

# STRATÉGIE DE COUVERTURE DES ISDND ET COMPTABILISATION DES ÉMISSIONS DIFFUSES

## LANDFILL CAP COVER STRATEGY AND ACCOUNTING OF DIFFUSE EMISSIONS

Jean-Pierre GOURC, Giorgia MARCOLINA, Matthias STAUB  
*LTHE, Université Joseph Fourier – Grenoble, France*

**RÉSUMÉ** - Les émissions de méthane issues des ISDND sont conditionnées par les modalités de stockage des déchets et par le type de barrière de couverture associé. Un nouvel outil informatique, permettant la prise en compte du scénario de stockage et de paramètres fonctionnels simples, est proposé. Son application à une alvéole est présentée, avec une comptabilisation des émissions diffuses pendant l'exploitation et la post-exploitation.

**Mots-clés** : ISDND, gaz à effet de serre, barrière de couverture, déchet biodégradable, équivalent CO<sub>2</sub>.

**ABSTRACT** - Landfill methane emissions are governed by the disposal conditions and by the type of installed cap cover. A new computer tool is proposed to take into account the disposal scenario as well as simple functional parameters of the landfill. The tool is applied at the scale of a landfill cell, and the assessment of diffuse emissions during operation and aftercare is presented.

**Keywords**: Landfill, greenhouse gas, cap cover, biodegradable waste, CO<sub>2</sub>-equivalent.

### 1.Introduction

L'organisation météorologique mondiale vient de retirer la sonnette d'alarme : en dépit de la crise économique, les principaux gaz à effet de serre ont atteint en 2009 leurs plus hauts niveaux jamais observés depuis l'époque pré-industrielle. La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de presque 2% par an depuis 10 ans, la concentration de méthane, quant à elle, est restée stable de 1999 à 2006 pour augmenter de nouveau entre 2007 et 2009. Une des raisons en serait le réchauffement de l'Arctique. Les Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) n'en restent pas moins, avec l'élevage des ovins et bovins, l'une des sources essentielles des émissions de méthane, ce puissant gaz à effet de serre.

L'« Intergovernmental Panel on Climate Change » (IPCC, 2007) a introduit la notion de potentiel global de réchauffement. Avec ce barème, le méthane est 25 fois plus efficient que le dioxyde de carbone (Gourc et Staub, 2009 ; Staub et Gourc, 2009) : 1kg de méthane est donc compté comme 25 kg « équivalent CO<sub>2</sub> ». Or le biogaz produit par les déchets organiques en phase de méthanogénèse est composé en général de 60% de méthane et de 40% de dioxyde de carbone (une moyenne 50% et 50% sera prise pour les calculs présentés ici). Mais si l'on suit les règles de l'IPCC, le dioxyde de carbone émis par des sources biogéniques ne doit pas être pris en compte dans le calcul des émissions. Dans le cas des ISDND, les émissions de CO<sub>2</sub> correspondent, en plus de la phase de méthanogénèse, à la phase initiale aérobie et aux biogaz brûlés à la torchère. Donc, par la suite, seules les émissions de méthane seront comptabilisées (en équivalent CO<sub>2</sub>).

Dans ce contexte, la barrière de couverture des alvéoles d'une ISDND a donc un rôle primordial dans la limitation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Mais les recherches sur cette barrière sont étonnamment moins développées que celles sur les barrières de fond de ces mêmes alvéoles. Le problème est complexe car, comme il sera montré ci-dessous, la conception de cette barrière devra être adaptée à l'évolution du déchet au cours du temps.

Cette communication présente :

- les stratégies possibles en termes de limitation des émissions de méthane, en tenant compte de l'évolution au cours du temps du déchet stocké ;
- les modalités de comptabilisation des émissions. Un logiciel (« IMAGE ») a été élaboré, dont les bases sont présentées ici, permettant à un exploitant d'ISDND, de présenter, après calage sur le court terme, un bilan des émissions sur la durée de vie totale, en fonction de la solution technique choisie pour la collecte des biogaz.

Cette étude n'est pas une Analyse du Cycle de Vie (ACV) de la barrière de couverture, car une ACV prendrait en compte l'impact environnemental complet, y compris la fabrication (géosynthétique...), la mise en œuvre (transport, compactage des sols...) des matériaux constitutifs, le suivi du site...

## 2. La production de biogaz

La production de biogaz est la conséquence de la biodégradation de la fraction organique des déchets, due à des bactéries et autres micro-organismes actifs en aérobie ou anaérobie, en conditions humides et dans une certaine gamme de température. Cette dégradation comprend plusieurs phases, mais nous ne considérerons ici que la plus importante pour la génération du biogaz (phase IV de méthanogénèse). Elle sera supposée démarrer au temps  $t_{OB}$  après mise en place du déchet ( $t=0$ ).

