

Bilan environnemental des installations de stockage – Réduction des émissions de gaz à effet de serre et valorisation du biogaz : une actualisation nécessaire de la conception des couvertures¹

Jean-Pierre Gourc et Matthias Staub

Le rôle des couvertures des installations de stockage de déchets

Le cadre de l'étude

Le stockage de déchets non dangereux reste actuellement la principale méthode de traitement des déchets en France (FNADE², 2007). Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été menées 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 fluides liées au stockage de déchets sont les principaux problèmes environnementaux posés par les sites de stockage. Les fluides circulant dans les déchets, les lixiviats, menacent les nappes, alors que le biogaz produit lors de la biodégradation peut avoir un impact négatif sur l'atmosphère.

Dans 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. Nous proposons dans ce qui suit de réfléchir au bilan consolidé des émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant du stockage de déchets. Toutefois, cette étude ne constitue pas une analyse de cycle de vie. Elle 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 des installations en fonction du type de couverture et des options de traitement des déchets.

La méthodologie de prise en compte des émissions et du calcul du bilan sera d'abord exposée, avant la discussion des résultats selon différents scénarios de gestion des déchets. 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.

LES COUVERTURES DES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DÉCHETS NON DANGEREUX (ISDND)

La couverture d'une ISDND est généralement composite (sol et géosynthétique). Sa principale fonction est de garantir une étanchéité au moins partielle vis-à-vis du biogaz, et ce malgré des tassements importants et hétérogènes des déchets sous-jacents. Pour les déchets non dangereux fermentescibles, 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 (figure 2a).

Cette couverture semi-perméable a le défaut d'occasionner des apports d'eau assez mal contrôlés dans une zone relativement limitée

1. Ndlr : cet article reprend certains éléments publiés dans le numéro 52 de *Déchets, Sciences & Techniques* (Staub et Gourc, 2008).

2. Fédération nationale des activités de la dépollution et de l'environnement.

Les contacts

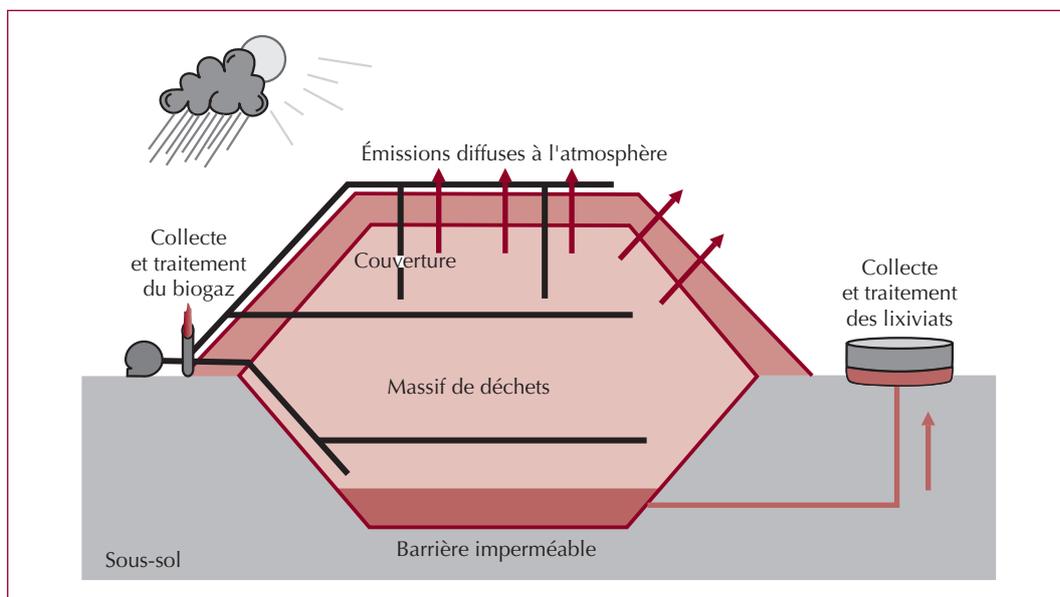
LTHE, Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, Université de Grenoble, BP 53, 38041 Grenoble Cedex.

du massif de déchets. La tendance actuelle est donc de s'orienter, comme pour les couvertures d'installations de stockage de déchets non biodégradables ou spéciaux (figure 2b), vers une couverture étanche, mais avec en plus une collecte des biogaz et injection active de lixiviats dans les déchets (installations de type bioréacteur, figure 2c). Les différents effluents et la structure d'une ISDND sont représentés sur la figure 1 ; la figure 2 présente la structure détaillée des barrières composites d'une ISDND. La photo 1 montre, quant à elle, un dispositif de captage du biogaz sur une installation de stockage de déchets non dangereux.

