



Note technique

Biothermica Technologies Inc.
426, Sherbrooke Est
Montreal (QC), Canada
H2L 1J6
T +1 514 488 3881
F +1 514 488 3125
www.biothermica.com

Réf. du document :	NT-247	Par :	Daniel Lagos, ing. M. Env.
N° de projet :	PJ-7806-004	Date :	19 mars 2024
Titre :	Modification du modèle de génération de biogaz au LET de Lachenaie à la suite de l'avis final de la direction des matières résiduelles (DMR) du MELCCFP du 22 février 2024.		
Destinataires :	À : Jean-Marc Viau (CEC) et Michèle-Odile Geoffroy (CEC)		

1. INTRODUCTION

À la suite du dépôt au MELCCFP de la révision de la modélisation de biogaz 2022 présentée dans le rapport de Biothermica *Modélisation 2022 de la génération de biogaz au LET de Lachenaie* daté du 15 septembre 2023 (voir annexe IV), la direction des matières résiduelles (DMR) du Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) a émis un avis le 11 janvier 2024 contenant des questions et commentaires lesquelles ont été abordées dans la Note technique de Biothermica du 25 janvier 2024 ⁽¹⁾. Cette note technique a été commentée par la DMR dans son avis final envoyé par courriel à CEC le 22 février 2024.

La DMR indique dans son avis final : « L'avis recommande que la modélisation qui servira à l'étude d'impact du projet d'agrandissement utilise des constantes concordantes aux valeurs d'ECCE. Ces dernières servent de valeurs de référence et elles sont considérées comme plus fiables que les valeurs basées sur une calibration des données de captage d'un lieu d'enfouissement. En effet, ces valeurs peuvent changer selon la méthodologie utilisée et être sujettes à interprétation. Les valeurs de k sont sensiblement les mêmes et on va se calibrer le Lo en conséquence ».

Des plus, la DMR indique dans son courriel du 15 février 2024 : « Nous concevons que l'utilisation de valeurs de k plus faibles pourrait conduire à ce que la courbe de génération modélisée totale ne soit pas en adéquation avec la courbe de génération réelle totale calculée par Biothermica pour les années passées, mais nous ne considérons pas cette courbe de génération réelle comme utile dans le cadre de l'étude d'impact du projet d'agrandissement du LET de Lachenaie. Puisque cette courbe est susceptible de mener à des interprétations divergentes, nous suggérons à Biothermica de ne simplement plus utiliser cette courbe dans son rapport ».

Également, la DMR avait demandé précédemment de mettre à jour les valeurs de matière résiduelle putrescible (% MRP).

Ainsi, la Note technique actuelle présente les modifications au modèle de génération de biogaz

¹ Biothermica, janvier 2024. Note technique. *Réponses à la série de questions et commentaires de la direction des matières résiduelles (DMR) du MELCCFP du 11 janvier 2024 concernant la modélisation de biogaz.*

précédent selon les recommandations ci-haut de la DMR et des modifications supplémentaires, soit plus précisément :

- Utilisation des constantes k concordantes aux valeurs d'ECCEC ;
- Calage (calibration) des valeurs de L_0 en conséquence ;
- Abstention d'utiliser les données de génération réelle passées pouvant manquer d'adéquation avec les résultats obtenus par les nouvelles valeurs de k . Utilisation des données de génération réelle récentes seulement, soit à partir de 2017 ;
- Mise à jour des pourcentages de matière résiduelle putrescible (% MRP) susceptible de générer du biogaz pour la période 2011-2023 ;
- Remplacement des valeurs d'efficacité de captage (EC) supérieures à 95 % par des valeurs égales à 95 % comme demandé par la DMR ;
- Ajout des données réelles d'enfouissement et de captage pour l'année 2023.

2. MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION

2.1. Estimation de la génération réelle de biogaz

La génération réelle de biogaz a été estimée pour l'utiliser comme point de repère pour les résultats obtenus par la modélisation. Elle a été estimée à partir des données réelles de captage de biogaz colligés par CEC et avec l'efficacité de captage (EC) globale du LET estimée par Biothermica.

L'estimation de la génération réelle de biogaz s'étale sur les années récentes, soit entre 2017 et 2023 et est présentée à l'annexe II. Les EC ont été tirées des rapports d'évaluation annuels réalisés par Biothermica. Cependant, à la demande de la DMR, les valeurs d'EC supérieures à 95 % ont été posées égales à 95 %, soit pour toutes les années de la période à l'exception de l'année 2020. Pour 2023, l'EC a été posée à 95 % suivant la tendance des six (6) dernières années. Le tableau 1 montre les EC utilisées.

Tableau 1 : Efficacités de captage globales du LET

Année	Efficacité de captage (%)
2017	95,0
2018	95,0
2019	95,0
2020	93,9
2021	95,0
2022	95,0
2023	95,0

2.2. Données d'enfouissement

Les tonnages d'enfouissement annuels réels par secteur entre l'ouverture du LET en 1982 et 2023 ont été fournis par CEC. Les tonnages d'enfouissement entre 2024 et la fin de l'enfouissement projeté en 2044 ont été estimés comme suit :

- Secteur 4C selon la quantité maximale établie au décret ministériel pour 2022 et réduite de 5 000 tm par année jusqu'à la fin de l'enfouissement prévu dans ce secteur en 2026 ;

- Secteur Ouest-ZoneA en 2027 selon une réduction annuelle de 5 000 tm par rapport à 2026 jusqu'à la fin de l'enfouissement prévue dans ce secteur en 2031 ;
- Secteur Ouest-ZoneB entre 2032 et la fin de l'enfouissement prévue dans ce secteur en 2044 selon la même réduction annuelle de 5 000 tm.

Les variations annuelles pour les secteurs Ouest-ZoneA et Ouest-ZoneB ont été obtenues à partir des projections d'enfouissement de 2027 à 2057 estimées par la firme WSP dans sa note technique *Prolongement de la vie utile du LET de CEC à Terrebonne* du 9 mars 2023 ⁽²⁾.

Les pourcentages de MRP contenue dans la MR enfouie ont été estimés selon quatre (4) années et périodes repères au cours de la vie d'enfouissement du LET de Lachenaie, soit 1982, 2000, 2011-2023 et 2024-2044.

- Pour l'année 1982, étant donné le manque de caractérisation des MR dans ces années, un % MRP de 70 % a été posé ;
- Pour l'année 2000, l'étude de caractérisation du MDDELCC ⁽³⁾ a permis de déterminer un % MRP éliminé de 62,3 % ;
- Une décroissance proportionnelle du % MRP a été appliquée entre 1982 et 2000 ainsi qu'entre 2000 et la première année de la période 2011-2023.
- Pour la période 2011-2023, les % MRP annuels ont été tirés de l'étude réalisée en février 2024 par la firme Tetra Tech ⁽⁴⁾ ;
- Pour la période 2024-2044, les % MRP annuels ont été tirés de l'étude réalisée en octobre 2023 par la firme Tetra Tech ⁽⁵⁾.

Les tonnages enfouis annuels de MR par secteur ainsi que les % MRP et la quantité de ces dernières sont présentés à l'annexe II.

2.3. Valeurs de k et L_0

Des nouvelles valeurs de k et de L_0 ont été appliquées au modèle LandGEM décrit dans le rapport de modélisation de Biothermica du 15 septembre 2023 présenté à l'annexe IV. Contrairement à ce dernier rapport, la méthodologie actuelle ne considère pas d'optimisation numérique pour trouver les valeurs de k et de L_0 . En effet, à la demande de la DMR les valeurs de k ont été prises directement des recommandations d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et celles de L_0 ont été calées (calibrées) pour refléter le mieux possible la génération réelle de biogaz récente.

2.3.1. Valeurs de k

Le tableau 2 présente les valeurs de k recommandées par ECCC qui ont été utilisées dans la modélisation. Elles ont été tirées de la Partie 2 du *Rapport d'inventaire national 1990-2018 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada* publié en 2020 par ECCC. Ces valeurs représentent l'ensemble des types de MR déposées dans les sites d'enfouissement de déchets solides municipaux (DSM) du Canada.

² WSP. *Prolongement de la vie utile du LET de CEC à Terrebonne. Quantités et proportions des différents types de matières organiques à enfouir de 2027 à 2057, territoire traditionnellement desservi par CEC*. Version préliminaire du 9 mars 2023.

³ Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2000). *Caractérisation des matières résiduelles au Québec*. Québec, MDDELCC.

⁴ Tetra Tech. Fichier Excel. *Évolution de la composition des matières résiduelles (MR) reçues au LET de Complexe Enviro Connexion (Secteur Nord, Champ 4, 2011-2023)*. Envoyé par William Rateaud à Jean Marc-Viau le 13 février 2024.

⁵ Tetra Tech. Fichier Excel. *Scénarios et Proportion M.O. enfouie Rév.A*. Envoyé par William Rateaud à Jean Marc-Viau le 19 octobre 2023.

Tableau 2 : Valeurs de k selon ECCC 2020

Région	Précipitations annuelles (mm) tirées des données climatiques historiques d'ECCC				Constante k calculée (par an)			
	1941-1975	1976-1989	1990-2007	2008-présent	1941-1975	1976-1989	1990-2007	2008-présent
Terre-Neuve	1 315	1 391	1 356	1 387	0,075	0,080	0,078	0,080
Île-du-Prince-Édouard	1 052	1 136	1 123	1 086	0,056	0,062	0,061	0,059
Nouvelle-Écosse	1 331	1 377	1 334	1 396	0,076	0,079	0,076	0,080
Nouveau-Brunswick	1 103	1 150	1 089	1 128	0,060	0,063	0,059	0,062
Québec	1 008	1 059	1 085	1 048	0,053	0,057	0,059	0,056
Ontario	834	911	902	884	0,041	0,047	0,046	0,045
Manitoba	527	493	521	493	0,020	0,017	0,019	0,017
Saskatchewan	383	375	422	412	0,010	0,009	0,012	0,012
Alberta	424	421	417	390	0,012	0,012	0,012	0,010
Colombie-Britannique	872	880	912	815	0,044	0,044	0,047	0,040
Yukon	264	262	272	292	0,001	0,001	0,002	0,003
Territoires du Nord-Ouest et Nunavut	341	361	330	323	0,007	0,008	0,006	0,005

Ainsi, les valeurs de *k* utilisées dans la modélisation actuelle ont été :

- 0,058 an⁻¹ pour les secteurs 1 et 2 ayant reçu des MRP entre 1982 et 1996 ;
- 0,059 an⁻¹ pour les secteurs 3 et 4A ayant reçu des MRP entre 1996 et 2009 ;
- 0,056 an⁻¹ pour les secteurs 4B, 4C, Ouest-Est et Ouest-Ouest ayant reçu et étant prévus de recevoir des MRP entre 2010 et 2044.