Le modèle SWANA (Solid Waste Association of North America) est utilisé ici pour décrire la production de gaz en fonction du temps (Camobreco et al., 1999) : soit  $Y(t)$  le flux de méthane en  $Nm^3$ /heure et  $Q$  le volume cumulé en  $Nm^3$ , les deux paramètres correspondant à une tonne de masse sèche de déchet (Fig.1) :

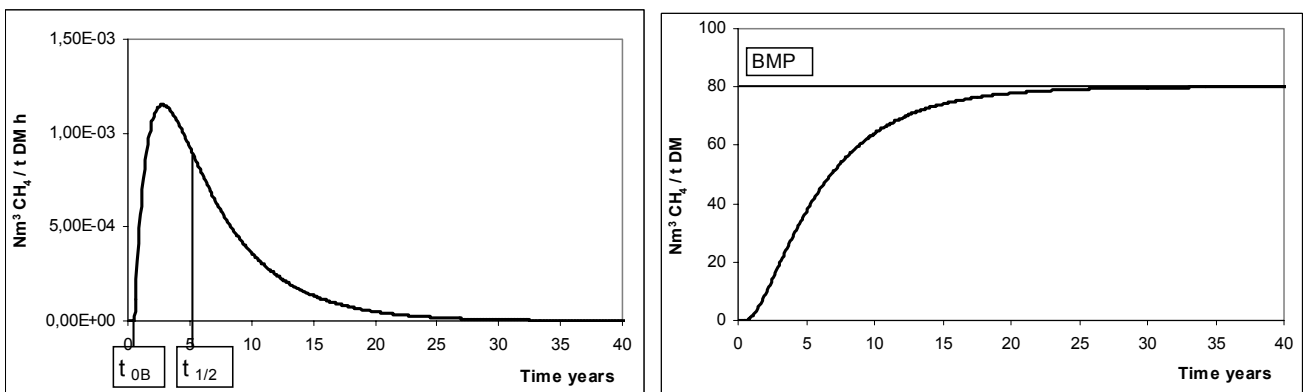


Figure 1: Flux instantané  $Y(t)$  et cumulé  $Q(t)$  de méthane pour un déchet type enfoui en ISDND.

$$Y(t) = \text{BMP} \cdot k \cdot e^{-k(t-t_{OB})} \cdot \frac{k+s}{s} \cdot \left(1 - e^{-s(t-t_{OB})}\right) \quad (1)$$

Le BMP (Potentiel Biométhane) correspond à la production de méthane maximale correspondant à la biodégradation complète du déchet. Ce paramètre est important. Il peut être obtenu à partir d'un test de biodégradation in vitro sur échantillon prélevé ou estimé à partir de la composition du déchet (proportion massique  $\mu_j$  sèche du composant  $j$ ) et du  $\text{BMP}_j$  tabulé pour chaque composant  $j$  du déchet ( $n$  composants) :

$$\text{BMP} = \sum_{j=1}^n \text{BMP}_j \cdot \mu_j \quad (2)$$

Dans l'exemple numérique traité ci-dessous, nous avons considéré un déchet représentatif de celui stocké en ISDND, correspondant à un mélange de 50% de déchet ménager et de 50% de déchet industriel banal (Figure 2). À noter que les composants putrescibles (très rapidement biodégradables) sont supposés avoir un  $\text{BMP}_j$  nul, leur dégradation étant rapide et aérobie (production uniquement de  $\text{CO}_2$ ). Le BMP résultant pour ce déchet, calculé à partir de (2), est égal à  $80 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$  /tonne déchet sec.

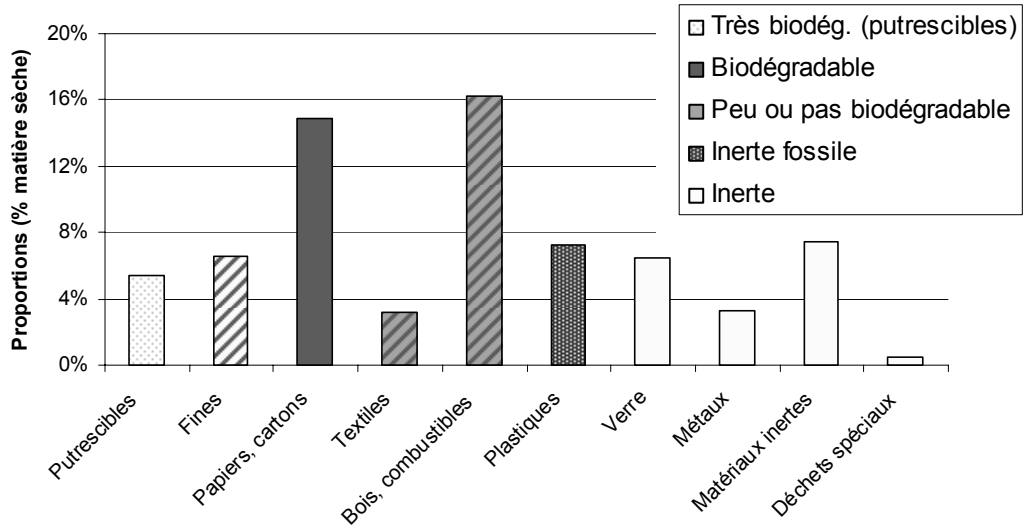


Figure 2. Composition type d'un déchet enfoui en ISDND en France.