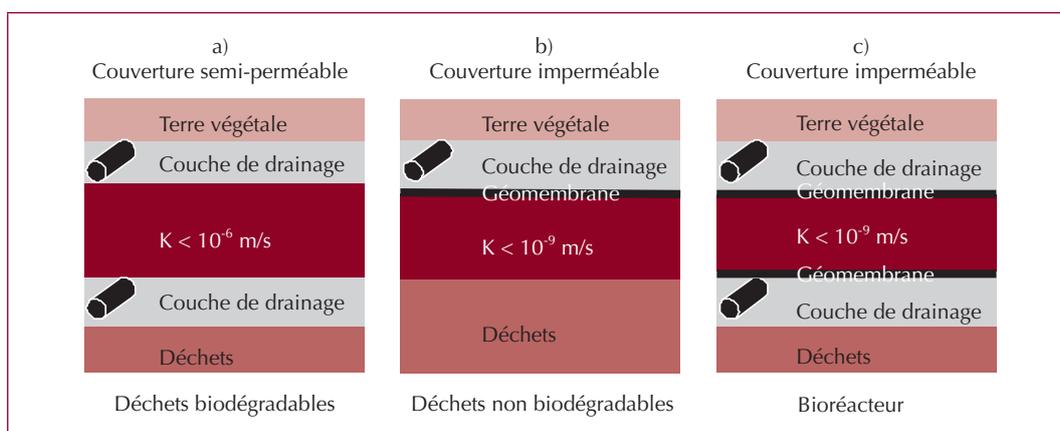
Les sollicitations de la couverture sont multiples : tassements, variation de la teneur en eau de la couverture, de sa température, exposition au cycle du gel-dégel, action du biogaz et même intrusions animales ou végétales. La qualité des matériaux et leur durabilité sont donc des enjeux importants pour la performance environnementale de l'installation.

Dans les calculs d'émissions qui suivent, nous considérerons les deux configurations (couverture semi-perméable et couverture « imperméable ») en considérant des émissions diffuses résiduelles de 50 % pour les couvertures semi-perméables et de 10 % pour les couvertures « imperméables », comme expliqué dans la partie « Résultats sur

► Figure 1 – Schéma d'une installation de stockage de déchets avec traitement des effluents.



► Figure 2 – Schéma de différentes couvertures : barrière pour déchets biodégradables, barrière pour déchets non biodégradables, et possible concept de barrière pour une ISDND de type bioréacteur.



les émissions brutes de GES selon différents scénarios de captage » (Couturier, 2002 ; Ademe³, 2006 ; Spokas *et al.*, 2006 ; Cepia, 2008 ; Staub et Gourc, 2008).

Le problème du méthane dans le contexte du réchauffement global

Le biogaz de décharge 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 protoxyde d'azote N_2O 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. Le méthane et le dioxyde de carbone sont deux gaz à effet de serre, 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, d'autant que sur la même période de temps, les émissions de dioxyde de carbone n'ont augmenté que de 30 % (USEPA⁴, 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 huit à neuf années ; 10 % rejoignent la stratosphère où il sera aussi oxydé (Schmidt, 2008).

Sur la base d'un calcul du pouvoir de réchauffement global (PRG) du méthane, on peut estimer qu'une tonne de ce gaz est équivalente à 25 tonnes d'équivalents- CO_2 si l'on se place à un horizon temporel de 100 ans⁵ (IPCC⁶, 2007 ; Dessus *et al.*, 2008 ; Staub et Gourc, 2008). Nous considérerons cette valeur de 25 dans les calculs, tout en comparant les résultats avec un PRG de 50 (horizon temporel $T = 40$ ans) qui donne la mesure des effets cumulatifs du méthane sur une durée plus proche des durées d'exploitation des ISDND (Staub et Gourc, 2008).

