

PROJET OSSIMED

OUTIL SPECIFIQUE AU SITE DE MESURE ET SUIVI DES EMISSIONS DIFFUSES DES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DES DECHETS NON DANGEREUX

Présentation des protocoles et des résultats

SITE SPECIFIC TOOL FOR DIFFUSE EMISSIONS ASSESSMENT OF MSW LANDFILLS

Presentation of methodology & results

Avril 2013

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'INERIS (contrat n° 1006c0109)

Coordination technique : Isabelle HEBE et Jean-François BLOT,
Service prévention et gestion des déchets
ADEME (Angers)



RAPPORT FINAL

PROJET OSSIMED

OUTIL SPECIFIQUE AU SITE DE MESURE ET SUIVI DES EMISSIONS DIFFUSES DES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DES DECHETS NON DANGEREUX

RAPPORT FINAL

Présentation des protocoles et des résultats

SITE SPECIFIC TOOL FOR DIFFUSE EMISSIONS ASSESSMENT OF MSW LANDFILLS

FINAL REPORT

Presentation of methodology & results

avril 2013

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'INERIS (Contrat n° 1006C0109)
Coordination Technique : Isabelle HEBE et Jean-François BLOT,
Service prévention et gestion des déchets – ADEME (Angers)

Rédaction	Vérification	Validation
Olivier BOUR	Rodolphe GAUCHER	Martine RAMEL

Référence : INERIS DRC-13-115626-04423A

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

www.ademe.fr

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

SOMMAIRE

RESUME

ABREVIATIONS

PREAMBULE

1	INTRODUCTION.....	20
1.1	RAPPEL DU CONTEXTE	20
1.2	OBJECTIFS DU PROJET	20
1.3	OBJECTIFS DU RAPPORT.....	20
1.4	RAPPEL DES TRAVAUX REALISES	21
2	PRESENTATION DU SITE PILOTE	22
3	PRESENTATION DES ZONES D'ETUDES	22
4	TEST DE LA METHODOLOGIE – MISE EN ŒUVRE DES MESURES DE CALAGE.....	23
4.1	TEST DE LA METHODOLOGIE SUIVIE POUR L'APPLICATION DE LA MODELISATION PAR CALMIM.....	23
4.2	MISE EN ŒUVRE DU SUIVI DE TYPE « SCAN » + « CHAMBRE ».....	23
4.2.1	<i>Méthodologie</i>	23
4.2.2	<i>Tests de couplage de méthodes de mesure de flux de biogaz</i>	24
4.2.3	<i>Stratégie d'échantillonnage des gaz</i>	25
4.2.4	<i>Densité des mesures</i>	25
4.2.5	<i>Application de la méthodologie à l'échelle du site étudié</i>	26
4.2.6	<i>Points remarquables et densité de mesure</i>	26
4.2.7	<i>Exploitation en flux total</i>	28
5	DESCRIPTIF DE L'INSTRUMENTATION ET DU MATERIEL MIS EN ŒUVRE	28
5.1	CHAMBRES DE MESURE	28
5.2	ANALYSEURS UTILISES	29
6	PHASE DE MISE AU POINT	30
6.1	PHASE DE CALIBRATION EN LABORATOIRE	30
6.2	PHASE DE CALIBRATION SUR SITE.....	30
6.3	INCIDENCE ET CORRELATION MESURE IFM – MESURE A LA CHAMBRE STATIQUE A RECIRCULATION.....	30
6.4	AUTRES EFFETS DES PARAMETRES EXTERIEURS.....	32
7	APPLICATION DU PROTOCOLE AU SITE PILOTE ETUDIE.....	33
7.1	PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'INTERPRÉTATION DES FLUX	33
7.2	HYPOTHESE ET CONSIDERATIONS PHYSIQUES UTILISEES	33
7.3	DISTINCTION DES FLUX DIFFUS ET CONVECTIFS	34
7.4	ZONE DE COUVERTURE HEBDOMADAIRE.....	34
7.5	ZONE DE COUVERTURE INTERMEDIAIRE	35
7.5.1	<i>Les alvéoles 3 et 4</i>	36
7.5.2	<i>Le casier 11</i>	37
7.6	ZONE DE COUVERTURE FINALE	38
7.6.1	<i>Zone du Dôme</i>	38
7.6.2	<i>Zone finale à couverture moins épaisse</i>	40
7.7	PROTOCOLE D'EXTRAPOLATION DES RESULTATS A L'ENSEMBLE DU SITE.....	41
8	SELECTION DES POINTS DE SUIVI.....	43
9	EVALUATION DE LA VARIABILITE DES EMISSIONS DIFFUSES.....	45
9.1	VARIABILITE HORAIRE A JOURNALIERE	45
9.2	VARIABILITE PLURI-JOURNALIERE A SAISONNIERE	48
9.3	VARIABILITE SAISONNIERE A ANNUELLE	49
9.4	APPLICATION AU SITE PILOTE ETUDIE	50
9.4.1	<i>Evaluation des variations des émissions de méthane à partir des scans de la surface des zones concernées</i>	52
9.4.2	<i>Evaluation des variations des émissions de méthane à partir des suivis ponctuels</i>	55

10	UTILISATION DES DONNEES DE CALAGE	68
10.1	UTILISATION DES MODELES CLASSIQUES	68
10.2	EVALUATION PAR LES NOUVEAUX OUTILS : CALMIM.....	68
10.2.1	<i>Test de calage sur une couverture perméable.....</i>	69
10.2.2	<i>Calibration du modèle CALMIM v5.1</i>	71
10.2.3	<i>Conclusion sur la calibration</i>	79
11	COMPARAISON AVEC DES MODELES DE PRODUCTION.....	79
11.1	UTILISATION DE GASSIM V2.0.....	79
11.2	PARAMETRES COMMUNS AVEC CALMIM V 5.1.....	81
11.2.1	<i>Texture et perméabilité des sols.....</i>	81
11.2.2	<i>Oxydation du méthane</i>	82
11.2.3	<i>Evaluation de la qualité du dégazage et des émissions convectives</i>	83
11.3	RESULTATS DES SIMULATIONS PAR GASSIM v2.0.....	85
11.3.1	<i>Résultats obtenus par GasSim pour le site 1.....</i>	85
11.3.2	<i>Résultats obtenus par GasSim pour le site 2.....</i>	86
11.3.3	<i>Résultats obtenus par GasSim pour le site pilote.....</i>	87
11.3.4	<i>Conclusion concernant l'utilisation de gasSim.....</i>	87
11.4	UTILISATION SANS CALAGE DE CALMIM v5.1	88
11.4.5	<i>Choix des paramètres</i>	88
11.4.6	<i>Résultats de CALMIM pour le site 1</i>	89
11.4.7	<i>Résultats de CALMIM pour le site 2.....</i>	90
11.4.8	<i>Résultats de CALMIM pour le site pilote.....</i>	90
11.5	COMPARAISON DES MODELES	92
11.5.1	<i>Résultats pour le site 1.....</i>	92
11.5.2	<i>Résultats pour le site 2.....</i>	93
11.5.3	<i>Résultats pour le site pilote.....</i>	95
11.5.4	<i>Conclusion : influence des paramètres.....</i>	96
12	CONCLUSION.....	97
	ANNEXE 1 – ENREGISTREMENTS DES PARAMETRES CLIMATIQUES DU SITE ETUDIE	100
	ANNEXE 2 – PLANS DES INVESTIGATIONS ET CARTOGRAPHIE DES ESTIMATIONS DE FLUX DU SITE ETUDIE	104
	ANNEXE 3 – CALIBRATION DE CALMIM (ZONE D’OXYDATION, FLUX DE METHANE ESTIME/MESURES, INFLUENCE DES CHANGEMENTS DE TEXTURE, PRISE EN COMPTE D’UNE COLONNE DE DECHETS)	110
	ANNEXE 4 – PARAMETRES DE GASSIM ET DES 3 SITES CHOISIS POUR L’APPLICATION DES MODELES DE PRODUCTION	116
	ANNEXE 5 – PARAMETRES DE CALMIM.....	121