Le flux  $Y(t)$  sera fonction de  $k$ , son taux de croissance pour un temps  $t_{1/2}$  correspondant à la moitié de la production totale de méthane, et de  $s$ , un coefficient de forme de la courbe de flux.

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2} - t_{0B}} \quad (3)$$

Ce taux de croissance sera fonction des conditions de méthanisation dans l'alvéole de stockage. Nous considérerons deux scénarios, l'ISD « conventionnelle », où le déchet est stocké à sa teneur en eau naturelle, et l'ISD type « bioréacteur », où un système de recirculation du lixiviat permet d'humidifier efficacement et donc d'accélérer la biodégradation anaérobie du déchet ( $t_{1/2}$  réduit). À partir du traitement de données internes non diffusées, nous proposons :

- ISDND conventionnelle  $k = 0,1 \text{ an}^{-1}$ , avec  $t_{1/2} = 7,5$  ans;
- ISDND bioréactive  $k = 0,2 \text{ an}^{-1}$ , avec  $t_{1/2} = 4,5$  ans.

### 3. Traitement du méthane du biogaz

On sépare le biogaz/méthane produit en deux parties, la partie collectée (à l'amont de la barrière de couverture) et la partie non collectée (Figure 3).

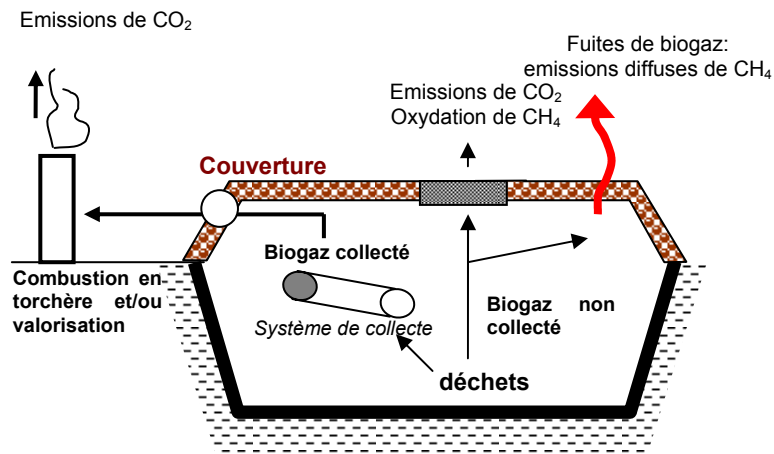


Figure 3. Devenir du méthane dans une ISDND.

On définit ainsi un coefficient d'Efficacité de la Collecte CE du méthane, affecté à chaque structure de barrière de couverture:

$$CE = \frac{\text{Flux de méthane collecté}}{\text{Flux de méthane produit}} \quad (4)$$

Dans le cas le plus techniquement simple, le méthane collecté est brûlé en torchère, ce qui annule son impact environnemental, puisqu'il est transformé en CO<sub>2</sub>. La transformation atteint 100% à condition que le flux de méthane arrivant à la torchère dépasse un seuil minimal (35 Nm<sup>3</sup>/h valeur moyenne). En dessous du seuil, la torchère est arrêtée.

De plus en plus cependant, la valorisation du biogaz est recherchée. On supposera que la cogénération (électricité + chaleur) a un rendement de 60% utilisable à condition que le flux dépasse un seuil de 125 Nm<sup>3</sup>/h (RTE (Réseau de Transport de l'Électricité)-ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), 2007).

La partie du méthane non collectée (Figure 3) peut, elle-même, être subdivisée en deux parties, la partie oxydée lors du passage au travers de la couverture (Cabral et al, 2008) :



et l'autre partie appelée « émissions diffuses ». On définit un coefficient d'Efficacité de l'Oxydation OE :

$$OE = \frac{\text{Flux méthane oxydé}}{\text{Flux méthane non collecté}} \quad (6)$$

et donc:

$$\text{Emissions diffuses } CH_4 = (CH_4 \text{ produit}) \cdot (1-CE) \cdot (1-OE) \quad (7)$$

À noter que les valeurs des coefficients CE et OE proposées par les auteurs sont basées sur leur propre expérience et peuvent différer sensiblement des valeurs standards proposées.

#### 4. Différentes périodes de la vie d'une ISDND et barrières de couverture associées

Quatre différentes périodes peuvent être distinguées dans la vie d'une ISDND, périodes qui vont correspondre à des modalités de collecte des biogaz différenciées. On distinguera une efficacité de la collecte des biogaz différente suivant chacune de ces périodes.

Tableau 1. Phases de vie d'une ISDND.