Au niveau français, près de trois millions de tonnes de méthane ont été émises en 2004 (Jancovici, 2007 ; figure 3). Sur ces émissions, près de 16 %, soit 0,5 millions de tonnes, proviennent



▲ Photo 1 – Dispositif de captage du biogaz sur une installation de stockage de déchets (source : J.-P. Gourc).

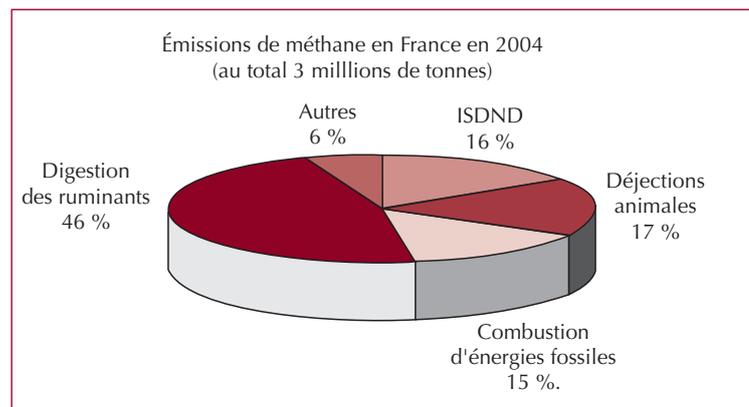


Figure 3 – Répartition des émissions de méthane en France selon les secteurs, d'après Jancovici (2007).

3. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

4. *United States Environmental Protection Agency*.

5. Par définition, le PRG du CO_2 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 . Ainsi, le PRG du CH_4 vaut 25 pour T égal à 100 ans. Cette valeur est retenue depuis le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (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- CO_2 (eq- CO_2) pour toute émission de GES ramenée à une émission d'un kilogramme de CO_2 . Ainsi, un kilogramme de méthane sera considéré comme équivalent à 25 kilogrammes d'équivalent- CO_2 (pour T égal à 100 ans), mais 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.

6. *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

des sites de stockage de déchets (Jancovici, 2007). Les chiffres pour les États-Unis sont de 22 millions de tonnes de méthane émises en 2003, dont un quart proviennent des ISDND (USEPA, 2006). 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). Les émissions mondiales de méthane en 2007 sont en dessous de la barre de 1 % des émissions massiques globales de GES, mais elles sont responsables de 17 % des émissions si l'on raisonne en équivalents- CO_2 , sur la base d'un PRG de 25 (figure 4).

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.

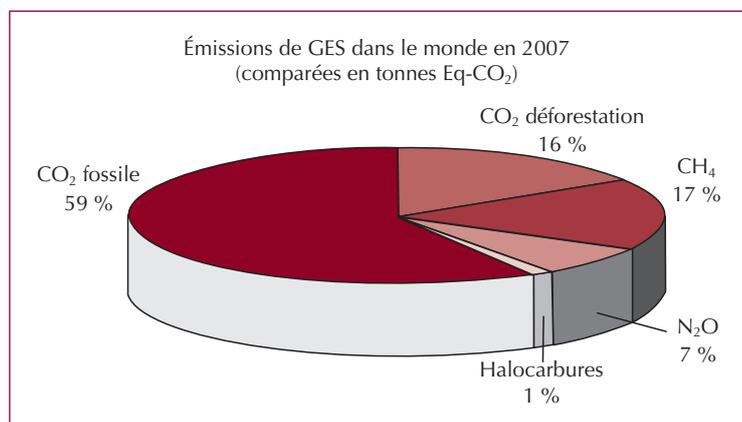
Méthodologie de l'étude

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 de l'économie 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 MODECOMTM 7 (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 MODECOMTM. De leur côté, les déchets industriels banals contiennent davantage de carbone, mais sous forme moins facilement biodégradable (bois, textiles, divers combustibles).