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau des caractéristiques des couvertures du site retenu (2011)	22
Tableau 2 : Densités d'échantillonnage de mesure de concentrations instantanées utilisées	27
Tableau 3 : Similiflux IFM de méthane de la zone des sables (09/2011).....	35
Tableau 4 : Similiflux IFM de méthane des alvéoles 3 & 4 (09/2011)	36
Tableau 5 : Paramètres des queues de distribution des similiflux des alvéoles 3 & 4.....	36
Tableau 6 : Similiflux IFM de méthane du casier 11 (09/2011)	37
Tableau 7 : Paramètres de la queue de distribution des similiflux du casier 11	38
Tableau 8 : Similiflux IFM de méthane du dôme (09/2011).....	39
Tableau 9 : Similiflux IFM et flux de méthane de la zone réaménagée avant 1997 (06/2011 et 09/2011)	40
Tableau 10 : Paramètres de la queue de distribution des similiflux de la zone réaménagée avant 1997	41
Tableau 11 : Tableau des paramètres émissifs retenus pour les émissions de méthane du site pilote à la fin du mois de septembre 2011.....	42
Tableau 12 : Points suivis et appartenance aux zones et types de couverture	44
Tableau 13 : Tableau récapitulatif des paramètres des distributions statistiques des flux IFM des campagnes menées en septembre et novembre 2011 sur 5 types de couverture.	53
Tableau 14 : Statistique concernant les flux de méthane et de CO ₂ observées sur les 3 points H1 à H3 de la zone de couverture hebdomadaire (26/9 au 30/9/2011).....	57
Tableau 15 : Amplitude comparée des paramètres climatiques de CALMIM v5.1 et des données d'une station météorologiques située à proximité du site pilote	71
Tableau 16 : Valeurs moyennes et nominales de la perméabilité des couvertures correspondantes aux distributions utilisées sous Gassim V2.0.....	81
Tableau 17 : Texture et perméabilité des type de sols considérés (d'après CALMIM v4.2).....	82
Tableau 18 : Taux de captage utilisés avec GasSim	84
Tableau 19 : Résultats de GasSim pour le site 1	85
Tableau 20 : Résultats de GasSim pour le site 2	86
Tableau 21 : Résultats de GasSim pour le site pilote	87
Tableau 22 : Résultats de CALMIM pour le site 1 (1/2)	89
Tableau 23 : Résultats de CALMIM pour le site 1 (2/2)	89
Tableau 24 : Résultats de CALMIM pour le site 2 (1/2)	90
Tableau 25 : Résultats de CALMIM pour le site 2 (2/2)	90
Tableau 26 : Tableaux présentant les émissions de méthane de la zone postérieure à 1997 du site pilote..	91
Tableau 27 : Emissions de méthane de la zone ancienne.....	92
Tableau 28 : Répartition des productions et émissions selon les modèles et les couvertures pour le site 1 .	93
Tableau 29 : Répartition des productions et émissions selon les modèles et les couvertures pour le site 2 .	94
Tableau 30 : Répartition des productions et émissions selon les modèles et les couvertures pour le site pilote	95
Tableau 31 : Type de flux selon les couvertures et leur état de saturation.....	96

Liste des figures

Figure 1 : Types de chambre utilisés : à gauche la chambre à flux INERIS, en allant vers la droite des cannes cloches de diamètres différents associé ou non à une surélévation (d'après Kheffi A. et al, 2009)	24
Figure 2: Photographies de la chambre à flux.....	29
Figure 3 : Corrélation entre les mesures de concentration moyennes obtenues sur 20 secondes et les mesures de flux à la chambre à recirculation	31
Figure 4 : Corrélation entre les mesures de concentration maximales obtenues sur 20 secondes et les mesures de flux à la chambre à recirculation	31
Figure 5 : Variation des pressions barométriques et différentielles sur la canne 2 le 8 juin 2011 sur la zone réaménagée avant 1997	32
Figure 6 : Vue de la surface de la zone de couverture hebdomadaire	34

Figure 7 : Vue de la surface des alvéoles 3 & 4.....	35
Figure 8 : Vue de la surface du casier 11, 09/2011.....	36
Figure 9 : Vue de la zone du Dôme, 09/2011.....	39
Figure 10 : Vue de la zone réaménagée avant 1997, vers le bassin des lixiviats, 09/2011.....	40
Figure 11 : Evolution comparée de la pression barométrique et de la dépression mesurée.....	46
Figure 12 : Variations des flux de méthane, de CO ₂ et de la pression différentielle sous la couverture mesurées le 8 juin 2011.....	46
Figure 13 : Variations des ratios de flux de CO ₂ et de méthane sur la journée du 8 juin 2011.....	47
Figure 14 : Variations du ratio CO ₂ /CH ₄ des flux en fonction du flux de CH ₄	48
Figure 15 : Variations des émissions selon la pression atmosphérique, extrait d'après Scharff & al (2005) .	49
Figure 16 : Variation des flux de méthane émis avec la pression (d'après Taramini & al (2003)).....	49
Figure 17 : Suivi des températures à la surface de la couverture et de la pression barométrique.....	51
Figure 18 : Evolution des teneurs en CO ₂ , méthane et oxygène des gaz au sein de la base de la couverture de la zone intermédiaire (septembre 2011).....	52
Figure 19 : Evolution des teneurs en CO ₂ , méthane et oxygène des gaz au sein de la base de la couverture de la zone intermédiaire (novembre 2011).....	52
Figure 20 : Evolution des flux de méthane et de CO ₂ pour les 3 points H1, H2 et H3 de la zone de couverture hebdomadaire le 26 septembre 2011.....	55
Figure 21 : Evolution comparée de la pression barométrique et des émissions en méthane au droit du point H1 (26 septembre 2011).....	56
Figure 22 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO ₂ au droit des points H1 à H3 et du scan IFM (26/9 au 30/9/2011).....	57
Figure 23 : Evolution des flux de méthane et de CO ₂ pour les 3 points H1, H2 et H3 de la zone de couverture hebdomadaire le 29 novembre 2011.....	58
Figure 24 : Comparaison des valeurs moyennes et écart types des flux de méthane et de CO ₂ au droit des points H1 à H3 et du scan IFM (29/11 au 1/12/2011).....	58
Figure 25 : Evolution des flux de méthane et de CO ₂ pour les 3 points I1, I2 et I3 de la zone de couverture intermédiaire du 27 au 30 septembre 2011.....	59
Figure 26 : Evolution comparée des flux de méthane du point I3, de la température et de la pression barométrique sur la zone de couverture intermédiaire (27/09/2011).....	59
Figure 27 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO ₂ au droit des points I1 à I3 et du scan IFM (27/9 au 30/9/2011).....	60
Figure 28 : Evolution des flux de méthane et de CO ₂ pour les 3 points I1, I2 et I3 de la zone de couverture intermédiaire du 29 novembre au 1 ^{er} décembre 2011.....	61
Figure 29 : Evolution comparée des flux de méthane et de CO ₂ dans la journée du 30/11/2011.....	61
Figure 30 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO ₂ au droit des points I1 à I3 et du scan IFM (29/11 au 1/12/2011).....	62
Figure 31 : Evolution des flux de méthane et de CO ₂ pour les 3 points F1, F2 et F3 de la zone de couverture finale du 28 au 30 septembre 2011.....	63
Figure 32 : Evolution comparée de la pression barométrique et des émissions en méthane au droit du point F1 (28 au 30 septembre 2011).....	64
Figure 33 : Influence de la vitesse des vents sur les émissions de méthane du point de suivi F1 de la zone de couverture finale (28 au 30 septembre 2011).....	65
Figure 34 : Fréquence moyenne des vents en direction et vitesse sur la campagne de mesure de septembre 2011 (26/9/2011- 30/9/2011).....	65
Figure 35 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO ₂ au droit des points F1 à F3 et du scan IFM de la surface totale et des 3 sous zones émissives rencontrées (28/9 au 30/9/2011).....	66
Figure 36 : Evolution des flux de méthane et de CO ₂ pour les 3 points F1, F2 et F3 de la zone de couverture finale le 1 ^{er} décembre 2011.....	67
Figure 37 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO ₂ au droit des points F1 à F3 et du scan IFM du casier 11 et de la zone ancienne (29/11 au 1/12/2011).....	67
Figure 38 : Outil CaLMIM développé pour une évaluation spécifique au site de l'oxydation du méthane et de l'importance des émissions résiduelles (D'après K. Spokas & al, 2010).....	69
Figure 39 : Choix des paramètres pour la couverture hebdomadaire (CALMIM 4.2).....	70
Figure 40 ; Résultat de CALMIM 4.2 pour la couche de sable de 30 cm de la zone hebdomadaire et une calibration minimale (teneur en méthane sous la couverture).....	70
Figure 41 : Températures simulées dans CALMIM (du jour 30 au jour 200 environ) remplacées par les températures réelles (les autres jours de l'année 2011).....	71
Figure 42 : Précipitations simulées dans CALMIM (du jour 30 au jour 200 environ) remplacées par les précipitations réelles (les autres jours de l'année 2011).....	72