Étapes	A	B	C	D
Période	Stockage	Transitoire	Post-exploitation	Post-surveillance
Durée	1 an	2 ans	28 ans	70 ans
<i>Conventionnelle</i>				
Type de couverture	Aucune	Couv. semi perméa	Couv. Semi perméable	Bio-couverture
CE	CE <sub>A</sub> =0.35	CE <sub>B</sub> =0.65	CE <sub>C</sub> = 0.5	CE <sub>D</sub> =0
OE	OE <sub>A</sub> =0	OE <sub>B</sub> =0.2	OE <sub>C</sub> = 0.2	OE <sub>D</sub> =0.3
<i>Bioréactive</i>				
Type de couverture	Aucune	Couv. temporaire	Couv. imperméable	Bio-fenêtres
CE	CE <sub>A</sub> =0.35	CE <sub>B</sub> =0.65	CE <sub>C</sub> = 0.9	CE <sub>D</sub> =0
OE	OE <sub>A</sub> =0	OE <sub>B</sub> =0	OE <sub>C</sub> = 0.2	OE <sub>D</sub> =0.6

Les quatre périodes à considérer sont (Tableau 1) :

#### 4.1. La période (A) opérationnelle de stockage (remplissage de l'alvéole)

Durant cette période, le déchet n'est pas couvert, mais la collecte partielle du biogaz peut être obtenue grâce à des drains horizontaux/verticaux placés à l'avancement. Des géosynthétiques (« biotarps ») placés en surface et déplacés avec le compactage, et susceptibles d'oxyder le méthane produit ont aussi été expérimentés (Huber-Humer et al., 2008), mais aucun résultat quantitatif n'est disponible. Pour cette période,  $CE_A = 0,35$  paraît une valeur raisonnable (Spokas et al., 2006). L'oxydation du méthane sera supposée négligeable :  $OE_A = 0$

#### 4.2. La période (B) transitoire de couverture temporaire

Le déchet est un matériau très compressible, sous l'effet du poids des déchets sus-jacents d'une part (tassement « primaire ») et du fait de son évolution dans le temps (tassement « secondaire »). Ce tassement « secondaire » (Gourc et al., 2010b), dû à la perte de masse par biodégradation et au fluage de la structure, peut être très important durant les premières années. Il est donc fortement conseillé de prévoir sur une durée prise ici égale à 2 ans, une barrière de couverture provisoire capable de supporter ces tassements tout en gardant une imperméabilité aux biogaz correcte. On évitera ainsi la fissuration prématurée d'une barrière en sol fin, limon ou argile (Gourc et al., 2010a) ou le déchirement d'une géomembrane aux points fixes de soudure. Un revêtement souple en géosynthétique de masse suffisante pour éviter l'envol pourra convenir. Ce procédé n'a pas été considéré pour l'ISD « conventionnelle »

Pour cette période, une couverture surfacique suffisante et imperméable, placée de façon flottante pourra permettre d'obtenir des valeurs de  $CE_B = 0,65$  et  $OE_B = 0,2$  (« conventionnelle ») et 0 (« bioréactive »).

#### 4.3. La période (C) de post-exploitation (couverture permanente et surveillance du site)

La vitesse de tassement diminuant avec le temps, au bout de 2 ans la couverture temporaire de l'alvéole est remplacée par une couverture permanente. Nous supposons que cette barrière est conservée pendant toute la durée de surveillance de l'alvéole, c'est-à-dire au minimum jusqu'à 30 ans après la couverture de l'alvéole.

Dans le cadre de la législation française actuelle, deux options existent :

- pour une alvéole « conventionnelle », une couverture semi-perméable (Figure 4) dont l'objectif est de permettre une certaine humidification continue (mais non contrôlée !) du déchet de manière à assurer la poursuite de la biodégradation. La barrière correspondante comprend une couche métrique de limon mais pas de géomembrane. Malheureusement la perméabilité partielle à l'eau a pour corollaire, dans l'autre sens, une perméabilité au biogaz. Le coefficient d'efficacité de collecte du biogaz sera variable, mais estimé ici à  $CE_C = 0,50$ . D'après Barlaz et al. (2004), l'oxydation du méthane non collecté serait de l'ordre  $OE_C = 0,20$ .

- Pour une alvéole « bioréactive », une couverture imperméable (argile, Géosynthétique Bentonitique, Géomembrane), complétée nécessairement par un système d'injection permettant d'éviter que l'alvéole ne devienne une « tombe sèche », avec une biodégradation du déchet stoppée. Ceci ne serait pas admissible suivant le principe de développement durable, la biodégradation pouvant reprendre dans le futur à la faveur d'une fuite dans la barrière de couverture.

Le coefficient d'efficacité de collecte du biogaz, d'après des études récentes, peut être pris égal à  $CE_C = 0,90$ .

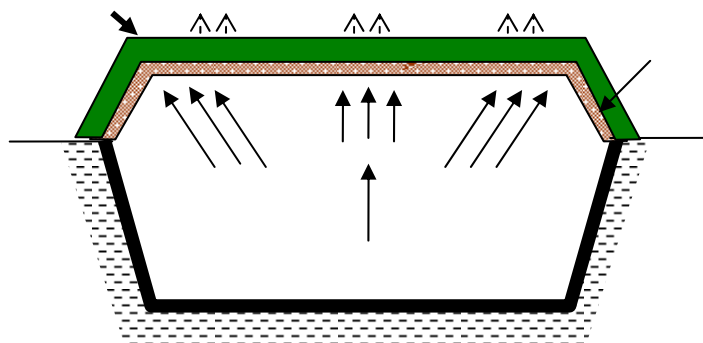


Figure 4. ISDND avec couverture semi-perméable

#### 4.4. La période (D) de post-surveillance

Il s'agit de la période d'« abandon » du site, qui ne fait plus l'objet ni d'une surveillance active (au-delà de 30 ans après fermeture de l'alvéole ou plus généralement du site), ni d'une collecte du biogaz. Cette période post-surveillance pose de fait un certain nombre de questions et la prise de conscience des dilemmes posés et non résolus n'est que très récente. Et le terme de 30 ans risque fort d'être révisé à la hausse.