La valeur de *k* pour la période 1982-1996 a été légèrement majorée par rapport à celle recommandée par ECCC pour la période 1976-1989 de manière à l'adapter aux années visées.

2.3.2. Valeurs de *L*₀ (COD)

Le tableau 3 présente les valeurs de *L*₀ recommandées par ECCC qui ont servi comme référence dans la modélisation actuelle. Elles ont été tirées de la Partie 2 du *Rapport d'inventaire national 1990-2018 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada* publié en 2020 par ECCC. Cependant, il est à noter que ces valeurs représentent l'ensemble des types de MR déposées dans les sites d'enfouissement de déchets solides municipaux (DSM) du Canada et incluent les matières inertes.

Tableau 3 : Valeurs de COD selon ECCC 2020

Province/Territoire	1941 à 1975	1976 à 1989	1990 à 2001	2002 à 2014	2015 à présent
Terre-Neuve	0,31	0,19	0,19	0,20	0,20
Île-du-Prince-Édouard	0,28	0,17	0,16	0,16	0,17
Nouvelle-Écosse	0,27	0,16	0,16	0,15	0,17
Nouveau-Brunswick	0,25	0,17	0,16	0,18	0,18
Québec	0,39	0,21	0,20	0,21	0,17
Ontario	0,37	0,21	0,21	0,21	0,18
Manitoba	0,35	0,19	0,19	0,20	0,19
Saskatchewan	0,38	0,22	0,22	0,19	0,19
Alberta	0,29	0,19	0,19	0,22	0,19
Colombie-Britannique	0,28	0,18	0,17	0,18	0,18
Territoires du Nord-Ouest	0,23	0,15	0,17	0,16	0,18
Nunavut	0,23	0,15	0,17	0,16	0,18
Yukon	0,23	0,15	0,17	0,16	0,19

Note : Sources—D'après les données obtenues d'Environnement Canada (2016b), de RNCAN (2006), de Statistique Canada (2007a) et de CRC Press (1973).

Les valeurs de DOC ont été converties en *L*₀ selon la méthodologie décrite dans le rapport de modélisation de Biothermica du 15 septembre 2023 présenté à l'annexe IV.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette section présente les résultats de la modélisation de la génération de biogaz récente et future des huit (8) secteurs du LET de Lachenaie. La figure 1 présente ces résultats par secteur ainsi que la génération globale obtenue pour l'ensemble du LET par la somme des secteurs. Le détail de ces résultats est présenté à l'annexe III. Le tableau 4 présente les valeurs des paramètres k , L_0 et COD par secteur modélisé ainsi que la moyenne globale pondérée pour l'ensemble du LET. La valeur globale de k a été pondérée selon le nombre d'années d'enfouissement de chaque secteur et la valeur globale de L_0 a été pondérée selon le tonnage enfoui dans chaque secteur.

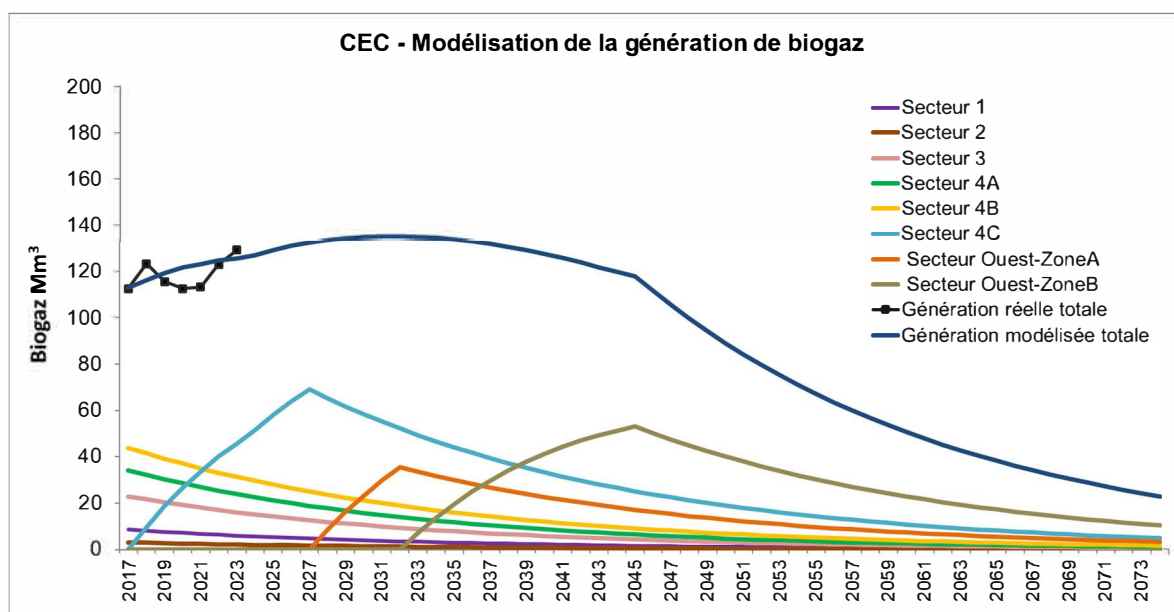


Figure 1 : Modélisation globale du LET

Tableau 4 : Valeurs de k , L_0 et COD

Secteur	k (an^{-1})	L_0 ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{tonne MRP}$)	COD (fraction)
1	0,058	140	0,254
2	0,058	140	0,254
3	0,059	140	0,254
4A	0,059	140	0,254
4B	0,056	110	0,200
4C	0,056	150	0,272
Ouest-Est	0,056	150	0,272
Ouest-Ouest	0,056	150	0,272
Ensemble du LET (moyenne pondérée)	0,057	140	0,254

Les valeurs globales de k , L_0 et COD pour l'ensemble du LET sont respectivement de $0,057 \text{ an}^{-1}$, $140 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tonne MRP}$ et $0,254$. Les résultats prévoient un sommet de génération de biogaz de $135,28 \text{ Mm}^3$ en 2031.

Puisque sensiblement les mêmes valeurs de k du tableau 2 de ECCC ont été prises pour la

modélisation, la valeur de k pour l'ensemble du LET de $0,057 \text{ an}^{-1}$ est égale à la moyenne de k du tableau 2 pour la province du Québec et la période à l'étude, soit à partir de 1982 (période 1976 à 1989) jusqu'à présent.

La moyenne de COD dans le tableau 3 d'ECCC pour la période à l'étude et pour la province du Québec est de $0,198$ ($L_0 = 109 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tonne MRP}$). Cette valeur est 22 % plus basse que celle obtenue par la modélisation actuelle pour l'ensemble du LET. Cela s'explique par le fait que les valeurs de ECCC intègrent les matières inertes reçues dans les DSM, tandis que la modélisation actuelle ne les considère pas. En d'autres mots, selon modélisation actuelle, la quantité générée de biogaz n'est pas réduite par la présence d'inertes.

4. CONCLUSION

Le modèle de génération de biogaz 2023 a été modifié selon les recommandations de la DRM et selon certaines modifications supplémentaires, soit :

- Utilisation des constantes k concordantes aux valeurs d'ECCC ;
- Calage (calibration) des valeurs de L_0 (COD) en conséquence ;
- Abstention d'utiliser les données de génération réelle passées pouvant manquer d'adéquation avec les résultats obtenus par les nouvelles valeurs de k ;
- Mise à jour des pourcentages de matière résiduelle putrescible (% MRP) susceptible de générer du biogaz pour la période 2011-2023 ;
- Remplacement des valeurs d'efficacité de captage (EC) supérieures à 95 % par des valeurs égales à 95 % ;
- Ajout des données réelles d'enfouissement et de captage pour l'année 2023.

La période à l'étude était depuis l'ouverture du LET en 1982 jusqu'à l'année 2057. La modélisation a été réalisée pour chacun des huit (8) secteurs du LET de Lachenaie de manière indépendante. La somme de la quantité générée par chaque secteur constitue la génération globale du LET.

Les valeurs de k utilisées pour la modélisation ont été tirées directement de la Partie 2 du *Rapport d'inventaire national 1990-2018 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada* publié en 2020 par ECCC.

Les valeurs de COD recommandées par ECCC ont servi comme référence dans la modélisation. Elles ont été tirées de la Partie 2 du *Rapport d'inventaire national 1990-2018 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada* publié en 2020 par ECCC.

Les valeurs globales de k , de L_0 et de COD obtenues pour l'ensemble du LET sont respectivement $0,057 \text{ an}^{-1}$, $140 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tonne MRP}$ et $0,254$. La modélisation prévoit un sommet de génération de biogaz $135,28 \text{ Mm}^3$ en 2031.

La valeur globale de modélisation de k pour le LET est égale à la moyenne des valeurs recommandées par ECCC pour la période à l'étude et la province du Québec.

La moyenne des valeurs de COD recommandées par ECCC pour la période à l'étude et la province du Québec est 22 % plus basse que celle obtenue par la modélisation actuelle pour l'ensemble du LET. Cela s'explique principalement par le fait que les valeurs de ECCC intègrent les matières inertes reçues dans les DSM, tandis que la modélisation actuelle ne les considère pas.