Figure 43 : Flux de méthane estimés et mesurés sur la zone de couverture hebdomadaire pour les 3 campagnes de 2011	74
Figure 44 : Pourcentage minimal de méthane estimé d'après les mesures réalisées en surface comparé à la gamme de variation de teneur en méthane proposée par CALMIM.....	75
Figure 45 : Comparaison des flux moyens mesurés et modélisés sur l'alvéole 4 pour les campagnes de 2011	76
Figure 46 : Comparaison des flux moyens mesurés et modélisés le casier 11 pour les campagnes de 2011	77
Figure 47 : Rayon « minimal » d'influence du captage en fonction de la position de la crépine.....	85
Figure 48 : Comparaison des productions et émissions totales de biogaz et de méthane pour le site 1	93
Figure 49 : Comparaison des productions et émissions totales de biogaz et de méthane pour le site 2	94
Figure 50 : Comparaison des productions et émissions totales de biogaz et de méthane pour le site pilote	95
Figure 51 : Intensité des pluies et cumul journalier des pluies sur la période considérée (26/9 au 27/11/2011)	101
Figure 52 : Diagramme des vitesses et directions des vents, campagne de mesure du 26 au 30 septembre 2011	101
Figure 53 : Diagramme des vitesses et directions des vents, campagne de mesure du 15 et 16 novembre 2011.	102
Figure 54 : Histogramme des vitesses moyennes des vents, campagne de mesure des flux de novembre 2011 du 26 au 30 septembre 2011	102
Figure 55 : Histogramme des vitesses moyennes des vents, Campagne secondaire de mesure des flux de novembre 2011 du 15 - 16 novembre 2011.....	103
Figure 56 : zones d'étude sélectionnées sur le site pilote.....	105
Figure 57 : Localisation des points de suivi dans le temps des couvertures (du 26/9 au 1/12/2011).....	106
Figure 58 : Flux IFM de méthane interpolés des zones de couverture hebdomadaire et intermédiaire (septembre 2011)	107
Figure 59 : Flux IFM de méthane interpolé sur la zone réaménagée avant 1997 (données de juin 2011) ..	108
Figure 60 : Mesures de flux instantanés de méthane (IFM) réalisées sur le site en septembre 2011.....	109

ABREVIATIONS

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
CALMIM,	California Landfill Methane Inventory Model
CLEAR	Consortium for Landfill Emissions Abatement Research
COV	Composés Organiques Volatils
GES	Gaz à Effet de Serre
IFM	Instantaneous Flux measurement
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISDND	Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux
ISM	Instantaneous Surface measurement
MEDDE	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, et de l'Energie
MO	Matière Organique
SPE	Suivi Post-Exploitation

RESUME

Le contrôle et la réduction des émissions fugitives de méthane est l'un des défis de la mise en décharge des déchets solides municipaux. Cette réduction des émissions des biogaz nécessite de pouvoir mesurer de faibles émissions de méthane et d'utiliser les résultats afin d'évaluer ces émissions diffuses sur une base annuelle. En outre, l'expérience des mesures d'émission de méthane démontre que les variations des émissions fugitives de méthane sont encore plus marquées avec de faibles émissions.

Un projet de recherche « OSSIMED » financé par le Ministère de l'Environnement Français et par l'Agence de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) a commencé dans l'année 2011 avec la collaboration de SITA. Les principaux objectifs étaient d'identifier l'amplitude et l'importance des variations des émissions de méthane et de dioxyde de carbone observés sur un site d'enfouissement et de donner des conseils pour une évaluation plus juste des émissions de gaz à effet de serre d'un site d'enfouissement en opération. Un protocole de mesure et de différentes échelles de temps ont été considérés. Neuf zones de surveillance ont été sélectionnés sur trois types de couverture (quotidienne, intermédiaire, final) d'un site pilote afin de permettre la surveillance des émissions sur une base horaire, journalière, hebdomadaire et saisonnière. L'outil CALMIM et 3 autres outils de modélisation de la production de gaz d'enfouissement ont été utilisés sur un site d'enfouissement de pilote et deux autres sites d'enfouissement afin d'identifier le comportement de chaque outil pour les différents types de couverture.

Les mesures des émissions de méthane ont été réalisées suivant une méthode de mesure en surface des concentrations instantanées (ISM) modifiée (mesure des flux surfaciques instantanés (IFM)) afin d'évaluer l'ensemble des flux de gaz émis par chaque type de couverture. Le suivi des points sélectionnés a utilisé une chambre d'accumulation avec recirculation. Les chambres d'accumulation ont également été utilisées avec la méthode ISM modifiée (IFM) avec une bonne corrélation entre les deux méthodes. Les mesures IFM ont été utilisées afin de fournir la meilleure couverture de la surface. Les mesures de la concentration de méthane ont été faites par FID (Flame Ionisation Detector) et en utilisant un analyseur de méthane Inspectra® (technologie spectroscopique laser avec l'aide d'une diode laser).

La densité des mesures a été adaptée au type d'émission : la densité de base était de 100 points IFM / ha avec un raffinement (sur-échantillonnage) ou un échantillonnage spécifique à proximité des flux convectifs.

La valeur moyenne et la variation des émissions de méthane et de CO₂ observées sur certains points de surveillance ont été comparées. Nous avons observé de grandes variations de flux de méthane provenant des différents points de surveillance. Les variations des flux surfaciques de méthane sont généralement de l'ordre d'un ordre de grandeur pour la couverture temporaire et peuvent atteindre plus d'un ordre de grandeur pour la couverture intermédiaire et finale, pour une échelle de temps de quelques jours.

Les variations de flux ont été observées pour la couverture temporaire à trois positions (H1, H2 et H3) situées sur des nouveaux points d'émission sélectionnés pendant le scan des émissions de méthane à chaque nouvelle réalisation de la couverture temporaire. Pour une échelle de temps de quelques heures, nous observons dans la Figure 1 des variations des flux d'autant plus élevées que les flux sont importants. Le ratio CH₄/CO₂ était faible et les flux pourraient être considérés comme des flux diffusifs pour ce critère.