Le coefficient d'efficacité de collecte du biogaz est donc par définition égal à  $CE_D = 0$  pour les deux types d'alvéoles.

Si l'assurance d'une biodégradation quasi-complète du déchet n'est pas acquise, on doit permettre au biogaz de s'échapper si l'on veut éviter sa mise en surpression. Dans ce contexte, la couverture totalement imperméable n'est donc pas admissible. Mais la couverture perméable ne l'est pas non plus, dans la mesure où, associée à une barrière de fond étanche, elle transforme rapidement l'alvéole en une « baignoire » susceptible d'accumuler du lixiviat sur toute sa hauteur.

Le seul traitement possible durant la phase finale de post-surveillance est donc l'oxydation, puisque aucune méthode de traitement active n'est envisageable, le site étant non surveillé. Différents systèmes passifs sont actuellement à l'étude. Au stade actuel des connaissances, les auteurs du présent article suggèrent :

- pour une alvéole « conventionnelle », les flux de méthane risquent d'être encore importants au bout de 30 ans, la biodégradation étant relativement lente et la couverture semi-imperméable risque de laisser diffuser la plus grande partie du méthane encore produit, d'autant plus que l'efficacité de l'oxydation par un milieu poreux diminue lorsque le flux de méthane augmente (Ineris, 2005). Dans l'état actuel des connaissances, et compte tenu d'une part du faible pouvoir oxydant des couvertures semi-perméables et de leur possible fissuration générant des macro-pores, et d'autre part des flux encore importants de méthane, il est proposé de substituer ou de superposer à la couverture actuelle une « bio-couverture » de quelques dizaines de cm (Figure 4) en charge de l'oxydation du méthane : cette couche, suffisamment poreuse, devra être apte au développement des micro-organismes (Humer-Huber et al., 2008). Cependant, la conservation des conditions d'humidité et de température nécessaires aux micro-organismes nécessite encore des expérimentations. Par ailleurs, ce système doit permettre la diffusion des biogaz tout en limitant les entrées d'eau météorite, pour éviter le risque de noyer l'alvéole ! Un coefficient d'efficacité de l'Oxydation  $OE_D = 0,30$  a été considéré ici (Tableau 1) ;

- pour une alvéole « bioréactive », rappelons que la couverture est initialement imperméable (géomembrane ou autre) et associée à un double réseau de collecte des biogaz et d'injection des lixiviats. Par ailleurs, les flux rémanents de biogaz devraient être nettement inférieurs à ceux du cas précédent, compte tenu de la cinétique de biodégradation supérieure. La solution la plus simple pour le long terme est de garder en fonction le système de collecte des biogaz et de substituer à la sortie vers la torchère une sortie vers un caisson « biofiltre » externe (Figure 5). La pérennité d'un tel système, devant fonctionner passivement sans entretien, reste cependant en question. Un système de collecte-diffusion du méthane réparti au lieu d'être concentré présenterait une fiabilité supérieure. Ceci justifie la seconde proposition de la figure 6 avec des « bio-fenêtres » réparties : ces bio-fenêtres seraient intégrées à la couverture, elles seraient en plus épais, de même nature que les bio-couvertures, elles pourraient être partiellement associées aux anciens puits de captage ou mises en place par découpe locale de l'étanchéité (Géomembrane ou autre). Un coefficient d'efficacité de l'Oxydation, double du cas précédent,  $OE_D = 0,60$  a été considéré ici (Tableau 1). Ceci peut être justifié par d'une part les flux de méthane plus faibles et d'autre part l'étanchéité initiale de la couverture canalisant mieux le méthane vers les lieux d'oxydation.

Comme on le voit, la conception d'une barrière de couverture post-surveillance susceptible de limiter les émissions diffuses de méthane est loin d'être finalisée. Un concept, intégrant dès la période (C) de surveillance à 30 ans un système d'oxydation pérenne, serait à privilégier.

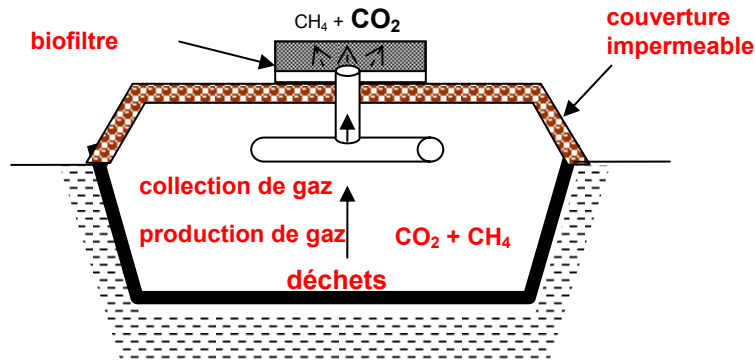


Figure 5. ISDND avec couverture imperméable et biofiltre externe.