ANNEXE I

Captage réel de biogaz, efficacités de captage et estimation de la génération réelle de biogaz

Année	Captage réel de biogaz (Mm³)	Efficacité de captage	Estimation de la génération réelle de biogaz (Mm³)
2017	106.98	95.0%	112.61
2018	117.07	95.0%	123.23
2019	109.73	95.0%	115.51
2020	105.64	93.9%	112.50
2021	107.53	95.0%	113.19
2022	116.80	95.0%	122.95
2023	122.76	95.0%	129.22

ANNEXE II

Tonnages enfouis de MR et pourcentage de MRP y contenue

Données d'enfouissement annuelles totales par secteur (tonnes)									
Année	1	2	3	4A	4B	4C	Ouest ZoneA	Ouest ZoneB	Pourcentage de MRP (%)
1982		215500							70.0
1983		217500							69.6
1984		217500							69.1
1985		55000							68.7
1986	147000								68.3
1987	92000								67.9
1988	92000								67.4
1989	92000								67.0
1990	92000								66.6
1991	403500								66.2
1992	764451								65.7
1993	900571								65.3
1994	851175								64.9
1995	419662	419662							64.4
1996		414526	414526						64.0
1997			639912						63.6
1998			709025						63.2
1999			762810						62.7
2000			876832						62.3
2001			977049						62.0
2002			996521						61.6
2003			1060270						61.3
2004			365497	854638					61.0
2005				1294260					60.7
2006				1294710					60.3
2007				1274434					60.0
2008				1293794					59.7
2009				1198677					59.3
2010					1283348				59.0
2011					1290845				58.7
2012					1294354				59.0
2013					1234438				59.5
2014					1155030				60.0
2015					1114081				60.2
2016					1185809				60.3
2017						1145037			61.6
2018						1107109			61.5
2019						1329815			48.6
2020						1221758			48.8
2021						1300744			46.7
2022						1219397			46.8
2023						1230688			48.1
2024						1245000			53.6
2025						1240000			52.2

Données d'enfouissement annuelles totales par secteur (tonnes)									
Année	1	2	3	4A	4B	4C	Ouest ZoneA	Ouest ZoneB	Pourcentage de MRP (%)
2026						1235000			50.9
2027							1230000		49.6
2028							1225000		48.3
2029							1220000		46.9
2030							1215000		45.6
2031							1210000		44.3
2032								1205000	43.0
2033								1200000	41.7
2034								1195000	40.3
2035								1190000	39.0
2036								1185000	37.7
2037								1180000	36.4
2038								1175000	35.0
2039								1170000	33.7
2040								1165000	32.4
2041								1160000	31.1
2042								1155000	29.4
2043								1150000	29.4
2044								1145000	29.4

ANNEXE III

Résultats détaillés de la modélisation de la génération de biogaz

Biogaz généré par secteur (Mm³)									
Année	1	2	3	4A	4B	4C	Ouest ZoneA	Ouest ZoneB	Somme des secteurs
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
1983	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.023
1984	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.938
1985	0.0	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.733
1986	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.917
1987	1.3	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.929
1988	2.1	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.376
1989	2.8	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.792
1990	3.5	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.180
1991	4.1	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.540
1992	7.5	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.639
1993	13.8	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.720
1994	20.9	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.607
1995	27.1	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.624
1996	29.2	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.152
1997	27.6	10.1	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.291
1998	26.0	9.5	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.508
1999	24.5	9.0	14.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.098
2000	23.2	8.5	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	51.898
2001	21.9	8.0	26.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	56.403
2002	20.6	7.6	33.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	61.455
2003	19.5	7.1	39.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.337
2004	18.4	6.7	46.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	71.426
2005	17.3	6.4	46.7	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	77.504
2006	16.4	6.0	44.0	17.4	0.0	0.0	0.0	0.0	83.791
2007	15.4	5.7	41.5	27.1	0.0	0.0	0.0	0.0	89.662
2008	14.6	5.3	39.1	35.9	0.0	0.0	0.0	0.0	94.973
2009	13.7	5.0	36.9	44.4	0.0	0.0	0.0	0.0	100.078
2010	13.0	4.8	34.8	51.6	0.0	0.0	0.0	0.0	104.062
2011	12.2	4.5	32.8	48.6	7.7	0.0	0.0	0.0	105.829
2012	11.5	4.2	30.9	45.8	15.0	0.0	0.0	0.0	107.518
2013	10.9	4.0	29.1	43.2	22.0	0.0	0.0	0.0	109.188
2014	10.3	3.8	27.5	40.7	28.2	0.0	0.0	0.0	110.490
2015	9.7	3.6	25.9	38.4	33.8	0.0	0.0	0.0	111.310
2016	9.2	3.4	24.4	36.2	38.8	0.0	0.0	0.0	111.870
2017	8.6	3.2	23.0	34.1	43.9	0.0	0.0	0.0	112.860
2018	8.2	3.0	21.7	32.2	41.5	9.8	0.0	0.0	116.326
2019	7.7	2.8	20.4	30.3	39.3	18.7	0.0	0.0	119.267
2020	7.3	2.7	19.3	28.6	37.1	26.7	0.0	0.0	121.589
2021	6.9	2.5	18.2	26.9	35.1	33.5	0.0	0.0	123.093
2022	6.5	2.4	17.1	25.4	33.2	40.1	0.0	0.0	124.681
2023	6.1	2.2	16.2	23.9	31.4	45.9	0.0	0.0	125.679
2024	5.8	2.1	15.2	22.6	29.7	51.6	0.0	0.0	126.931

Biogaz généré par secteur (Mm ³)									
Année	1	2	3	4A	4B	4C	Ouest ZoneA	Ouest ZoneB	Somme des secteurs
2025	5.4	2.0	14.4	21.3	28.1	58.0	0.0	0.0	129.157
2026	5.1	1.9	13.5	20.1	26.5	63.9	0.0	0.0	131.002
2027	4.8	1.8	12.8	18.9	25.1	69.1	0.0	0.0	132.491
2028	4.6	1.7	12.0	17.8	23.7	65.4	8.5	0.0	133.644
2029	4.3	1.6	11.3	16.8	22.4	61.8	16.2	0.0	134.480
2030	4.1	1.5	10.7	15.8	21.2	58.4	23.3	0.0	135.018
2031	3.8	1.4	10.1	14.9	20.1	55.3	29.7	0.0	135.276
2032	3.6	1.3	9.5	14.1	19.0	52.2	35.5	0.0	135.271
2033	3.4	1.3	9.0	13.3	17.9	49.4	33.6	7.2	135.019
2034	3.2	1.2	8.4	12.5	17.0	46.7	31.8	13.7	134.534
2035	3.0	1.1	8.0	11.8	16.0	44.2	30.0	19.7	133.832
2036	2.9	1.1	7.5	11.1	15.2	41.8	28.4	25.1	132.925
2037	2.7	1.0	7.1	10.5	14.3	39.5	26.9	29.9	131.826
2038	2.6	0.9	6.7	9.9	13.6	37.3	25.4	34.2	130.547
2039	2.4	0.9	6.3	9.3	12.8	35.3	24.0	38.1	129.100
2040	2.3	0.8	5.9	8.8	12.1	33.4	22.7	41.5	127.496
2041	2.1	0.8	5.6	8.3	11.5	31.6	21.5	44.5	125.744
2042	2.0	0.7	5.3	7.8	10.8	29.8	20.3	47.0	123.855
2043	1.9	0.7	5.0	7.4	10.2	28.2	19.2	49.2	121.789
2044	1.8	0.7	4.7	6.9	9.7	26.7	18.2	51.2	119.817
2045	1.7	0.6	4.4	6.5	9.2	25.2	17.2	53.1	117.934
2046	1.6	0.6	4.2	6.2	8.7	23.9	16.2	50.2	111.476
2047	1.5	0.6	3.9	5.8	8.2	22.6	15.3	47.5	105.372
2048	1.4	0.5	3.7	5.5	7.7	21.3	14.5	44.9	99.602
2049	1.4	0.5	3.5	5.2	7.3	20.2	13.7	42.5	94.147
2050	1.3	0.5	3.3	4.9	6.9	19.1	13.0	40.1	88.992
2051	1.2	0.4	3.1	4.6	6.5	18.0	12.3	38.0	84.119
2052	1.1	0.4	2.9	4.3	6.2	17.0	11.6	35.9	79.513
2053	1.1	0.4	2.8	4.1	5.9	16.1	11.0	33.9	75.159
2054	1.0	0.4	2.6	3.8	5.5	15.2	10.4	32.1	71.044
2055	1.0	0.3	2.4	3.6	5.2	14.4	9.8	30.3	67.154
2056	0.9	0.3	2.3	3.4	4.9	13.6	9.3	28.7	63.477
2057	0.8	0.3	2.2	3.2	4.7	12.9	8.8	27.1	60.002
2058	0.8	0.3	2.0	3.0	4.4	12.2	8.3	25.6	56.716
2059	0.8	0.3	1.9	2.9	4.2	11.5	7.8	24.2	53.611
2060	0.7	0.3	1.8	2.7	4.0	10.9	7.4	22.9	50.676
2061	0.7	0.2	1.7	2.5	3.7	10.3	7.0	21.7	47.901
2062	0.6	0.2	1.6	2.4	3.5	9.7	6.6	20.5	45.279
2063	0.6	0.2	1.5	2.3	3.3	9.2	6.3	19.4	42.800
2064	0.6	0.2	1.4	2.1	3.2	8.7	5.9	18.3	40.457
2065	0.5	0.2	1.4	2.0	3.0	8.2	5.6	17.3	38.242
2066	0.5	0.2	1.3	1.9	2.8	7.8	5.3	16.4	36.148
2067	0.5	0.2	1.2	1.8	2.7	7.4	5.0	15.5	34.169

Biogaz généré par secteur (Mm³)									
Année	1	2	3	4A	4B	4C	Ouest ZoneA	Ouest ZoneB	Somme des secteurs
2068	0.4	0.2	1.1	1.7	2.5	7.0	4.7	14.6	32.299
2069	0.4	0.2	1.1	1.6	2.4	6.6	4.5	13.9	30.530
2070	0.4	0.1	1.0	1.5	2.3	6.2	4.2	13.1	28.859
2071	0.4	0.1	1.0	1.4	2.1	5.9	4.0	12.4	27.279
2072	0.4	0.1	0.9	1.3	2.0	5.6	3.8	11.7	25.786
2073	0.3	0.1	0.8	1.3	1.9	5.3	3.6	11.1	24.374
2074	0.3	0.1	0.8	1.2	1.8	5.0	3.4	10.5	23.040

ANNEXE IV

Rapport de modélisation 2022 de la génération de biogaz au LET de Lachenaie du
15 septembre 2023

Modélisation 2022 de la génération de biogaz au LET de Lachenaie


Projet n° 7806.004

Présenté à :

COMPLEXE ENVIRO CONNEXIONS

Révision 01

Préparé et approuvé par :



Daniel Lagos, ing., M.Env.