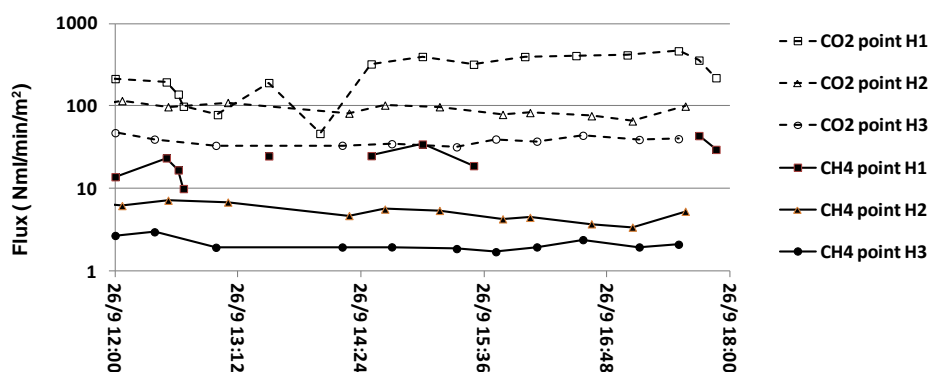


Figure n°1 : variations des flux de méthane et de CO₂ pour une échelle de temps de quelques heures pour la couverture temporaire.

Le flux moyen de méthane provenant du balayage IFM (8 g/m²/jour) était pour cette couverture dans la gamme de celui des 3 points de surveillance des flux de méthane (2,3 à 22 g/m²/jour).

Si l'on considère les couvertures intermédiaire et finale, en raison du mélange des flux diffus et convectifs pour la couverture intermédiaire, et des flux convectifs prédominants pour la couverture finale, les flux moyens des points sélectionnés étaient beaucoup plus élevés que les flux moyens IFM.

Nous avons pu aussi observer une corrélation entre l'évolution des variations des flux et de la pression barométrique pour les couvertures intermédiaire et finale.

L'objectif secondaire de cette étude était de distinguer les véritables émissions diffuses de celles provenant des émissions par convection. Ces émissions convectives sont plus difficiles à évaluer et à identifier et nécessite un scan des émissions de méthane de la surface de la décharge à densité élevée, avec des mesures de flux à haute densité dans les zones d'émission de méthane sélectionnées. Cette fraction de flux de nature convective est également plus élevée que celle observée dans les études antérieures et atteint plus de 50% de l'ensemble des émissions de méthane du site. La contribution du flux de méthane de quelques points de mesure de la couverture intermédiaire et finale était importante et on observe que le ratio de flux CH₄/CO₂ était aussi généralement élevé pour ces deux types de couverture.

Nous pouvons utiliser l'hypothèse que tous les flux diffus de méthane présentent une oxydation du méthane importante si la charge de méthane génère un flux de surface de méthane inférieur à 150 g/m²/jour.

Même si la moyenne des flux diffus mesurés à la surface de la couverture temporaire est supérieure à la somme des flux surfaciques moyens des couvertures finales et intermédiaires, les flux convectifs de la couverture finale étaient prédominants pour le site pilote en raison de la plus grande surface de ce type de couverture. Selon la fraction de surface de la couverture finale, les flux convectifs de méthane pourraient être de plus en plus importants pour les sites d'enfouissement vieillissants.

Ces résultats expliquent la différence entre les taux élevés ponctuels d'oxydation du méthane observés pour les flux diffus et les taux d'oxydation moyens relevés pour l'ensemble des émissions de méthane.

Un jeu de données correspondant aux flux IFM des 3 types de couvertures a été constitué. Il a permis en particulier d'évaluer la dispersion et les flux médians de chacun des types de couverture dans le premier volet de l'étude. Des flux moyens de méthane par zone ont pu être estimés, permettant de réaliser une évaluation du flux total de méthane émis par le site en fin de saison d'été (fin septembre 2011).

Ces données ont servi de base de calage pour le modèle CALMIM. Cet outil comprend un modèle 1D de diffusion et d'oxydation permettant d'estimer l'action de l'oxydation en couverture et d'évaluer le flux résiduel de méthane émis. A partir d'hypothèses sur la nature des éléments constitutifs de la couverture, sur le climat et la fraction dégazée de biogaz, ce modèle évalue un flux diffusif émis avec et sans action de l'oxydation.

Pour la couverture la plus perméable (couverture hebdomadaire), les résultats du modèle CALMIM ont été comparés favorablement aux mesures de flux de méthane réalisées. Le modèle fournit une bonne estimation du flux moyen de méthane émis, concordant avec le flux moyen le moins élevé mesuré. Une calibration réalisée en modifiant la valeur de la concentration moyenne de méthane du biogaz existant sous la couverture a permis de reproduire plus précisément le comportement observé.

Un calage plus fin, en particulier de la variation de l'oxydation du méthane, n'a pu être conduit avec les données disponibles des différentes campagnes de mesure. Une possible rétroaction de la couverture sur les taux de méthane existant à sa base (augmentation du taux de méthane dans le biogaz lors de la saturation progressive de ce type de couverture) pourrait expliquer cette difficulté. Un calage plus fin de la texture de sol (nécessaire du fait de l'importance de la fraction fine) pourrait également améliorer la modélisation.

Dans le cas des couvertures intermédiaires, la variabilité des flux mesurés est plus importante. Les flux estimés par CALMIM sont néanmoins compris dans l'intervalle de l'erreur des mesures et de la variabilité temporelle des valeurs de flux modélisées (fenêtre temporelle considérée de 12 h à 48 h). On note une tendance inverse entre les mesures et la modélisation : alors que le flux diffus résiduel de méthane mesuré se réduit durant l'automne 2011, le flux modélisé augmente du fait de l'influence prépondérante de la décroissance progressive de l'oxydation sur le flux de méthane émis.

Concernant les taux d'oxydation, ceux-ci, mesurés localement, sont très variables (compris entre 0 et 100%). Les taux d'oxydation estimés par CALMIM sont compris entre 91 et 100%.

Dans le cas de la couverture finale, le comportement déjà observé sur les couvertures intermédiaires est plus marqué : le flux calculé par CALMIM est notablement plus élevé que le flux mesuré sur le site, en

particulier en fin de saison automnale : le calage par les données de texture et les données climatologique de base (température, pluviométrie) ne semble pas suffisant. Seule une réduction des flux diffusifs hors oxydation permettrait de réaliser une convergence des valeurs, mais cette réduction n'a pu être réalisée avec les textures de sol proposées.

A contrario, les taux d'oxydation sont relativement bien reproduits, et varient dans une gamme assez proche (59 % – 83% mesurés sur site, 62 % – 100 % modélisés).

Le modèle CALMIM a permis de reproduire l'évaluation des flux diffus pour les périodes les moins humides, en fonction de la texture des couvertures : le comportement des couvertures de type sableuse, plus perméable à l'air, est mieux reproduit pour les 7 campagnes de mesures de flux réalisées.

Ce type de calage n'a pas pu être reproduit de manière aussi précise sur les 2 autres types de couverture, du fait de la prédominance des flux de nature convective au sein de celles-ci.

Dans les cas des textures plus argileuses, dont la saturation reste généralement plus élevée, CALMIM en version 5.1 modélise des flux diffus pour les périodes des saisons automnales, hivernales et de début de printemps qui n'ont pas été observés sur site. La difficulté réside probablement dans la modélisation des circulations de biogaz préférentielles qui sont plus souvent rencontrées dans les matrices complexes argilo silteuses. Il est probable qu'une partie des flux diffus rejoignent ces circulations préférentielles.

L'objectif a été de comparer dans une approche globale la modélisation du site pilote et de deux autres sites par 2 types d'outils : le modèle CALMIM et des modèles de production de biogaz.

Dans une première étape, les résultats de GasSim et de CALMIM sont comparés pour les couvertures de l'ensemble du site pilote.

Le modèle GasSim v2.0 a été utilisé. Les hypothèses de répartition des tonnages des déchets ménagers selon les 3 types de couverture sont présentées, ainsi que les approches utilisées pour l'oxydation du méthane et pour l'évaluation du dégazage.