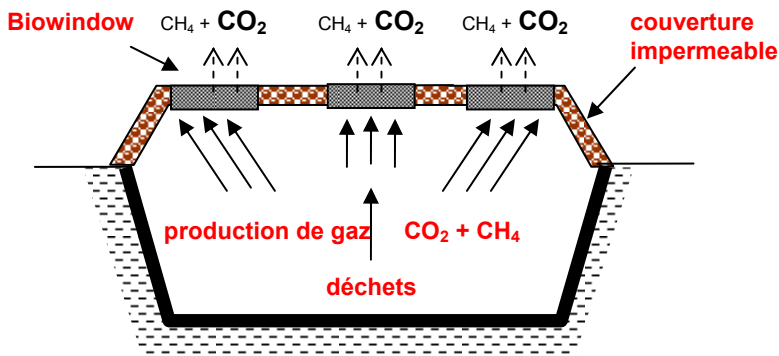


Figure 6. ISDND avec couverture imperméable et bio-fenêtres.

## 5. Modélisation du devenir du Méthane produit sur une durée d'un siècle

Un programme de calcul a été élaboré sur la base des paramètres et des hypothèses présentés ci-dessus afin de quantifier les émissions diffuses en fonction de la stratégie de couverture d'une ISND. Le logiciel, intitulé « IMAGE » (Incremental Model for the Assessment of Greenhouse gas Emissions), fonctionne de façon incrémentale, permettant la prise en compte de l'extension du site, alvéole après alvéole suivant le calendrier d'exploitation. Cet outil peut être utile en particulier pour un exploitant. Le calcul peut être calibré en modulant les différents paramètres d'exploitation (production de biogaz, caractéristiques de la couverture...). Il peut ainsi permettre une optimisation de la gestion des biogaz sur toute la durée d'existence du site.

Dans le présent document, seule l'application à une alvéole unique est présentée. Le déchet est le déchet de la Figure 2. Soit une alvéole de 5000 m<sup>2</sup> de surface au sol et d'épaisseur 30m. Nous considérons les deux scénarios d'ISDND, conventionnelle et bioréactive.

L'alimentation en déchets est de 165000 tonne humide /an, la masse volumique moyenne (humide) du déchet stocké est  $\rho_h = 1,1t/m^3$  et la teneur en eau massique initiale  $w=25\%$ . Le temps de remplissage est donc d'une année et la phase de méthanogénèse débute à  $t_{0B} = 0,67$  an après le début du remplissage. La figure 7 présente, pour les deux types d'ISDND, les volumes de méthane générés, avec une production plus rapide pour l'alvéole bioréactive).

La figure 7 montre aussi les modalités du traitement jusqu'à la fin de la surveillance (30 ans) : les volumes collectés sont plus importants pour l'alvéole bioréactive ; les volumes valorisés énergétiquement et le passage à la torchère suivent les seuils minima de fonctionnement (Paragraphe 3) en considérant un raccordement de 10 alvéoles. À noter que, pour l'alvéole bioréactive, la torchère est arrêtée au bout de 25 ans, les flux passant en dessous du seuil. À partir de là, seule l'oxydation peut réduire les émissions de méthane.