15 septembre 2023



Biothermica Technologies Inc.
426, rue Sherbrooke Est
Montréal (Québec)
H2L 1J6

■ (514) 488-3881
☎ (514) 488-3125

🌐 www.biothermica.com

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	3
2	MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION	3
2.1	Estimation de la génération réelle de biogaz	3
2.2	Données d'enfouissement	4
2.3	Modèle de génération de biogaz	6
2.4	Optimisation des variables	6
2.5	Choix des plages d'optimisation pour k et L_0	7
2.5.1	Valeurs de k	7
2.5.2	Valeurs de L_0	8
3	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	9
4	CONCLUSION	12

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	: Efficacités de captage globales du LET	4
Tableau 2	: Division des matières résiduelles à partir de l'étude de WSP – Projection 2012	5
Tableau 3	: Division des matières résiduelles à partir de l'étude de WSP – Projection 2025	5
Tableau 4	: Plages de k recommandées par le GIEC selon le climat et le type de MR	7
Tableau 5	: Plages de L_0 recommandées par le GIEC selon le type de MR	9
Tableau 6	: Valeurs optimisées de k , L_0 et COD.....	10
Tableau 7	: Valeurs de k selon ECCC 2020.....	10
Tableau 8	: Valeurs de COD selon ECCC 2020	11
Tableau 9	: Quantité projetée de biogaz selon les valeurs globales de k	12

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Modélisation globale du LET	10
Figure 2	: Sensibilité de la valeur globale de k pour l'ensemble du LET	12

ANNEXES

- Annexe I : Captage réel de biogaz, efficacités de captage et estimation de la génération réelle de biogaz
 Annexe II : Tonnages enfouis de MR et pourcentage de MRP y contenue
 Annexe III : Résultats détaillés de la modélisation de la génération de biogaz

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

CEC	Complexe Enviro Connexion
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
CH ₄	Méthane
COD	Carbone organique dégradable
DDL	Déchets à dégradation lente
DDR	Déchets à dégradation rapide
EC	Efficacité de captage
g	Gramme
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
k	Constante cinétique de dégradation
L ₀	Potentiel de génération de méthane
LandGEM	<i>Landfill Gas Emissions Model</i>
LET	Lieu d'enfouissement technique
M	Mega (10 ⁶)
m ³	Mètre cube
MELCCFP	ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
Mg	Méga gramme (10 ⁶ grammes)
MO	Matière organique
MR	Matière résiduelle
MRP	Matière résiduelle putrescible
PAM	Précipitation moyenne annuelle
PET	Potentiel d'évapotranspiration
PMGMR	Plan métropolitain de gestion des matières résiduelles
PPMV	Parties par million (volumique)
Q	Débit volumique
SMC	Somme des moindres carrés
tm	Tonne métrique
TAM	Température annuelle moyenne
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
% v/v	Concentration volumique

1 INTRODUCTION

Le Complexe Enviro Connexion (CEC) a mandaté Biothermica Technologies inc. (Biothermica) afin de réaliser une modélisation du débit de biogaz généré par son lieu d'enfouissement technique (LET) de Lachenaie. La modélisation a été réalisée à l'aide de l'équation de *Landfill Gas Emissions Model* (LandGEM) pour chacun des huit (8) secteurs du LET, soit les six (6) secteurs actuels 1, 2, 3, 4A, 4B et 4C ainsi que deux (2) nouveaux secteurs projetés dans le projet d'agrandissement du LET, soit les secteurs Ouest-Est et Ouest-Ouest. Cette modélisation sert à estimer les émissions atmosphériques du LET présentées au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) dans le cadre du projet d'agrandissement du LET.

En 2018 une modélisation avait été réalisée par Biothermica pour l'année 2017, c'est-à-dire qui tenait compte des données réelles d'enfouissement et de captage de biogaz compilées cette année, en adaptant l'équation de LandGEM pour accepter deux (2) types de matières résiduelles (MR), soit les déchets à dégradation rapide (DDR) tels que ordures ménagères et les boues municipales et les déchets à dégradation lente (DDL) tel que le bois, le papier, le carton et le textile. De plus, la période de modélisation avait été divisée en trois (3) sous-périodes, soit de 1982 à 2005, de 2006 à 2011 et de 2012 à 2040.

La modélisation actuelle pour l'année 2022 a été simplifiée en ne considérant qu'un seul type de MR, soit la matière résiduelle putrescible (MRP) municipale. De plus, une (1) seule période d'enfouissement a été considérée pour chaque secteur.

Il est important de noter que l'intrant de masse de MRP enfouie utilisée pour la modélisation ne contient pas de matières inertes, car celles-ci ont été retirées selon les quantités estimées pour le LET de Lachenaie et présentées à la section 2.2. Ainsi les valeurs de L_0 obtenues par la modélisation représentent un potentiel de génération de méthane (CH_4) par unité de MRP enfouie et non pas par unité de MR enfouie comme habituellement retrouvé dans la littérature pour un site d'enfouissement municipal typique.

2 MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION ^(1,2)

2.1 Estimation de la génération réelle de biogaz

La génération réelle de biogaz a été estimée à partir des données réelles de captage de biogaz colligés par CEC et avec l'efficacité de captage (EC) globale du LET estimée par Biothermica. L'estimation de la génération réelle de biogaz s'étale entre 1996 et 2022 et est présentée à l'annexe I. Entre 1996 et 2009, une efficacité de captage de 90 % a été choisie. L'évaluation de l'efficacité de captage n'a pas été réalisée pour cette période, mais ce choix semble réaliste, voire conservateur, vu la qualité des opérations de captage de biogaz et les résultats du suivi environnemental. Entre 2010 et 2016, les EC ont été tirées du rapport « Analyse comparative des évaluations de l'efficacité de captage du LET de Lachenaie de 2003 et de 2017 » de Biothermica du 29 août 2017. Entre 2017 et 2022 les EC ont été tirées des rapports d'évaluation annuels réalisés par Biothermica. Le tableau 1 montre les efficacités de captages utilisées.

¹ Lagos, D.A., et al. Optimization of a landfill gas collection shutdown based on an adapted first-order decay model. Waste Management (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.012>

² Lagos, D.A. (2014). Optimisation du modèle de génération de méthane au lieu d'enfouissement du Complexe environnemental de Saint-Michel. Mémoire de maîtrise en gestion de l'environnement. Université de Sherbrooke, Longueuil, Québec, 80 p.

Tableau 1 : Efficacités de captage globales du LET

Année	Efficacité de captage (%)	Année	Efficacité de captage (%)	Année	Efficacité de captage (%)	Année	Efficacité de captage (%)
1996	90,0	2003	90,0	2010	91,9	2017	96,0
1997	90,0	2004	90,0	2011	92,6	2018	95,8
1998	90,0	2005	90,0	2012	93,8	2019	97,0
1999	90,0	2006	90,0	2013	95,3	2020	93,9
2000	90,0	2007	90,0	2014	94,5	2021	97,3
2001	90,0	2008	90,0	2015	93,2	2022	97,0
2002	90,0	2009	90,0	2016	92,0		

2.2 Données d'enfouissement

Les tonnages d'enfouissement annuels réels par secteur entre l'ouverture du LET en 1982 et 2022 ont été fournis par CEC. Les tonnages d'enfouissement entre 2023 et la fin de l'enfouissement projeté en 2044 ont été estimés comme suit : premièrement pour le secteur 4C selon la quantité maximale établie au décret ministériel pour 2022 et jusqu'à la fin de l'enfouissement prévu dans ce secteur en 2026 ; deuxièmement pour le secteur Ouest-Est en 2027 selon une réduction annuelle de 5 000 tm par rapport à 2026 jusqu'à la fin de l'enfouissement prévue dans ce secteur en 2031; finalement pour le secteur Ouest-Ouest entre 2032 et la fin de l'enfouissement prévue dans ce secteur en 2044 selon la même réduction annuelle précédente de 5 000 tm. Les variations annuelles pour les secteurs Ouest-Est et Ouest-Ouest ont été obtenues à partir des projections d'enfouissement de 2027 à 2057 estimées par la firme WSP dans sa note technique *Prolongement de la vie utile du LET de CEC à Terrebonne* du 9 mars 2023 ⁽³⁾.