L'application de la méthodologie proposée par GasSim sur le site pilote amène à évaluer un potentiel d'émission de méthane variant entre 10 % et 14% de la production de méthane, en fonction principalement de la répartition des tonnages sur les différents types de couvertures, les zones les plus anciennes bénéficiant d'un meilleur captage du biogaz.

Des fuites convectives de méthane, sur lesquelles l'oxydation (25%) n'est pas applicable sont estimées à environ 5 à 10% des émissions résiduelles et se substituent aux fuites diffusives : cette substitution augmente assez faiblement le volume des émissions totales de méthane.

Dans le cas de l'utilisation de CALMIM, les émissions totales sont 2 fois plus élevées avant oxydation. Après oxydation (avec un taux variant entre 70 et 83%), ces émissions totales de méthane sont très proches de celles calculées par GasSim (cf Figure 2) et de celles mesurées sur le site (pour l'hypothèse haute).

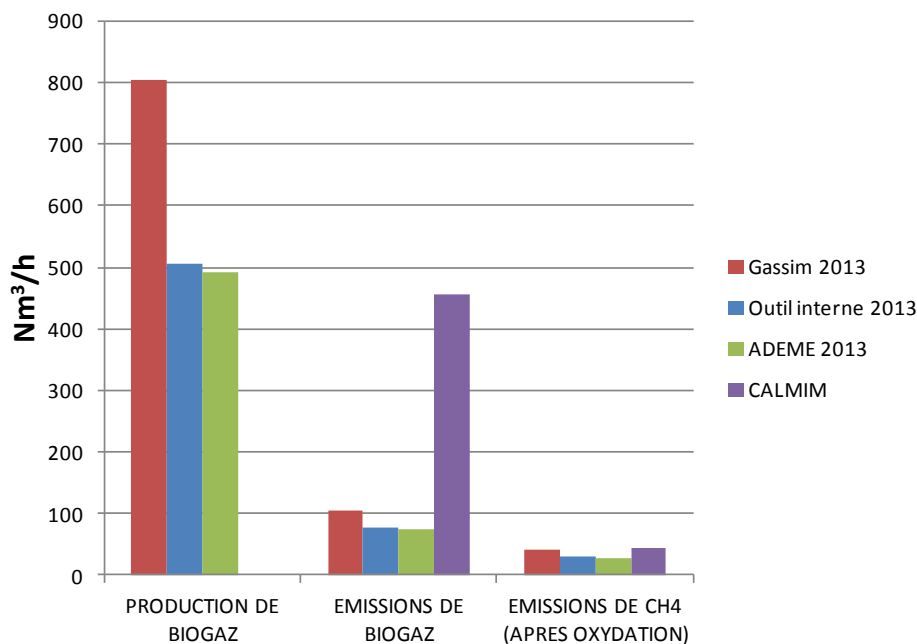


Figure 2 : Production et émissions de biogaz, émissions de méthane résiduelles pour le site pilote et l’année 2013.

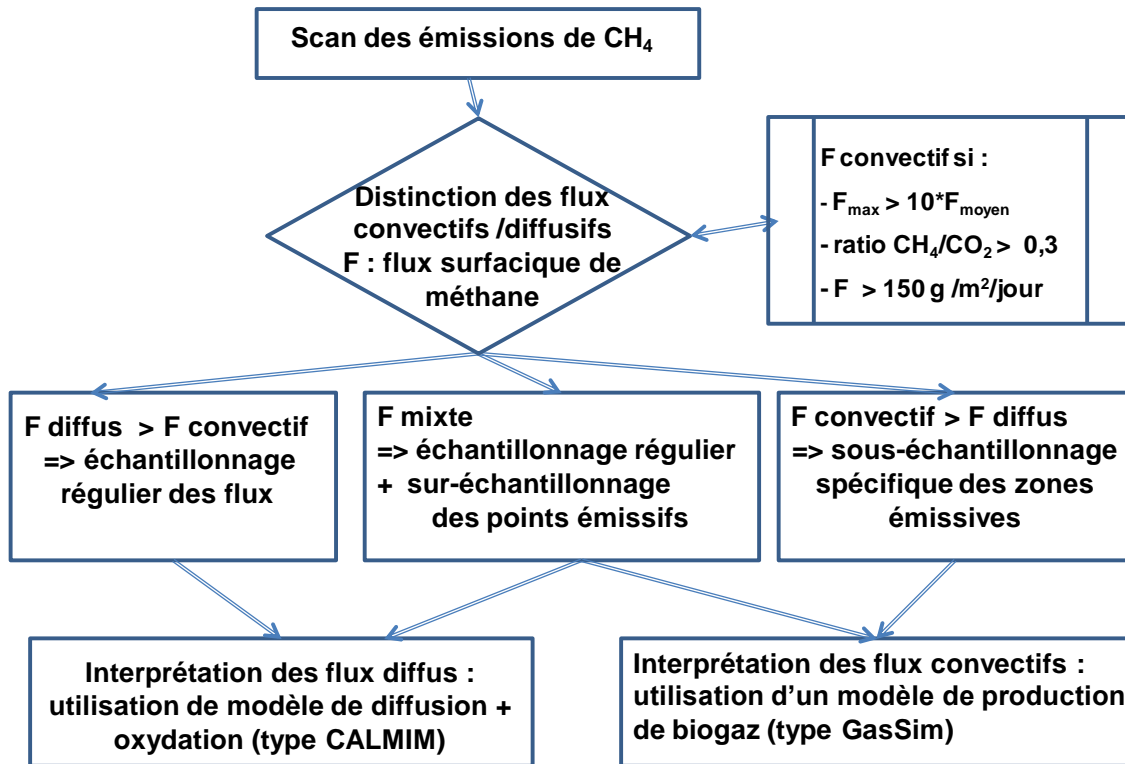
Deux autres modèles de production (un modèle interne permettant de déduire le flux capté et le modèle ADEME) ont été mis en œuvre par SITA sur deux sites complémentaires, dits site 1 et site 2.

Dans le cas du site 1 tous les modèles fournissent des résultats comparables, à l’exception du modèle CALMIM, qui fournit des émissions potentielles de biogaz 2 à 3 fois supérieures aux émissions calculées par les autres modèles. Celles-ci se réduisent ensuite très fortement après oxydation. Le modèle CALMIM sous-estime ainsi probablement les émissions de la zone de couverture finale présente sur des déchets relativement récents (ancienneté inférieure à 10 ans).

Le modèle CALMIM fournit dans le cas du site 2 un flux résiduel de méthane équivalent à l’application des modèles GasSim et ADEME, avec toutefois une répartition des émissions de méthane selon les 3 types de couverture plus proche de celle du modèle ADEME (peu ou pas d’émission sur la zone en exploitation) : les émissions liées à ce type de zone (exploitation) sont difficilement reproduites par les modèles de production. Le modèle CALMIM reproduit globalement le comportement d’un site, car les émissions résiduelles calculées à l’échelle d’un site sont comparables à celles évaluées par une approche classique.

La comparaison des résultats d’émissions résiduelles de méthane calculées par CALMIM avec les mesures sur site et les évaluations des émissions résiduelles de méthane de plusieurs modèles de production de biogaz a permis de remarquer une plus faible adéquation du modèle CALMIM pour les couvertures à dominante argileuse lors de leur saturation progressive en eau. Cette période devra donc être évitée pour réaliser un calage des émissions entre le modèle et les mesures.

Le protocole utilisé pour les mesures et l’interprétation des flux de méthane est reproduit ci-dessous.



Mots Clef : biogaz, émissions, GES, oxydation, mesure

ABSTRACT

Control and reduction of fugitive emissions of methane is one of the challenges of the landfilling of Municipal Solid Waste (MSW). This reduction of the landfill gas (LFG) emissions requires the ability to measure low methane emissions and to use the results in order to evaluate these diffuse emissions on an annual basis. Moreover, the experience of LFG emission measurements demonstrates that the variations of methane fugitive emissions are even more pronounced with low emissions.