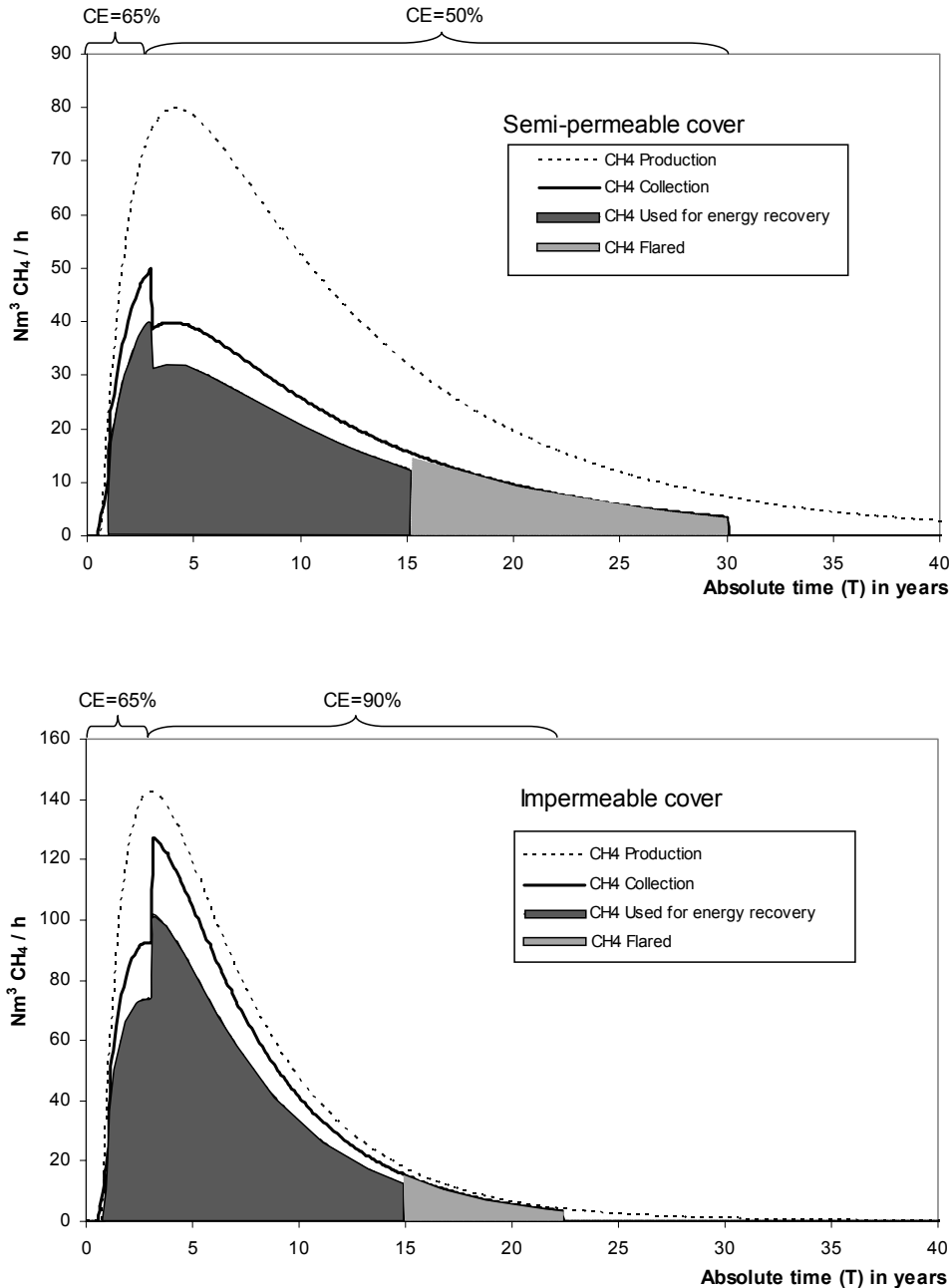


Figure 7. Volumes de méthane produit, collecté, utilisé pour la production d'électricité et simplement brûlé en torchère pour les deux scénarios de couverture

La figure 8 montre de plus, pour les deux types d'ISDND, les volumes de méthane oxydés, en suivant les coefficients OE du Tableau 1.

Le tableau 2 permet un bilan complet en « Equivalent  $\text{CO}_2$  » du méthane produit : 1429 kg  $\text{CO}_2$  /tonne déchet sec correspond à la production de méthane, 581 kg  $\text{CO}_2$  /tonne et 201 kg  $\text{CO}_2$  /tonne correspondent respectivement aux émissions diffuses finales de méthane pour les deux scénarios d'ISDND. Mais le décompte doit aussi tenir compte de l'effet bénéfique de la valorisation énergétique par cogénération, qui sera dans le bilan soustrait aux émissions diffuses. Au final, pour l'alvéole bioréactive, seuls 6,5 % du méthane produit se retrouvent comptabilisé dans le bilan  $\text{CO}_2$ .