Pour l'évaluation de la teneur en carbone des déchets, nous nous sommes basés sur les résultats de l'étude MODECOMTM (Ademe, 1993) pour la teneur en carbone total moyenne de chaque composant considéré. La pondération selon les fractions d'un déchet-type de mélange OM-DIB donne ainsi une teneur en carbone total (CT) de 242 kg par tonne humide. 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 (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. Cent-quarante kilogrammes de carbone très biodégradable ou biodégradable sont disponibles par tonne humide de déchet-type, auxquels s'ajoutent 54 kg de carbone peu ou pas biodégradable (réfractaire à

7. Méthode de caractérisation des ordures ménagères.



▲ Figure 4 – Répartition des émissions de GES globales en 2007, d'après Jancovici (2007). Pour les équivalents en CO_2 , les valeurs de PRG sont prises à 100 ans : $\text{PRG}(\text{CH}_4) = 25$, $\text{PRG}(\text{N}_2\text{O}) = 238$, $\text{PRG}(\text{halocarbures}) = 15\,000$ (moyenne effectuée sur plusieurs composés).

la biodégradation) et 48 kg de carbone provenant d'une origine fossile.

Toute la partie biodégradable du déchet ne contribue pas au pouvoir méthanogène de celui-ci, comme le montre la figure 5. 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 CO_2 , alors que les secondes sont endothermiques, nécessitent une teneur en eau minimale et aboutissent à la formation de biogaz composé de dioxyde de carbone CO_2 et de méthane CH_4 . On comprend donc bien que les réactions aérobies 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

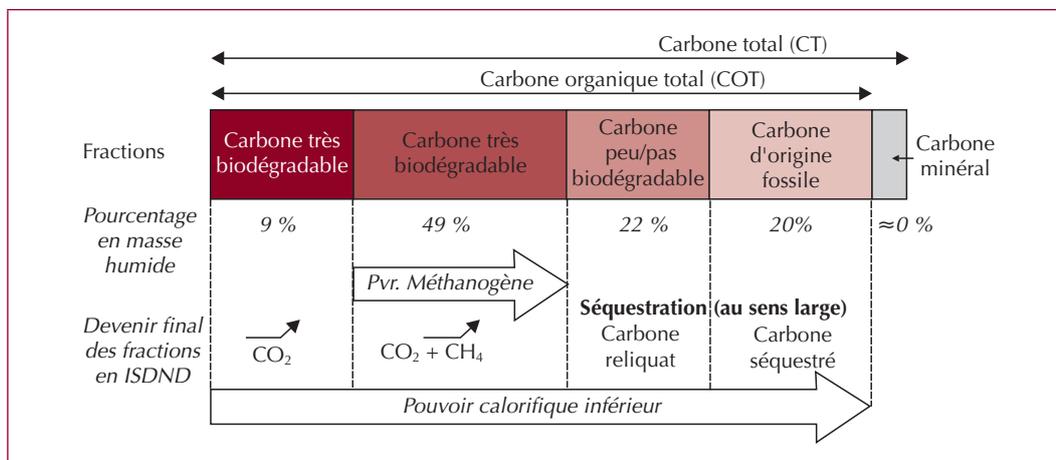
Le dioxyde de carbone CO_2 et le méthane CH_4 sont les seuls gaz pris en compte ici. Des PRG de 1 et 25 ont respectivement été considérés par le GIEC⁸ pour le CO_2 et le CH_4 (IPCC, 2007). En plus de cette valeur choisie au niveau international comme référence, nous avons également considéré, à titre 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 d'origine 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 distinguerons bien les émissions de chaque fraction, mais les émissions provenant de carbone d'origine biogénique seront données sur les graphiques. Les émissions de carbone biogénique ne seront toutefois pas reprises dans le bilan consolidé final pour 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,

8. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

9. Club d'ingénierie prospective énergie et environnement.



◀ Figure 5 – Visualisation des fractions du carbone et des pouvoirs méthanogène (pour un déchet destiné à être stocké) et calorifique (pour l'incinération), représentation d'après CLIP⁹ (1996) et RE.CO.R.D. (2002).

un biogaz composé à 60 % de CH₄ et à 40 % de CO₂ (en volume) revient à considérer une proportion massique de 35 % de CH₄ et 65 % de CO₂. Enfin, l'incinération est supposée produire exclusivement du dioxyde de carbone CO₂, l'eau vaporisée n'étant pas considérée ici.