A research project “OSSIMED” funded by the French Environment and Energy Management Agency (ADEME) began in the year 2011 with the collaboration of SITA. The main goals were to identify the amplitude and importance of the methane and carbon dioxide emissions variations observed on a landfill site and to give hints for a more robust assessment of the global greenhouse gas emission of a landfill site in operation. A measurement protocol and different time scales were considered. Nine monitoring areas were selected on 3 types of cover (daily, intermediate, final) of a pilot site in order to allow the monitoring of the emissions on an hour, day, week and seasonal basis.

CALMIM and 3 other LFG production modelling tools were used on a pilot landfill site and two other landfill sites in order to identify the behaviour of each tool for the different type of cover.

The methane emission measurements have used a modified instantaneous surface measurements (ISM) methodology (IFM, instantaneous surface flux measurements) in order to evaluate the whole gas fluxes emitted by each cover type. The monitoring of the selected points has used an accumulation chamber with recirculation. Accumulation chambers were also used with the ISM modified method with a good correlation between the two methods. IFM measurements were used in order to give the best coverage of the surface. The methane concentration measurements were made with FID (Flame Ionisation Detector) and Inspectra® methane analyser (laser spectroscopy technology using a laser diode).

The density of the measurements was adapted to the type of emission: the base density was 100 IFM points/ha with a refinement (over sampling) or a specific sampling near the convective fluxes.

The mean value and the variation of methane and CO₂ emissions observed on individual monitoring points were compared. We observed large variations of methane flux coming from the individual monitoring points. The methane surface fluxes variations are generally in the range of one order of magnitude for the temporary cover and reach more than one order of magnitude for the intermediate and final cover for a time scale of a few days.

The variations were observed for the temporary cover with three positions (H1, H2 and H3) located on new emissions points selected during the methane emission scan of each new temporary cover. For a time scale of a few hours, we observe in the Figure 1 more variations for the higher fluxes. The CH₄/CO₂ ratio was low and the fluxes could be considered as diffusive fluxes for this criteria.

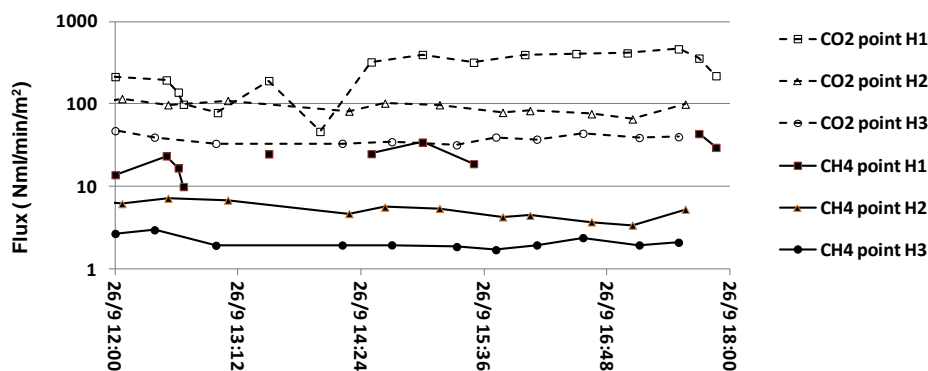


Figure n°1 : variations of the methane and carbon dioxide fluxes on a few hours time scale for the temporary cover.

The average methane flux coming from the IFM scan (8 g/m²/day) was in the range of the methane fluxes monitoring points (2.3 – 22 g/m²/day).

If we consider the intermediate and final cover, due to the mixing of diffuse and convective fluxes for the intermediate cover and predominant convective flux for the final cover, the average fluxes of the selected points were much higher than the IFM average fluxes.

We could also observe a correlation between the trend of the flux variations and the barometric pressure for intermediate and final cover.

The secondary goal of this study was to distinguish the real diffuse emissions from the convective emissions. These convective emissions were more difficult to assess and identify and need high density methane emission scan of the landfill surface with high density flux measurements for the selected methane emissions area. That methane convective fluxes fraction is also higher than observed in the previous studies and reach more than 50% of whole site methane emissions. The methane flux contribution of a few measurement points of the intermediate and final cover was important and we observe that the CH₄/CO₂ flux ratio was also generally high for these two types of cover.

We can use the assumption that all the methane diffuse fluxes exhibits a significant methane oxidation if the methane load generates a methane surface flux lower than 150 g/m²/day.

Even if the mean methane surface diffuse flux of the temporary cover was higher than the sum of the mean final and intermediate cover surface fluxes, the convective fluxes of the final cover were predominant due to the larger surface of this type of cover for the pilot site. Depending of the surface fraction of the final cover, the methane convective fluxes could be more and more predominant with ageing landfills.

These results explain the difference between the punctual high methane oxidation rates observed for the diffuse fluxes and the medium oxidation rate observed for the whole methane emissions.

A data set corresponding to the IFM fluxes of the 3 types of coverage was established. It allows in particular to evaluate the dispersion and median flux for each type of cover in the first part of the study. Average methane flux per area have been estimated to make an assessment of the total methane flux of the pilot site at the end of summer season (late September 2011).

These data constitute the basis for the calibration of the CALMIM model. This modeling tool includes a 1D model of diffusion and oxidation to estimate the action of oxidation in the landfill covers and assess the residual methane flux. From hypothesis concerning the nature of the soils components of the cover, climate and degassed LFG fraction, the model estimates a diffuse flux emitted with and without action of oxidation.

For the most permeable (weekly) cover, CALMIM model results were compared favorably with the flux measurements of methane emissions. The model provides a good estimate of the average flux of methane emissions, consistent with the lowest average methane flux measured. Calibration performed by changing the value of the average concentration of methane in the biogas located below the cover allows to reproduce the observed behavior.

Finer settings, particularly concerning the variation of the methane oxidation could not be carried out with the data of the various measurement surveys. A possible feedback of action of the cover on LFG methane concentration levels existing in the basement of the cover (increased methane concentration in the landfill gas for a gradual saturation of this type of coverage) could explain this difficulty. A finer soil texture calibration (necessary due to the importance of the soil fine fraction) could also improve the modeling.

In the case of intermediate cover, the variability of the measured flux is more important. Fluxes estimated by CALMIM are still within the range of measurement error and of the temporal variability of modeled flux values (with a time window of 12 to 48 hours). A reverse trend is noted between the measurements and the modeling values : while the residual measured diffuse methane fluxes has decreased in autumn 2011, the modeled flow has increased due to the overwhelming influence of the progressive reduction of oxidation on the methane fluxes.

Concerning the oxidation rate, these values, measured locally, are highly variable (between 0 and 100%). The oxidation rates modeled by CALMIM are between 91 and 100%.

In the case of the final cover, the behavior trend already observed in the intermediate cover is greater : the flux calculated by CALMIM is significantly higher than the flow measured at the site, especially in late fall season: the calibration by the data texture and climatological data (temperature, rainfall) does not seem enough. Only a reduction of diffuse fluxes without oxidation would allow this convergence of values, but this reduction could not be achieved with the proposed soil textures.

In contrast, the oxidation rates are relatively well reproduced, and vary in a fairly close range (59% - 83% measured on site, 62% - 100% modeled).

The CALMIM model has allowed to reproduce the diffuse flux for the least humid periods, depending on the soil cover texture: the behavior of sandy cover, more permeable to the air, is better reproduced for the seven flux measurements surveys.

Such type of calibration could not be reproduced as accurately with the two other types of cover, because of the predominance of convective flux within them.

In the case of the more clayed soil textures, where cover water saturations remain generally higher, CALMIM version 5.1 calculates methane diffuse flux for periods of fall, winter season and early spring which were not observed on site. The problem probably also lies in the modeling of biogas preferential pathways, which are more often found in complex silty clay matrix. It is likely that some of these diffuse fluxes join preferential fluxes pathways.

The objectives was also to compare in a comprehensive modeling of the pilot site (and two other sites) two types of tools: the CALMIM model and models of biogas production.