Les pourcentages de MRP contenue dans la MR enfouie ont été estimés comme suit. Quatre (4) années repères ont été choisies au cours de la vie d'enfouissement du LET de Lachenaie, soit 1982, 2000, 2012 et 2020. Une diminution proportionnelle a été appliquée entre chaque année repère. Pour l'année 1982, étant donné le manque de caractérisation des MR dans ces années, un % MRP de 70% a été posé. Pour l'année 2000, l'étude de caractérisation du MDDELCC ⁽⁴⁾ a permis de déterminer un % MRP éliminé de 62,3 %. Une décroissance proportionnelle a été appliquée entre ces années. Pour les années 2012 à 2019, à l'échelle de la communauté métropolitaine de Montréal (CMM), le plan métropolitain de gestion des matières résiduelles (PMGMR) vise une récupération de 60 % des matières organiques génératrices de biogaz en 2025. L'étude d'impact de la firme WSP de février 2018 ⁽⁵⁾ considère ces objectifs lors de son analyse des projections des MRP destinées à l'enfouissement sur le territoire de la CMM en 2012 et en 2025. Selon le scénario de récupération de 50 % en 2025, cette étude a permis de déterminer un % MRP de 62,1 % et de 60,3 % pour les années 2012 et 2025 respectivement comme présenté aux tableaux 2 et 3. Une décroissance proportionnelle a été appliquée entre 2012 et 2019. Pour les années 2020 à 2044, les % MRP

³ WSP. Prolongement de la vie utile du LET de CEC à Terrebonne. Quantités et proportions des différents types de matières organiques à enfouir de 2027 à 2057, territoire traditionnellement desservi par CEC. Version préliminaire du 9 mars 2023.

⁴ Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2000). *Caractérisation des matières résiduelles au Québec*. Québec, MDDELCC.

⁵ Note technique, n° de projet : 171-00481-00, Proportion actuelle (2012) et projetée (2025) des matières résiduelles génératrices de biogaz (boues incluses) dans les matières résiduelles totales enfouies par habitant, territoire de la CMM – Version 2. 20 février 2018

annuels ont été tirés de l'étude de la firme WSP dans sa note technique *Prolongement de la vie utile du LET de CEC à Terrebonne* du 9 mars 2023 ⁽⁶⁾.

Les tonnages enfouis annuels de MR par secteur ainsi que les % MRP et la quantité de ces dernières sont présentés à l'annexe II.

Tableau 2 : Division des matières résiduelles à partir de l'étude de WSP – Projection 2012

2012	MR totales		MRP			
	% MO	% Inerte	% DDR	% DDL	% DDR (base de 100%)	% DDL (base de 100%)
Matières recyclables (Verre, métal, plastique)	-	13,4	-	-	-	-
Matières recyclables (papier, carton)	15,1	-	-	15,1	-	24,3
Matières organiques sans boues	37,0	-	37,0	-	59,6	-
Bues enfouies	2,4	-	2,4	-	3,9	-
Autres (CRD, encombrants, RDD, etc.)(sauf textiles, bois d'oeuvre et de construction)	-	24,5	-	-	-	-
Autres (bois d'oeuvre et de construction)	6,3	-	-	6,3	-	10,1
Autres (Textiles)	1,3	-	-	1,3	-	2,1
Sous-total (%)	62,1	37,9	39,4	22,7	63,4	36,6
Total (%)	100,0		62,1		100,0	

Tableau 3 : Division des matières résiduelles à partir de l'étude de WSP – Projection 2025

2025	MR totales		MRP			
	% MO	% Inerte	% DDR	% DDL	% DDR (base de 100%)	% DDL (base de 100%)
Matières recyclables (Verre, métal, plastique)	-	9,7	-	-	-	-
Matières recyclables (papier, carton)	17,1	-	-	17,1	-	28,4
Matières organiques sans boues	31,3	-	31,3	-	51,9	-
Bues enfouies	2,7	-	2,7	-	4,5	-
Autres (CRD, encombrants, RDD, etc.)(sauf textiles, bois d'oeuvre et de construction)	-	30,1	-	-	-	-
Autres (bois d'oeuvre et de construction)	8,2	-	-	8,2	-	13,6
Autres (Textiles)	1,0	-	-	1,0	-	1,7
Sous-total (%)	60,3	39,8	34,0	26,3	56,4	43,6
Total (%)	100,1		60,3		100,0	

⁶ WSP. Prolongement de la vie utile du LET de CEC à Terrebonne. Quantités et proportions des différents types de matières organiques à enfouir de 2027 à 2057, territoire traditionnellement desservi par CEC. Version préliminaire du 9 mars 2023.

2.3 Modèle de génération de biogaz

Le modèle utilisé dans cette étude est LandGEM. Il a été développé par la *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) dans le but d'estimer les taux d'émission des polluants gazeux générés dans les LES aux États-Unis. Il estime la quantité de CH₄ généré selon une décomposition de premier ordre de la MR enfouie. Le modèle est bâti sur des incréments de dixième d'année à la fois. Le modèle, sous sa forme de double sommation, est représenté par l'équation ci-bas.

$$C_{CH_4} = \sum_{c=1}^C \sum_{c=0.1}^1 C_{C_0} \left(\frac{C}{10}\right)^c C^{-cC_{C_0}}$$

où

Q_{CH_4} = génération annuelle de CH₄ après n années (m^3/an)

k = constante de génération de méthane (an^{-1})

L_0 = potentiel de génération de méthane (m^3/Mg)

M_i = quantité de MR enfouie à l'année i (Mg)

t_{ij} = âge de la j^e section de MR enfouie à la i^e année (années décimales)

i = incréments de 1 an

j = incréments de 0.1 an

n = nombre d'années calculées (année de calcul - année initiale d'acceptation de MR enfouies)

Pour trouver la quantité de CH₄ générée à l'année T , le modèle divise premièrement la MR enfouie en dix fractions égales. Ensuite, il effectue 10 itérations au cours desquelles chaque dixième de MR enfouie est multipliée par le taux de décomposition et par le potentiel de génération de CH₄. Enfin, il ajoute la quantité de CH₄ généré entre l'année $T-n$ et $T-1$. Cette double sommation considère la MR enfouie à l'année T comme celle ayant été accumulée pendant l'année $T-1$. Donc la première année d'enfouissement donne une production de CH₄ nulle.

Les débits de génération modélisée de CH₄ ont été transformés en débits de biogaz en utilisant une concentration de CH₄ de 59 %v/v.

2.4 Optimisation des variables

La modélisation a été réalisée à l'aide d'une optimisation des variables, soit k et L_0 , par la réduction de la somme des moindres carrés (SMC) entre les données modélisées de génération et les données estimées réelles de génération. Cette méthode évalue l'écart global entre les valeurs modélisées de génération de biogaz et les valeurs estimées réelles selon l'équation ci-bas.

$$SS = \sum_{c=1}^C (C_{c,m} - C_{c,r})^2$$

où

y_m = valeur modélisée

y_r = valeur réelle ou mesurée

n = nombre de valeurs

La SMC a été optimisée par l'outil Solver d'Excel selon un algorithme GRG non linéaire. Celui-ci minimise la valeur de la SMC en réalisant des itérations sur les valeurs des variables du modèle. Ces itérations se font en dedans d'une plage d'optimisation spécifiquement choisie pour chaque variable. Les optimums des

variables correspondent aux valeurs trouvées qui donnent une SMC la plus basse possible. Selon la nature quadratique des équations résolues, il ne peut avoir qu'un seul optimum pour chacune des variables et une seule valeur minimisée pour la SMC.

2.5 Choix des plages d'optimisation pour k et L_0

Les plages d'optimisation de L_0 et de k ont été choisies pour permettre une modélisation réaliste. Celles-ci ont été tirées des publications du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Les valeurs de ces variables dépendent principalement du climat où se trouve le LET ainsi que du type des MR enfouie.

2.5.1 Valeurs de k

Le GIEC recommande différentes plages pour k selon le climat régional et le type de MR comme le montre le tableau 4. Les catégories du climat régional sont dans un premier temps séparées en climat *boréal-tempéré* et en climat *tropical*. Cette distinction est faite par le GIEC selon la température annuelle moyenne (TAM) de la région. La prochaine sous-section du tableau est divisée selon l'humidité de la région. Cette dernière est calculée selon la précipitation moyenne annuelle (PAM) et le potentiel d'évapotranspiration (PET) de la région.

Tableau 4 : Plages de k recommandées par le GIEC selon le climat et le type de MR ⁽⁷⁾

		Climat régional			
		Boréal et tempéré		Tropical	
		Sec	Humide	Humide	Très Humide
Vitesse de dégradation	Nature du déchet	Plage de k (an ⁻¹)	Plage de k (an ⁻¹)	Plage de k (an ⁻¹)	Plage de k (an ⁻¹)
Lente	Papier et textile	0,030 – 0,050	0,050 – 0,070	0,040 – 0,060	0,060 – 0,085
	Bois et paille	0,010 – 0,030	0,020 – 0,040	0,020 – 0,040	0,030 – 0,050
Modérée	Rebuts de jardin et autres putrescibles	0,040 – 0,060	0,060 – 0,100	0,050 – 0,080	0,150 – 0,200
	MR municipales	0,040 – 0,060	0,080 – 0,100	0,050 – 0,080	0,150 – 0,200
	MR industrielles	0,040 – 0,060	0,080 – 0,100	0,050 – 0,080	0,150 – 0,200
Rapide	Nourriture et boues municipales	0,050 – 0,080	0,100 – 0,200	0,070 – 0,100	0,170 – 0,700

Les différents indicateurs présentés dans le paragraphe précédent ont été estimés par Lagos D.A. ⁽⁸⁾ pour le cas de Montréal au cours des 30 dernières années avant 2014. Le ratio PAM/PET étant égal à 993 mm/560 mm = 1,8, l'arbre décisionnel du GIEC indique que les plages des valeurs de k pour un LET dans la région de Montréal devraient s'approcher de celles recommandées pour un climat *boréal et tempéré humide*. Cependant, des études récentes suggèrent que certaines valeurs de k recommandées par le GIEC devraient être révisées à la hausse. En effet, De la Cruz et Barlaz ⁽⁹⁾ démontrent que les valeurs de k recommandées par le GIEC pour la MR de nourriture et la MR de jardin étaient sous-estimées de 200 % et

⁷ Intergovernmental panel on climate change (IPCC) (2006a). 2006 GIEC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 Waste, Chapter 3, Solid Waste Disposal. *In* Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Site GIEC. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> (page consultée le 14 mars 2018).