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

Hypothèses de gestion des sites

Nous avons considéré plusieurs scénarii de rendements de captage, selon le type de couverture installée sur le site. 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 avec couverture semi-perméable, et de 90 % et 100 % pour les sites optimisés avec barrière « imperméable », 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 bioréacteurs, qui sont des installations de stockage optimisées avec accélération de la biodégradation, ont été choisies 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 CH₄ pour donner du dioxyde de

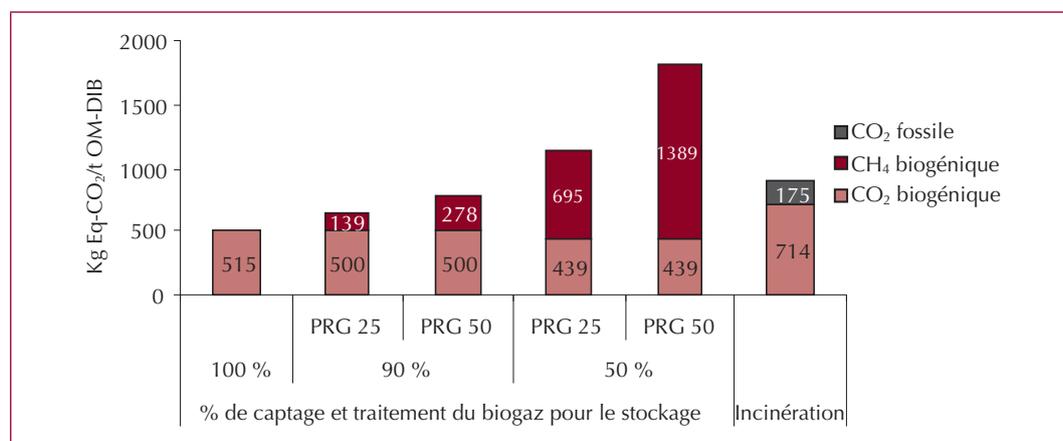
carbone CO₂, à PRG plus faible. La combustion du méthane atteint des rendements très élevés, proches de 100 % selon les exploitants, valeur considérée ici. L'hypothèse est faite dans un premier temps, dans le cadre de ce paragraphe, que seule une installation de brûlage des gaz par torchère est installée.

Émissions théoriques de GES selon les différentes options de traitement

Les émissions de CO₂ et de CH₄ 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 (FNADE, 2007). La figure 6 donne les émissions de GES en équivalent-CO₂ 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 données. Le tableau 1 donne les résultats numériques de ces calculs.

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 1 000 kg d'équivalent-CO₂ pour le stockage

► Figure 6 – Émissions de GES issus du CO₂ et du CH₄ pour un PRG du CH₄ de 25 et 50.



(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 la sensibilité de la performance environnementale des sites en fonction du choix de la couverture. Toutes émissions comptabilisées, le stockage conventionnel avec une couverture semi-perméable émet en effet plus de deux fois plus de GES que le stockage en ISDND avec une couverture « imperméable » – voire près de quatre fois plus si l'on considère un PRG de 50.

Même sans valorisation énergétique, le captage du gaz en vue d'un brûlage du méthane en torche est donc déjà très efficace pour réduire les émissions de GES. L'efficacité du dispositif de couverture 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 terme d'émissions.

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 % a été considéré pour les installations de simple conversion électrique, et de 60 % pour les installations en cogénération, pour tenir compte des aléas d'exploitation (EC¹⁰, 2006 ; FNADE, 2007 ; communication personnelle de Ph. Bajeat, 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

10. *European commission.*

Efficacité de captage		Fuite à travers la couverture		Émission de CO ₂ biogénique		Émission de CO ₂ fossile		Émissions 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

◀ Tableau 1 – Résultats des estimations des émissions selon les différents scénarios.

pour la cogénération (Ademe, 2008). 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. Ainsi, ne sont 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 optimisée au sens du captage du biogaz ; l'incinération des déchets est quant à elle considérée à titre de comparaison. La figure 7 donne les résultats de nos calculs pour ces 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. À titre de comparaison, si l'on considère un rendement égal des installations,