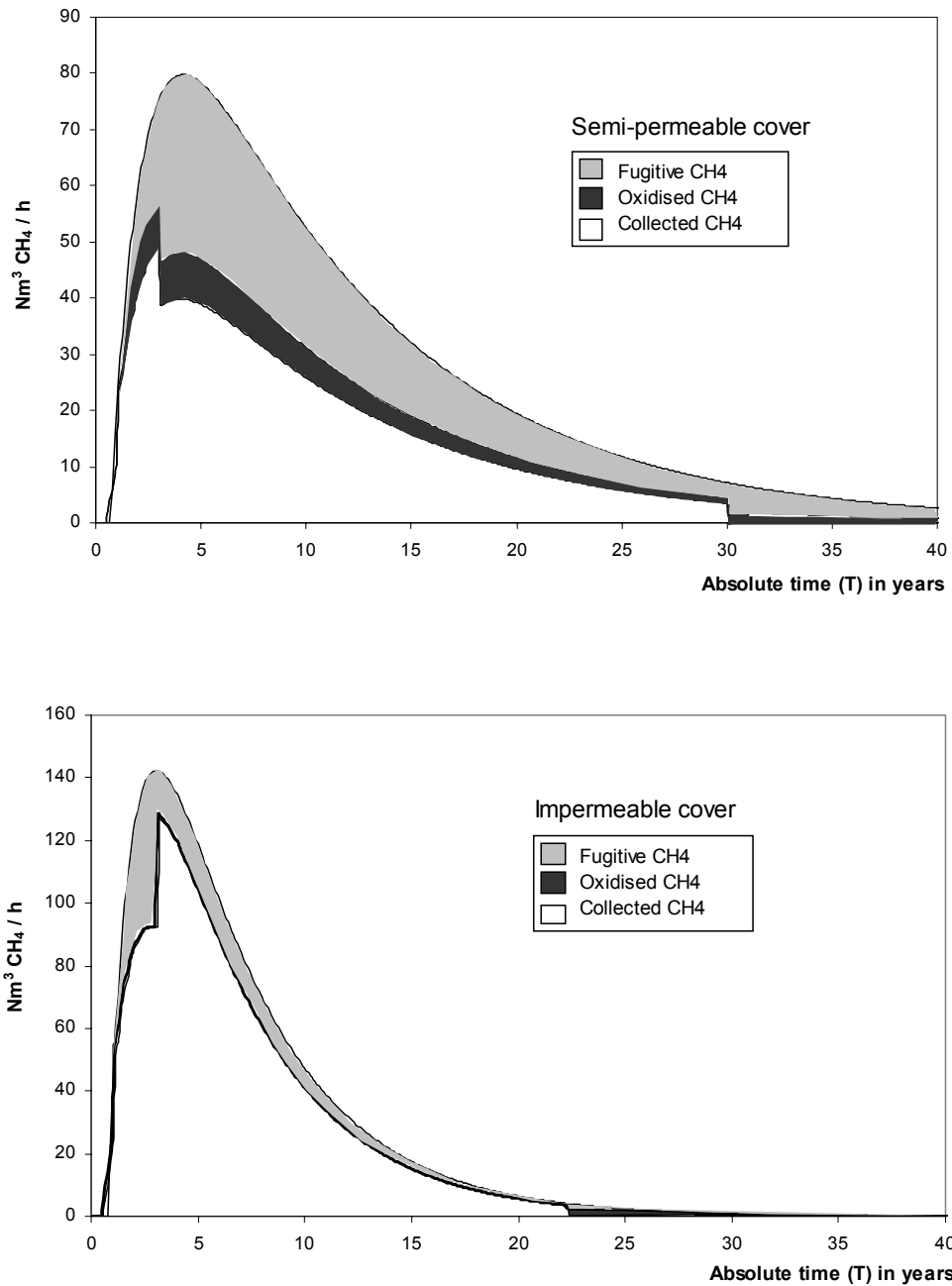


Figure 8. Volumes de méthane émis, oxydé et collecté pour les deux scénarios de couverture.

Tableau 2. Bilan des émissions diffuses suivant les deux scénarios, alvéole conventionnelle et alvéole bioréactive (données en [kg CO<sub>2</sub>eq/tonne de déchet sec]).

	Émissions CH <sub>4</sub>	Émissions diffuses (après oxydation)	Em. évitées (valorisation)	CH <sub>4</sub> diffus/CH <sub>4</sub> produit (valorisation incluse)
ISD conventionnelle	1429	581	-53	37%
ISD bioréactive	1429	201	-109	6.5%

## 6. Conclusion

Les ISDND sont responsables d'une part non négligeable des émissions diffuses de méthane dans l'atmosphère. Elles sont dues au transfert de méthane au travers de la barrière de couverture.

L'étude ci-dessus considère la durée totale de la vie d'une ISDND, exploitation, post-exploitation et post-surveillance, présente les différentes stratégies pour la collecte du méthane en fonction du type de stockage, et propose un programme de calcul (IMAGE) susceptible d'aider un exploitant à organiser la gestion environnementale de son site de stockage.

## 7. Références bibliographiques

- Barlaz M., Green R. B., Chanton J. P., Goldsmith C. D., Hater G. R. (2004). Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions. *Environ. Sci. Technol.* 38, 4891-4899.
- Cabral A. R., Moreira J. F., Askri M.-A., Santos A. K., Jugnia L. B. (2008). Engineering landfill covers for methane oxidation: lessons learned. *Proc. Glob. Waste Symp. 2008*, Copper Mountain, Colorado, USA.
- 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.
- Gourc J.-P., Staub M. (2009). L'actualisation nécessaire de la conception des couvertures de stockage de déchets. *Actes des Rencontres Géosynthétiques 2009*.
- Gourc J.-P., Camp S., Viswanadham B.V.S., Rajesh S. (2010a). Deformation behavior of clay cap barriers of hazardous waste containment systems: Full-scale and centrifuge tests. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 28, pp. 281–291.
- Gourc J.-P., Staub M. J., Conte M. (2010b). Decoupling MSW settlements into mechanical and biochemical processes – modelling and validation on large-scale setups. *Waste Management*, 30, 1556-1568.
- Huber-Humer M., Gebert J., Hilger H. (2008). Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. *Waste Management and Research*, 26, 33–46
- IPCC - 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.
- INERIS (2005). Évaluation des risques liés aux émissions gazeuses des décharges : propositions de seuils de captage. *INERIS Report*, December 2005, 120p.
- RTE-ADEME (2007). Le contenu en CO<sub>2</sub> 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.
- 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 Manage.* 26, 516-525.
- Staub M., Gourc J.-P. (2010). Influence of landfill cap cover characteristics on the mitigation of GHG emissions. *Proc. 9<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics.*, Guarujá, Brazil.