⁸ Lagos, D.A. (2014). Optimisation du modèle de génération de méthane au lieu d'enfouissement du Complexe environnemental de Saint-Michel. Mémoire de maîtrise en gestion de l'environnement. Université de Sherbrooke, Longueuil, Québec, 80 p.

⁹ De la Cruz, F.B., Barlaz, M.A., 2010. Estimation of waste component-specific landfill decay rates using laboratory-scale decomposition data. Environ. Sci. Technol. 44, 4722–4728.

400 % respectivement. De plus, Wang et al. ⁽¹⁰⁾ ont également conclu que des valeurs de k plus élevées que celles recommandées dans la littérature peuvent être considérées dans certains cas. Pour ces raisons, le choix des valeurs de k dans la présente étude ont été tirées de la catégorie *tropicale*.

La plage de valeurs de k retenue se compose ainsi de la plus petite valeur pour les MR municipales dans la catégorie *tropicale humide* et la plus grande valeur dans la catégorie *tropicale très humide*, soit [0,050 – 0,200] an⁻¹.

2.5.2 Valeurs de L_0

Les plages de carbone organique dégradable (COD ou DOC en anglais) recommandées par le GIEC pour différents types de MR sont indépendantes du climat, car ce paramètre est une propriété du type de MR, mais est quand même influencé par certaines conditions d'opération. Comme montré par Lagos D.A. et al. ⁽¹¹⁾, le COD peut être transformé en L_0 en considérant des facteurs de conversion type pour un lieu d'enfouissement au Québec selon les équations suivantes ^(12, 13).

$$DDOC_m = W \times DOC \times DOC_f \times MCF$$

$$L_0 = \frac{DDOC_m \times F \times 16/12}{W}$$

où :

$DDOC_m$ = masse de COD décomposable déposé (CODD_m)

W = masse de déchets déposés (D) = nullifiée entre les deux équations

DOC = fraction du carbone organique dégradable (COD) = 0,20 ⁽¹⁴⁾

DOC_f = fraction de COD susceptible de se décomposer (COD_f) = 0,5 ⁽⁸⁾

MCF = coefficient (fraction) de correction du CH₄ pour la décomposition en aérobie de l'année de dépôt (FCM) = 1,0 ⁽⁸⁾

L_0 = potentiel de génération de CH₄ (tonne CH₄ / tonne MRP)

F = Concentration volumique (%) de CH₄ dans le biogaz généré = 0,59

16/12 = Ratio molaire du CH₄ et du carbone = 1,33

Une densité de CH₄ de 0,715 g/L STP ⁽¹⁵⁾ a été utilisée pour obtenir L_0 en m³ CH₄ / tonne MRP.

Le tableau 5 présente les valeurs de COD recommandées par le GIEC ainsi que leur transformation en L_0 .

¹⁰ Wang, X., Nagpure, A.S., DeCarolis, J.F., Barlaz, M.A., 2013. Using Observed Data to Improve Estimated Methane Collection from Select U.S. Landfills. Environ. Sci. Technol. 47, 3251–3257.

¹¹ Lagos, D.A., et al (2016). Optimization of a landfill gas collection shutdown based on an adapted first-order decay model. Waste Management. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.012>

¹² Malmir et Al. (2023). Optimization of landfill gas generation based on a modified first-order decay model: a case study in the province of Quebec, Canada.

¹³ IPCC (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In: Towprayoon, S Ishigaki, T Chiemchaisri, C Abdel-Aziz, A O Chapter 3: Solid waste disposal

¹⁴ Canada, 2020. RAPPORT D'INVENTAIRE NATIONAL 1990–2018 : SOURCES ET Puits DE GAZ À EFFET DE SERRE AU CANADA - Partie 2. <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2020>

¹⁵ Nikkiah A, Khojastehpour M, Abbaspour-Fard MH (2018) Hybrid landfill gas emissions modeling and life cycle assessment for determining the appropriate period to install biogas system. J Clean Prod 185:772–780. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.080>

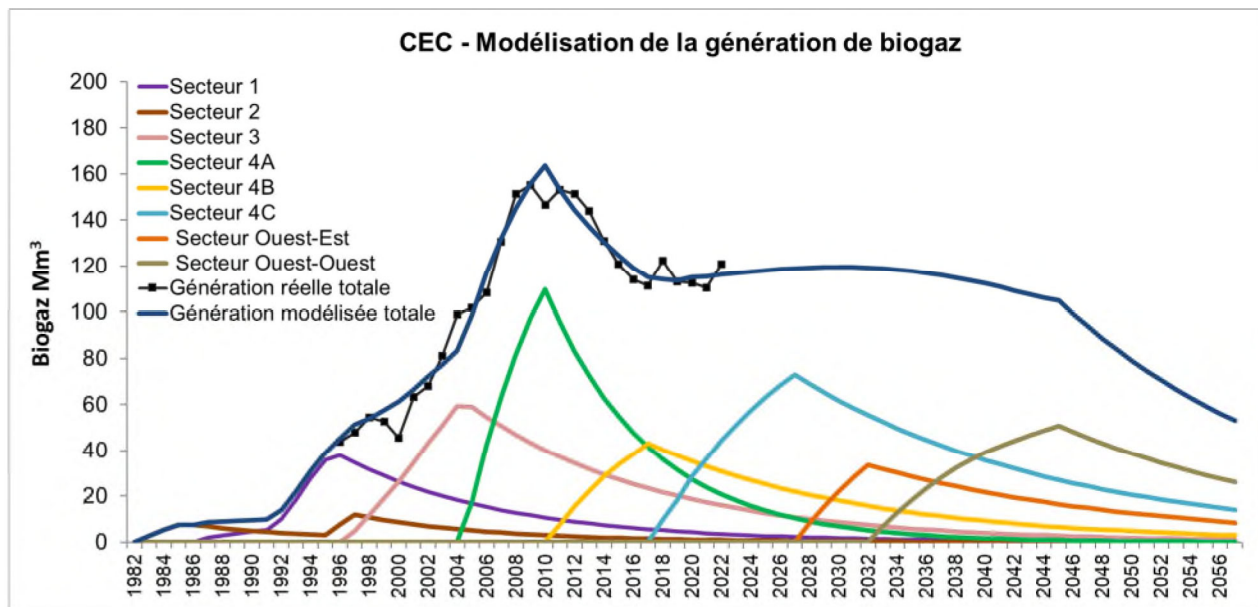
Tableau 5 : Plages de L_0 recommandées par le GIEC ⁽¹⁶⁾ selon le type de MR

Type de MR	Plage de COD (kg C/kg)	Plage de L_0 (m ³ CH ₄ /tonne)
Nourriture	0,08 – 0,20	44 – 110
Rebuts de jardin	0,18 – 0,22	99 – 121
Papier	0,36 – 0,45	198 – 248
Bois et paille	0,39 – 0,46	215 – 253
Textiles	0,20 – 0,40	110 – 220
MR municipales	0,12 – 0,28	66 – 154
Boues municipales	0,04 – 0,05	22 – 28
MR industrielles	0,00 – 0,54	0 – 297

La plage de valeurs retenue pour L_0 dans l'étude actuelle est celle des MR municipales, soit [66 – 154] m³ CH₄/tonne de MR.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette section présente les résultats obtenus par la modélisation de la génération de biogaz des huit (8) secteurs du LET de Lachenaie. La figure 1 présente les résultats de modélisation par secteur ainsi que la génération globale obtenue pour l'ensemble du LET par la somme des secteurs. Le détail de ces résultats est présenté à l'annexe III. Le tableau 1 présente les valeurs optimisées des paramètres k , L_0 et COD par secteur modélisé ainsi que la moyenne globale pondérée pour l'ensemble du LET. La valeur globale de k a été pondérée selon le nombre d'années d'enfouissement de chaque secteur et la valeur globale de L_0 a été pondérée selon le tonnage enfoui dans chaque secteur.



¹⁶ Intergovernmental panel on climate change (IPCC) (2006b). 2006 GIEC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 Waste, Chapter 3, IPCC Waste Model (MS Excel). In Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Site GIEC. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> (page consultée le 3 juillet 2023)

Figure 1 : Modélisation globale du LET**Tableau 6 : Valeurs optimisées de k, L₀ et COD**

Secteur	k (an ⁻¹)	L ₀ (m ³ CH ₄ /tonne MRP)	COD (fraction)
1	0,091	127	0,231
2	0,104	110	0,200
3	0,077	145	0,262
4A	0,139	150	0,272
4B	0,067	90	0,163
4C	0,055	150	0,272
Ouest-Est	0,055	150	0,272
Ouest-Ouest	0,055	150	0,272
Ensemble du LET (moyenne pondérée)	0,076	136	0,247

Les résultats prévoient un sommet de génération de biogaz de 119,5 Mm³ en 2030. Les valeurs globales de k, L₀ et COD pour l'ensemble du LET sont respectivement de 0,076 an⁻¹, 136 m³ CH₄/tonne MRP et 0,247.

À titre de comparaison, les tableaux 6 et 7 présentent les valeurs de k et de COD recommandées par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Elles ont été tirées de la Partie 2 du *Rapport d'inventaire national 1990-2018 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada* publié en 2020 par ECCC. Ces valeurs représentent l'ensemble des types de MR déposées dans les sites d'enfouissement de déchets solides municipaux (DSM) du Canada. Il n'est pas clair si ces valeurs globales incluent les produits inertes déposés, mais tout porte à croire que oui, car les tableaux A3.6-1 et A3.6-2 de la publication de 2022 d'ECCC *Rapport d'inventaire national 1990-2020 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada – Partie 2* présente des valeurs de k et de COD par type de MR incluant les inertes comme le verre, les métaux, le béton, etc. où des valeurs de zéro leur sont attribués dans le cas de COD et des valeurs significatives mais basses dans le cas de k. Le *Rapport d'inventaire national 1990-2020* ne présente pas les valeurs globales des DMS.