In a first step, the results of GasSim and CALMIM were compared for the covers of the whole pilot site.

GasSim v2.0 model was used. Assumptions of MSW tonnages allocation according to three types of cover are presented, as well as the approaches used for the methane oxidation and for the evaluation of degassing.

The application of GasSim methodology on the proposed pilot site leads to assess the potential of methane emissions between 10% and 14% of methane production, based primarily on the distribution of MSW tonnages on the different types of covers, oldest areas having the best biogas collection.

Convective methane leaks on which oxidation (25%) is not applicable is estimated at about 5 to 10% of residual emissions and replace the diffusive leaks: this substitution increases relatively low volume of total methane emissions.

In the case of using CALMIM, total emissions are 2 times higher before oxidation. After oxidation (with a rate between 70 and 83%), the total methane emissions are very close to those calculated by GasSim and those measured on site for the high case (see in Figure 2).

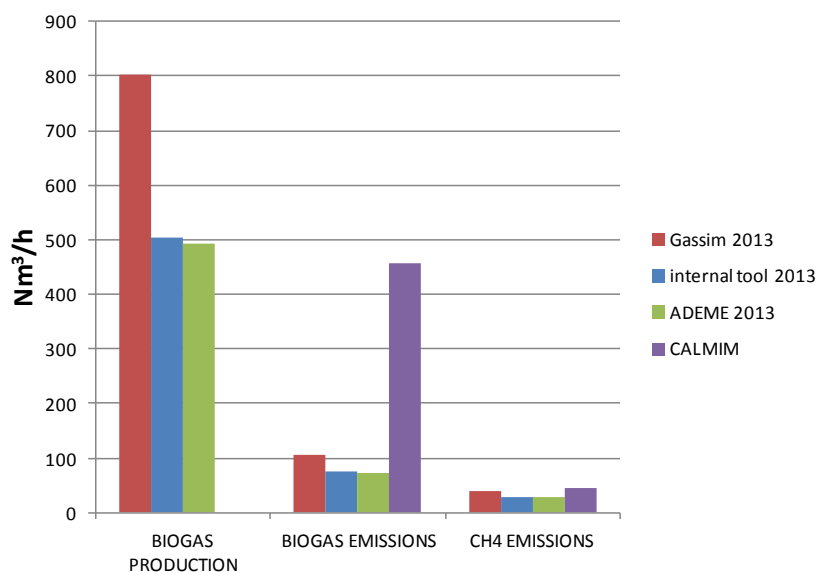


Figure 2 : biogas production and emissions, residual methane emissions for pilot site and the year 2013.

Two other models of LFG production (an internal model of SITA which allows to deduce the recovered methane flux, and ADEME model) were implemented by SITA on two additional sites known as Site 1 and Site 2.

In the case of Site 1 all models provide comparable results, with the exception of CALMIM model, which provides potential biogas emissions 2-3 times higher than the emissions calculated by the other models. These are then drastically reduced after oxidation. The CALMIM model underestimates probably the emissions coming from the final cover area of relatively recent waste (less than 10 years old).

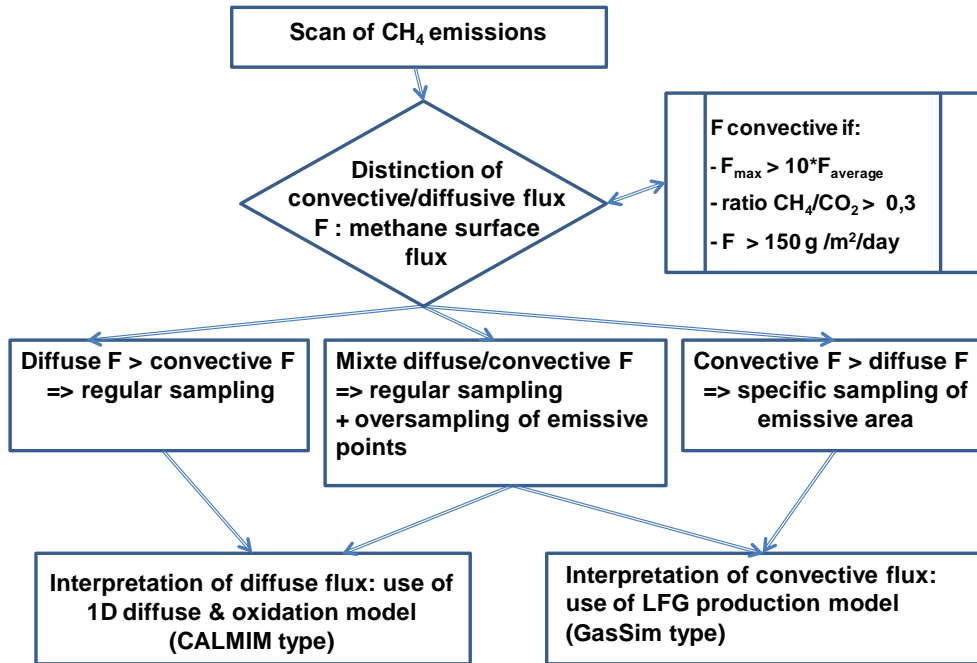
The CALMIM model provides in the case of site 2 an equivalent residual flux to the application of GasSim and ADEME models, but with a distribution of methane emissions from the three types of cover closer to the ADEME model (little or no emission of operating area): emissions from this type of area (operating area) are hardly reproduced by production models without specific assumptions.

CALMIM model reproduces the overall behavior of landfill site emission. Residual emissions calculated on the scale of a site are comparable to those measured by a conventional estimation.

The comparison of the residual methane emissions obtained from CALMIM with pilot site measurements and with the assessments of residual methane emissions of several models of biogas production has noted

a lower adequacy of CALMIM model for the clayed covers during their gradual water saturation. This period should be avoided to achieve a calibration between the model and the measurements.

The used protocol of measurements and interpretation of methane flux was resumed in the scheme below:



PREAMBULE

L'évaluation des émissions diffuses de gaz à effets de serre (GES) fait l'objet d'applications de plus en plus généralisées aux activités de toute nature.

Les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) ont bénéficié des premiers travaux métrologiques concernant l'estimation de la production de GES.

Il demeure que les modèles de production de GES ne tiennent pas compte de manière autre que forfaitaire des travaux réalisés sur les émissions diffuses des couvertures et sur l'oxydation du méthane. Le programme OSSIMED réalisé par l'INERIS, en collaboration avec SITA, a pour objectif d'étudier les variations des émissions et de valider l'utilisation des outils disponibles pour préciser les émissions annualisées de GES sur les ISDND.

Ce rapport présente la méthodologie, son application sur un site pilote ainsi que sur deux sites complémentaires.

Les travaux de mesure sur site ont été réalisés par deux équipes de techniciens de l'INERIS.

1 Introduction

1.1 Rappel du contexte

La diminution des émissions diffuses de méthane constitue un des enjeux des installations de stockage des déchets non dangereux (ISDND). Cette réduction des émissions suppose de pouvoir mesurer des faibles émissions de méthane et de pouvoir utiliser les résultats obtenus dans une optique d'évaluer ces émissions diffuses sur une base annuelle.

Les discussions entre experts de la commission AFNOR X43B ont mis en évidence la nécessité de disposer de moyens de mesure des émissions diffuses mais également d'outils et de protocoles pour permettre une utilisation plus rationnelle des résultats obtenus à un moment donné de l'exploitation et à une période donnée du comportement des couvertures argileuses.

L'expérience des mesures de flux réalisées à l'INERIS permet de retenir que la variation des émissions diffuses est d'autant plus prononcée que ces émissions sont faibles. L'incertitude sur les résultats a ainsi tendance à croître avec la réduction des émissions, et ceci est constaté pour l'ensemble des méthodes de mesure. Des facteurs tels que la variation dans le temps des émissions suite aux opérations de maintenance du réseau et de la valorisation du biogaz, ainsi que la variation des paramètres climatiques, influencent fortement les émissions. L'implication de l'exploitant apparaît nécessaire dans le suivi compte tenu de sa maîtrise du réseau de captage.