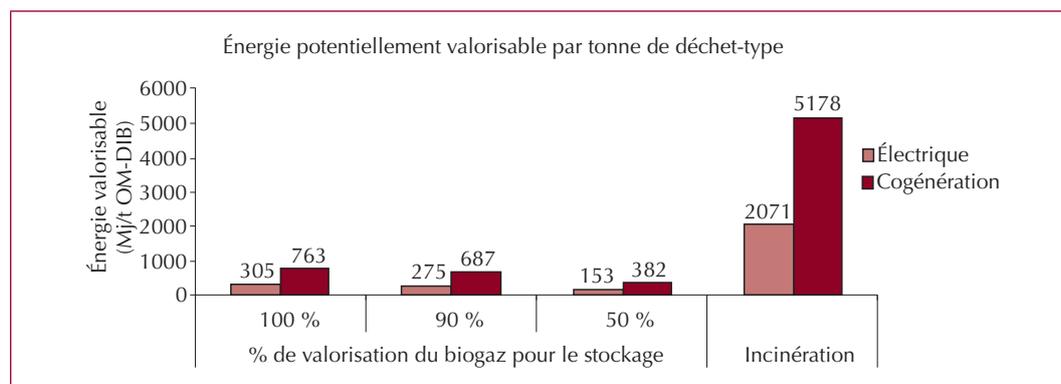
une tonne de bois permettrait une valorisation maximale en cogénération de 7 200 MJ/t (Ademe, 2008), soit près de neuf fois plus que la méthanisation d'ordures ménagères, et 40 % de plus que leur incinération. Comme nous l'avions fait remarquer précédemment, on constate bien que l'incinération permet 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 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 ; RTE¹¹-Ademe, 2007 ; également reprises par FNADE, 2007), mais

11. Réseau de transport d'électricité.

► Figure 7 – Énergie valorisable avec différents scénarios.



d'autres auteurs ont utilisé des valeurs nettement différentes : 60 g eq-CO₂/kWh_e et 264 g eq-CO₂/kWh_{th} (EDF¹², 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 sur la figure 8. Les émissions évitées sont signalées en négatif (séquestration et production d'énergie). Les résultats numériques sont précisés dans le

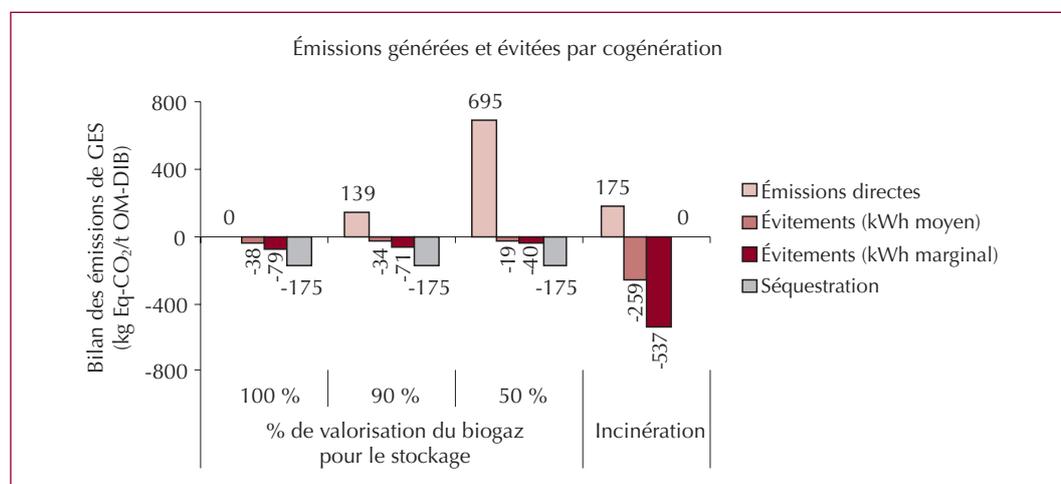
tableau 2. Les émissions évitées par la séquestration ne concernent que les émissions de CO₂ d'origine fossile.

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 terme 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

12. Électricité de France.