Tableau 7 : Valeurs de k selon ECCC 2020

Région	Précipitations annuelles (mm) tirées des données climatiques historiques d'ECCC				Constante k calculée (par an)			
	1941-1975	1976-1989	1990-2007	2008-présent	1941-1975	1976-1989	1990-2007	2008-présent
Terre-Neuve	1 315	1 391	1 356	1 387	0,075	0,080	0,078	0,080
Île-du-Prince-Édouard	1 052	1 136	1 123	1 086	0,056	0,062	0,061	0,059
Nouvelle-Écosse	1 331	1 377	1 334	1 396	0,076	0,079	0,076	0,080
Nouveau-Brunswick	1 103	1 150	1 089	1 128	0,060	0,063	0,059	0,062
Québec	1 008	1 059	1 085	1 048	0,053	0,057	0,059	0,056
Ontario	834	911	902	884	0,041	0,047	0,046	0,045
Manitoba	527	493	521	493	0,020	0,017	0,019	0,017
Saskatchewan	383	375	422	412	0,010	0,009	0,012	0,012
Alberta	424	421	417	390	0,012	0,012	0,012	0,010
Colombie-Britannique	872	880	912	815	0,044	0,044	0,047	0,040
Yukon	264	262	272	292	0,001	0,001	0,002	0,003
Territoires du Nord-Ouest et Nunavut	341	361	330	323	0,007	0,008	0,006	0,005

Tableau 8 : Valeurs de COD selon ECCC 2020

Province/Territoire	1941 à 1975	1976 à 1989	1990 à 2001	2002 à 2014	2015 à présent
Terre-Neuve	0,31	0,19	0,19	0,20	0,20
Île-du-Prince-Édouard	0,28	0,17	0,16	0,16	0,17
Nouvelle-Écosse	0,27	0,16	0,16	0,15	0,17
Nouveau-Brunswick	0,25	0,17	0,16	0,18	0,18
Québec	0,39	0,21	0,20	0,21	0,17
Ontario	0,37	0,21	0,21	0,21	0,18
Manitoba	0,35	0,19	0,19	0,20	0,19
Saskatchewan	0,38	0,22	0,22	0,19	0,19
Alberta	0,29	0,19	0,19	0,22	0,19
Colombie-Britannique	0,28	0,18	0,17	0,18	0,18
Territoires du Nord-Ouest	0,23	0,15	0,17	0,16	0,18
Nunavut	0,23	0,15	0,17	0,16	0,18
Yukon	0,23	0,15	0,17	0,16	0,19

Note : Sources—D'après les données obtenues d'Environnement Canada (2016b), de RNCan (2006), de Statistique Canada (2007a) et de CRC Press (1973).

La moyenne de k dans le tableau 7 d'ECCC pour la période à l'étude, soit à partir de 1982 (période 1976 à 1989) jusqu'à présent pour la province du Québec est de $0,057 \text{ an}^{-1}$. La moyenne de COD dans le tableau 8 pour la période à l'étude et pour la province du Québec est de $0,198$ ($L_0 = 109 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tonne MRP}$). Ces valeurs de k et de COD d'ECCC sont respectivement plus basses de 25 % et de 19 % que celles obtenues par la modélisation actuelle pour l'ensemble du LET. Cela s'explique par le fait qu'elles semblent intégrer les matières inertes reçues dans les DSM, tandis que la modélisation actuelle ne les considère pas. En d'autres mots, selon modélisation actuelle, la génération de biogaz n'est pas ralentie ni réduite par la présence d'inertes et reflète ainsi bien la génération réelle comme démontré par le grand rapprochement des résultats obtenus à la courbe de génération réelle.

La valeur globale de k de $0,076 \text{ an}^{-1}$ obtenue par la modélisation est très proche de la limite inférieure de la plage recommandée par le GIEC pour les MR municipales enfouies dans un climat *boréal et tempéré humide*, soit de $0,080 \text{ an}^{-1}$. Ce climat est préconisé par le ratio PAM/PET pour la région de Montréal et par l'arbre décisionnel du GIEC (voir section 2.5.1).

La valeur globale de COD obtenue par la modélisation se trouve à l'intérieur de limite supérieure de la plage recommandée par le GIEC pour les MR municipales. Cela est attendu, car comme pour les valeurs recommandées par ECCC, les valeurs recommandées par le GIEC incluent les inertes enfouis dans les sites d'enfouissement municipaux.

La sensibilité de la valeur de k pour l'ensemble du LET a été analysée en posant trois (3) scénarios de réduction de sa valeur. Le premier scénario est la réduction de 0 % de sa valeur la valeur, soit $0,076 \text{ an}^{-1}$, le deuxième est la réduction de 12 % de sa valeur, soit $0,067 \text{ an}^{-1}$, le troisième est la réduction de 25 % de sa valeur, soit $0,057 \text{ an}^{-1}$ et le quatrième scénario est la réduction de 50 % de sa valeur, soit $0,038 \text{ an}^{-1}$. Le troisième scénario correspond la même valeur de k recommandée par ECCC pour les sites d'enfouissement municipaux du Québec. Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés à la figure 2.

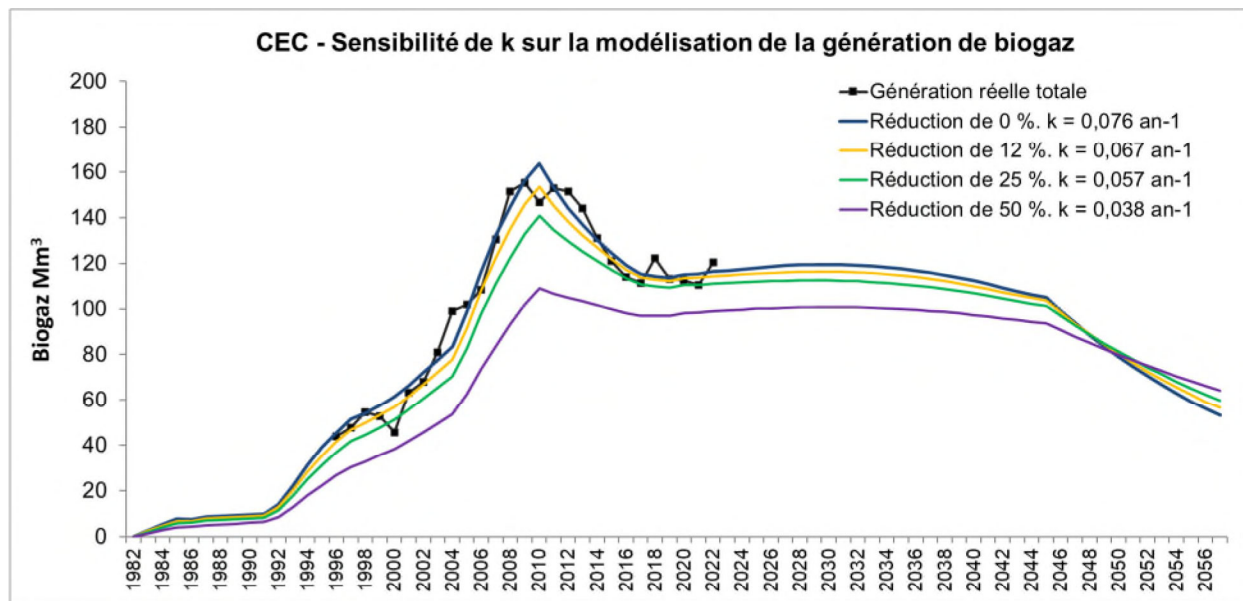


Figure 2 : Sensibilité de la valeur globale de k pour l'ensemble du LET

Les résultats montrent que plus la valeur de k diminue, plus la génération de biogaz diminuera à l'avenir pour la période à l'étude entre 2023 et 2057. Le tableau 9 présente la quantité totale de biogaz générée par chacun des scénarios analysés et la réduction qui en découle.

Tableau 9 : Quantité projetée de biogaz selon les valeurs globales de k

Scénario	Réduction de k	Valeur globale de k (an ⁻¹)	Génération totale de biogaz projetée entre 2023 et 2057 (Mm ³)	Réduction de la génération totale de biogaz projetée entre 2023 et 2057 p/r au scénario 1 (Mm ³)
1	0 %	0,076	3 542,2	-
2	12 %	0,067	3 502,5	1,1 %
3	25 %	0,057	3 438,3	2,9 %
4	50 %	0,038	3 192,0	9,9 %

4 CONCLUSION

Le modèle de génération de biogaz a été simplifié pour l'année 2022 par rapport à sa version précédente réalisée en 2018 pour l'année 2017. Cette simplification considère seulement un (1) type de MR, soit la matière résiduelle putrescible (MRP) municipale au lieu de deux (2) catégories de déchets à dégradation lente (DDL) et déchets à dégradation rapide (DDR). De plus, une (1) seule période d'enfouissement a été considérée pour chaque secteur contrairement à la version précédente qui en considérait trois (3).

La période à l'étude était depuis l'ouverture du LET en 1982 jusqu'à l'année 2057. La modélisation a été réalisée pour chacun des huit (8) secteurs du LET de Lachenaie de manière indépendante. La somme de la quantité générée par chaque secteur constitue la génération globale du LET. Les valeurs globales de k , de L_0 et de COD obtenues pour l'ensemble du LET sont respectivement 0,076 an⁻¹, 136 m³ CH₄/tonne MRP et 0,247. La modélisation prévoit un sommet de génération de biogaz 119,5 Mm³ en 2030.

Les valeurs de k , L_0 et COD obtenues par la modélisation pour l'ensemble du LET sont plus élevées que celles habituellement retrouvées dans la littérature, car elles ne considèrent pas les matières inertes qui se trouvent dans la matière résiduelle (MR) municipale. Ainsi, la modélisation actuelle n'est pas affectée par le ralentissement ni par la réduction de la génération de CH_4 qui est induite par les matières inertes.

Une valeur de L_0 et de COD plus élevée aura pour effet de surestimer la génération de biogaz sur toute la période à l'étude. Les valeurs obtenues par la modélisation sont ainsi considérées comme conservatrices quant à la génération de biogaz par rapport à celles habituellement retrouvées dans la littérature.

