynote Lecture, 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, Shanghai, China, June 2008.
- IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 129-234.
- Jancovici J.-M. (2007). Comment évoluent actuellement les émissions de gaz à effet de serre ? Site web, mise à jour de Septembre 2007, URL : <http://www.manicore.com/documentation/serre/GES.html>
- Perdikea K., Mehrotra A. K., Hettiaratchi J. P.A. (2008). Study of thin biocovers (TBC) for oxidizing uncaptured methane emissions in bioreactor landfills. Waste Management 28, 1364-1374.
- RE.CO.R.D. (2002). Aide à la définition des déchets dits biodégradables, fermentescibles, méthanisables. Etude RE.CO.R.D, 153 p.
- Reinhart, D. R., Townsend, T. G. (1997). Landfill bioreactor design and operation. Lewis, Boca Raton, Florida.
- RTE-ADEME (2007). Le contenu en CO₂ du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique. Note d'Octobre 2007, 7 p.
- Schmidt G. (2008). La fulgurante ascension du méthane. Les Dossiers de la Recherche 31, Mai 2008, 52-59.
- Spokas K., Bogner J., Chanton J. P., Morcet M., Aran C., Graff C., Moreau-Le Golvan Y., Hébé I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? Waste Management 26, 516-525.
- USEPA (2002). Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values. Excerpt from the Inventory of U.S. Greenhouse Emissions and Sinks: 1990-2000, 2002, 16 p.
- USEPA (2006). Methane: Sources and Emissions. Site web, mise à jour d'Octobre 2006, URL : <http://www.epa.gov/methane/sources.html>
- Zeiss C. A. (2006). Accelerated methane oxidation cover system to reduce greenhouse gas emissions from MSW landfills in cold, semi-arid regions. Water, Air and Soil Pollution 176, 285-306.
- Zhang H., He P., Shao L. (2008). Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation. Atmospheric Environment 42, 5579-5588.