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

Efficacité de captage		Émissions directes selon contribution			Émissions séquestrées		Émissions évitées kg CO ₂	
		kg CO ₂ (CO ₂)	kg eq-CO ₂ (CH ₄)	kg eq-CO ₂ (Total)	kg C	kg eq-CO ₂	(base kWh moyen)	(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



◀ Figure 8 – Émissions générées et évitées pour différentes options de traitement, pour un PRG du méthane valant 25. L'hypothèse est faite d'une valorisation énergétique par cogénération.

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 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.

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 permet 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 des objectifs de réduction des émissions de GES. Notons toutefois que l'influence du protoxyde d'azote N₂O, 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 ne sont toutefois pas aisés ; cela 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 biofiltres 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'INSA¹³ 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 de son intérêt pour nos recherches.

13. Institut national des sciences appliquées.

Résumé

Le stockage de déchets est une des applications communes des géosynthétiques en génie de l'environnement. Les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) occasionnent des émissions de biogaz, ce dernier étant composé de méthane, un puissant gaz à effet de serre (GES). Un bilan des émissions de GES d'une installation de stockage de déchets non dangereux est proposé selon différents scénarios de gestion et les types de couvertures employées (semi-perméable, imperméable). La valorisation énergétique du biogaz est également abordée. L'étude fait apparaître la sensibilité des performances environnementales des ISDND au type de couverture et à la performance du système de traitement du biogaz.

Abstract

Solid Waste landfilling is a common application of Geosynthetics in geo-environmental engineering. Non-hazardous waste Landfills are responsible for Methane emissions, a Greenhouse Gas (GHG) with high Global Warming Potential naturally present in the biogas. An evaluation of Greenhouse Gas emissions from landfills depending on the way they are operated and on the cap cover characteristics (semi-permeable, impermeable) is presented. Energy recovery from biogas is also discussed. The sensitivity of the environmental performance of landfills on the cover characteristics as well as on the biogas collection and recovery system is highlighted.

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, 19 p.
- ADEME, 2006, *Évaluation environnementale des plans d'élimination des déchets*, Guide de l'ADEME, coll. « Connaître pour agir », 74 p.
- ADEME, 2008, *Référentiel combustible bois-énergie : les plaquettes forestières. Définition et exigences*, Étude de l'ADEME, 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*, n° 121, p. 33-44.
- BAYARD, R., 2008, *Rapport de tâche ANR PRECODD – Tâche 1.1.1 : Préparation de la charge et caractérisation bio-physico-chimique*, Rapport de tâche, LGCIE INSA de Lyon, 33 p.
- CEPIA, S., 2008, Des déchets au gaz naturel, *La Recherche*, n° 415 (cahier spécial « Objectif Terre 2050 »), p. 58-59.
- CLIP, 1996, Déchets, Énergie, Environnement – Étude prospective du potentiel de déchets mobilisables à des fins énergétiques en France à l'horizon 2020, *Les cahiers du CLIP*, 97 p.
- 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-Énergies Cités-Ville de Paris, décembre 2002.
- DESSUS, B., LAPONCHE, B., LE TREUT, H., 2008, Effet de serre, n'oublions pas le méthane, *La Recherche*, n° 417, p. 46-49.

- EDF, 2005, *Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kilowattheure d'usage en France*, 5 p.
- EUROPEAN COMMISSION, 2006, *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*, Document de référence "BREF" de la Commission Européenne, 638 p.
- FNADÉ, 2007, *Le secteur des déchets ménagers et son rôle dans la lutte contre le changement climatique*, Étude 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.
- IPCC, 2001, *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 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, p. 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*, n° 28, p. 1364-1374.
- RE.CO.R.D., 2002, *Aide à la définition des déchets dits biodégradables, fermentescibles, méthanisables*, Étude 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*, 7 p.
- SCHMIDT, G., 2008, La fulgurante ascension du méthane, *Les Dossiers de la Recherche*, n° 31, p. 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*, n° 26, p. 516-525.
- STAUB, M., GOURC, J.-P., 2008, Possibilités de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées au stockage de déchets, *Déchets, Sciences & Techniques*, n° 52, p. 8-16.
- USEPA, 2002, *Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values. Excerpt from the Inventory of U.S. Greenhouse Emissions and Sinks: 1990-2000*, 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*, n° 176, p. 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*, n° 42, p. 5579-5588.