La sensibilité de la valeur de k a été analysée et démontre que plus celle-ci diminue, plus la quantité de biogaz générée sera sous-estimée pour la période projetée à l'étude soit de 2023 à 2057. Il est alors plus conservateur de garder une valeur relativement élevée de k telle que celle de $0,076 \text{ an}^{-1}$ trouvée dans cette étude.

ANNEXE I

Captage réel de biogaz, efficacités de captage et estimation de la génération réelle de biogaz

Année	Captage réel de biogaz (Mm ³)	Efficacité de captage	Estimation de la génération réelle de biogaz (Mm ³)
1996	39,40	90,0%	43,78
1997	43,04	90,0%	47,82
1998	48,99	90,0%	54,43
1999	47,51	90,0%	52,79
2000	41,10	90,0%	45,67
2001	56,94	90,0%	63,27
2002	61,35	90,0%	68,17
2003	73,00	90,0%	81,11
2004	89,00	90,0%	98,89
2005	91,81	90,0%	102,01
2006	97,64	90,0%	108,49
2007	117,45	90,0%	130,50
2008	136,20	90,0%	151,34
2009	139,67	90,0%	155,19
2010	134,87	91,9%	146,75
2011	141,71	92,6%	153,03
2012	141,97	93,8%	151,36
2013	137,29	95,3%	144,06
2014	123,77	94,5%	130,98
2015	112,73	93,2%	120,96
2016	104,91	92,0%	114,03
2017	106,98	96,0%	111,44
2018	117,07	95,8%	122,20
2019	109,73	97,0%	113,13
2020	105,64	93,9%	112,50
2021	107,53	97,3%	110,52
2022	116,80	96,7%	120,79

ANNEXE II

Tonnages enfouis de MR et pourcentage de MRP y contenue

Données d'enfouissement annuelles totales par secteur (tonnes)									
Année	1	2	3	4A	4B	4C	Ouest- Est	Ouest- Ouest	Pourcentage de MRP (%)
1982		215500							70,0
1983		217500							69,6
1984		217500							69,1
1985		55000							68,7
1986	147000								68,3
1987	92000								67,9
1988	92000								67,4
1989	92000								67,0
1990	92000								66,6
1991	403500								66,2
1992	764451								65,7
1993	900571								65,3
1994	851175								64,9
1995	419662	419662							64,4
1996		414526	414526						64,0
1997			639912						63,6
1998			709025						63,2
1999			762810						62,7
2000			876832						62,3
2001			977049						62,3
2002			996521						62,3
2003			1060270						62,3
2004			365497	854638					62,2
2005				1294260					62,2
2006				1294710					62,2
2007				1274434					62,2
2008				1293794					62,2
2009				1198677					62,2
2010					1283348				62,1
2011					1290845				62,1
2012					1294354				62,1
2013					1234438				62,0
2014					1155030				61,8
2015					1114081				61,7
2016					1185809				61,5
2017						1145037			61,4
2018						1107109			61,3
2019						1329815			61,1
2020						1221758			57,1
2021						1300744			55,8
2022						1219397			54,5
2023						1250000			53,2
2024						1245000			51,9

Données d'enfouissement annuelles totales par secteur (tonnes)									
Année	1	2	3	4A	4B	4C	Ouest- Est	Ouest- Ouest	Pourcentage de MRP (%)
2025						1240000			50,5
2026						1235000			49,2
2027							1230000		47,9
2028							1225000		46,6
2029							1220000		45,3
2030							1215000		44,0
2031							1210000		42,6
2032								1205000	41,3
2033								1200000	40,0
2034								1195000	38,7
2035								1190000	37,4
2036								1185000	36,0
2037								1180000	34,7
2038								1175000	33,4
2039								1170000	32,1
2040								1165000	30,8
2041								1160000	29,4
2042								1155000	29,4
2043								1150000	29,4
2044								1145000	29,4

ANNEXE III

Résultats détaillés de la modélisation de la génération de biogaz

Biogaz généré par secteur (Mm³)									
Année	1	2	3	4A	4B	4C	Ouest- Est	Ouest- Ouest	Somme des secteurs
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
1983	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,80
1984	0,0	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,33
1985	0,0	7,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,60
1986	0,0	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,55
1987	1,9	6,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,68
1988	2,9	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,02
1989	3,8	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,33
1990	4,6	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,61
1991	5,4	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,87
1992	9,9	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,97
1993	18,5	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,14
1994	27,9	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,22
1995	35,9	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,84
1996	37,9	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,54
1997	34,6	11,8	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	51,26
1998	31,6	10,7	11,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,15
1999	28,8	9,6	19,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57,64
2000	26,3	8,7	26,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	61,49
2001	24,1	7,8	34,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	66,34
2002	22,0	7,0	43,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	72,02
2003	20,1	6,3	51,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	77,54
2004	18,3	5,7	59,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	83,41
2005	16,7	5,1	59,1	17,7	0,0	0,0	0,0	0,0	98,66
2006	15,3	4,6	54,7	42,1	0,0	0,0	0,0	0,0	116,76
2007	14,0	4,2	50,7	63,4	0,0	0,0	0,0	0,0	132,19
2008	12,8	3,8	46,9	81,5	0,0	0,0	0,0	0,0	144,90
2009	11,7	3,4	43,4	97,6	0,0	0,0	0,0	0,0	156,08
2010	10,6	3,1	40,2	109,7	0,0	0,0	0,0	0,0	163,59
2011	9,7	2,8	37,2	95,4	7,9	0,0	0,0	0,0	153,08
2012	8,9	2,5	34,5	83,1	15,4	0,0	0,0	0,0	144,28
2013	8,1	2,2	31,9	72,3	22,4	0,0	0,0	0,0	136,93
2014	7,4	2,0	29,6	62,9	28,5	0,0	0,0	0,0	130,41
2015	6,8	1,8	27,4	54,8	33,7	0,0	0,0	0,0	124,46
2016	6,2	1,6	25,3	47,7	38,4	0,0	0,0	0,0	119,21
2017	5,6	1,5	23,5	41,5	43,1	0,0	0,0	0,0	115,21
2018	5,2	1,3	21,7	36,1	40,3	9,6	0,0	0,0	114,24
2019	4,7	1,2	20,1	31,4	37,7	18,3	0,0	0,0	113,49
2020	4,3	1,1	18,6	27,4	35,3	28,4	0,0	0,0	115,05
2021	3,9	1,0	17,2	23,8	33,0	36,4	0,0	0,0	115,35
2022	3,6	0,9	16,0	20,7	30,8	44,4	0,0	0,0	116,36
2023	3,3	0,8	14,8	18,0	28,8	51,1	0,0	0,0	116,78
2024	3,0	0,7	13,7	15,7	27,0	57,4	0,0	0,0	117,44

Biogaz généré par secteur (Mm ³)									
Année	1	2	3	4A	4B	4C	Ouest-Est	Ouest-Ouest	Somme des secteurs
2025	2,7	0,6	12,7	13,7	25,2	63,1	0,0	0,0	118,05
2026	2,5	0,6	11,7	11,9	23,6	68,3	0,0	0,0	118,57
2027	2,3	0,5	10,9	10,3	22,1	72,9	0,0	0,0	118,99
2028	2,1	0,5	10,1	9,0	20,6	69,0	8,0	0,0	119,30
2029	1,9	0,4	9,3	7,8	19,3	65,3	15,4	0,0	119,48
2030	1,7	0,4	8,6	6,8	18,0	61,8	22,1	0,0	119,53
2031	1,6	0,3	8,0	5,9	16,9	58,5	28,2	0,0	119,44
2034	1,2	0,3	6,3	3,9	13,8	49,6	30,2	13,0	118,31
2035	1,1	0,2	5,9	3,4	12,9	47,0	28,6	18,6	117,64
2036	1,0	0,2	5,4	3,0	12,1	44,5	27,1	23,6	116,84
2037	0,9	0,2	5,0	2,6	11,3	42,1	25,6	28,2	115,89
2038	0,8	0,2	4,7	2,2	10,5	39,8	24,2	32,3	114,81
2039	0,8	0,1	4,3	2,0	9,9	37,7	22,9	35,9	113,60
2040	0,7	0,1	4,0	1,7	9,2	35,7	21,7	39,1	112,26
2041	0,6	0,1	3,7	1,5	8,6	33,8	20,6	41,9	110,79
2042	0,6	0,1	3,4	1,3	8,1	32,0	19,5	44,3	109,21
2043	0,5	0,1	3,2	1,1	7,5	30,3	18,4	46,6	107,72
2044	0,5	0,1	2,9	1,0	7,0	28,7	17,4	48,7	106,31
2045	0,4	0,1	2,7	0,8	6,6	27,1	16,5	50,7	104,99
2046	0,4	0,1	2,5	0,7	6,2	25,7	15,6	48,0	99,16
2047	0,4	0,1	2,3	0,6	5,8	24,3	14,8	45,4	93,66
2048	0,3	0,1	2,2	0,6	5,4	23,0	14,0	43,0	88,48
2049	0,3	0,1	2,0	0,5	5,0	21,8	13,2	40,7	83,58
2050	0,3	0,0	1,8	0,4	4,7	20,6	12,5	38,5	78,97
2051	0,3	0,0	1,7	0,4	4,4	19,5	11,9	36,4	74,61
2052	0,2	0,0	1,6	0,3	4,1	18,5	11,2	34,5	70,49
2053	0,2	0,0	1,5	0,3	3,9	17,5	10,6	32,7	66,61
2054	0,2	0,0	1,4	0,2	3,6	16,5	10,1	30,9	62,94
2055	0,2	0,0	1,3	0,2	3,4	15,7	9,5	29,3	59,48
2056	0,2	0,0	1,2	0,2	3,2	14,8	9,0	27,7	56,21
2057	0,2	0,0	1,1	0,2	2,9	14,0	8,5	26,2	53,13