La prise en compte du suivi des concentrations à la surface des casiers apparaît par ailleurs nécessaire à l'extrapolation annuelle des résultats des émissions diffuses.

De nouveaux outils de modélisation susceptibles d'évaluer les réductions des flux par les caractéristiques de la couverture et par l'oxydation du méthane apparaissent (CALMIM, California Landfill Methane Inventory Model (US)). Or ces nouveaux outils, supposent implicitement de pouvoir réaliser un calage des émissions modélisées à un moment donné.

L'INERIS met en œuvre depuis plus de 15 ans une méthode de mesure de flux par chambre, validée lors d'essais d'intercomparaison réalisés en 1995 (Savanne & al., 1995, 1997). Le couplage de la mesure des flux avec la réalisation de mesures instantanées à la surface (méthode Instantaneous Surface Measurements (ISM) californienne modifiée) et le suivi des paramètres hydriques de la couverture par un suivi météorologique est proposé par l'INERIS pour combiner la validation des outils disponibles et l'intégration et la valorisation des suivis effectués par l'exploitant (SITA).

1.2 Objectifs du projet

L'objectif du projet OSSIMED réalisé par l'INERIS est de tester et mettre en œuvre, en collaboration avec un exploitant (SITA), un protocole de suivi et de mesure des émissions diffuses sur 3 types de couvertures de centre de stockage (journalière, intermédiaire et finale), avant extrapolation à l'ensemble du site. Ce protocole comprendra l'ajustement des paramètres traitant de la description du comportement des couvertures afin de disposer d'outils calibrés et de protocole de suivis et d'extrapolation des émissions diffuses à l'échelle annuelle, à partir des données spécifiques au site.

Le projet comprend l'application de la méthode CALMIM (California Landfill Methane Inventory Model) à l'ensemble d'un site réel, et donc de tester la faisabilité de cette méthode en considérant les divers types de couvertures existant sur un site.

L'originalité du projet est de proposer un moyen de traiter les verrous classiquement rencontrés, à savoir les problèmes de variations de l'importance des émissions diffuses en prenant en compte plusieurs échelles de temps, et en utilisant une méthode de mesure calibrée sur banc.

1.3 Objectifs du rapport

Ce rapport constitue la synthèse des travaux réalisés au cours du projet : il présente les travaux concernant la mise au point des protocoles, les résultats des mesures de suivi ainsi que les interprétations de ces mesures et les modélisations des flux résiduels de méthane.

Les éléments de réflexion sur les paramètres influents et leur prise en compte dans l'interprétation des mesures en vu de remonter à un flux annuel, ainsi que les outils de modélisation sont présentés.

Ce rapport réalise la synthèse des éléments d'interprétation liés à l'application de la méthodologie sur un site pilote et à la modélisation des flux sur deux autres sites complémentaires.

Le rapport a distingué les flux dits « diffusifs » concernés par l'oxydation du méthane des flux dits « convectifs », plus élevés et peu ou pas concernés par l'oxydation. Ce rapport traite plus particulièrement le cas des flux diffusifs rencontrés tout en estimant pour le site pilote la part des flux convectifs.

Les flux convectifs principaux ont été rencontrés autour des puits de biogaz.

Ce rapport présente une première estimation des flux convectifs liés aux puits, qui devra encore être affinée dans de futurs travaux de recherche, du fait des difficultés rencontrées :

- le changement d'échelle d'échantillonnage a été utilisé sur site, ainsi qu'une interprétation en plusieurs étapes (qui pourra encore être améliorée) ;
- l'extrapolation des résultats nécessitera des vérifications ultérieures. Cette extrapolation a été réalisée en considérant un ratio de surface pour les flux du même ordre de grandeur que les flux diffus et un ratio lié au nombre de puits pour les flux plus élevés (flux convectifs).

1.4 Rappel des travaux réalisés

Les travaux se sont déroulés sur plusieurs étapes comprenant :

- la sélection du site et des zones d'étude plus particulières de suivis métrologiques des émissions (début 2011) ;
- l'adaptation en laboratoire et sur site de dispositifs de ventilation automatique de chambre aux fréquences de mesures envisagées (premier semestre 2011) ;
- la réalisation de mesures exploratoires sur site (juin 2011) ;
- la réalisation du démarrage d'un suivi annuel des émissions de méthane, comprenant le scan d'une grande partie du site (septembre 2011) ;
- le démarrage du suivi temporel des émissions des zones sélectionnées, d'une fréquence infra horaire à saisonnière comprenant 6 campagnes de mesure (de septembre 2011 à fin novembre 2012) : début juin 2011(tests), fin septembre 2011 (démarrage et scan total du site), mi novembre 2011, fin novembre 2011, février 2012, fin mai 2012, novembre 2012.
- le dépouillement des mesures de 2011 et l'édition du rapport intermédiaire d'avancement (aout 2012) ;
- le dépouillement des mesures de 2012 et le calage du modèle CALMIM (début 2013) ;
- la comparaison des résultats des modèles (GasSim, modèle interne SITA, modèle ADEME, CALMIM) et l'édition du rapport final (mars - avril 2013).

Ces travaux ont fait l'objet d'une collaboration avec SITA, en particulier dans la mise en œuvre de modèles internes et ADEME d'évaluation des débits résiduels non captés, permettant ainsi la comparaison avec les outils GasSim et CALMIM.

2 Présentation du site pilote

Le site pilote a été sélectionné sur les critères de disponibilité de zones de couvertures différenciées pendant 12 mois et la présence de couvertures de nature argileuse n'intégrant pas de géomembrane.

Les critères spécifiques au programme OSSIMED comprenait la possibilité de faire un « scan » complet du site, de suivre les différents types de couverture sur une année, moyennant des adaptations nécessaires (changement de zones de suivi) pour les couvertures intermédiaires et hebdomadaires et de permettre la mise en place d'une station météorologique sur site.

Le site pilote retenu est une ISDND en exploitation, disposant d'une zone réaménagée ancienne avec plusieurs types de couverture argileuse, de zones de couvertures intermédiaires argileuses et d'une zone en exploitation.

3 Présentation des zones d'études

Une présélection des casiers et des alvéoles les plus intéressantes a priori pour le suivi des émissions de méthane a été réalisée avec l'exploitant. La zone aménagée ou réaménagée comprend 6 types différents de couverture.

Les caractéristiques des différentes zones et des zones retenues (grisées) sont présentées dans le Tableau 1 ci-dessous et dans l'annexe 2.

Tableau 1 : Tableau des caractéristiques des couvertures du site retenu (2011)

Type de surface	Matériaux et épaisseur	Surface plane* en ha	Choix retenu pour le programme OSSIMED
Alvéoles 1 & 2	Argile 1 m et géomembrane	3,8 ha (zone 2 A)	Pas de travaux (présence de géomembrane)
Alvéoles 3 & 4	Argile 1 m		Représentant de la couverture intermédiaire
Alvéole 5 (en exploitation)	Sable (30 cm)		Représentant de la couverture hebdomadaire (temporaire)
Surface réaménagée antérieurement à 1997	Argile 1 m + terre végétale 50 cm	9,9 ha (zone 1 A)	Représentant d'une couverture finale peu épaisse (antérieure à 1997)
Surface réaménagée en juin 2009	Argile 6 - 7 m + 30 cm de terre végétale	12 ha (zone 1B et 1C)	Représentant de la couverture finale
Surface réaménagée	80 cm d'argile	2,5 ha (zone 1D)	Casier 11 : autre représentant de la couverture intermédiaire, de type mixte intermédiaire/final

* : la variation de surface entre les surfaces planes et développées étant de l'ordre de 1% pour ce site, seule la surface plane sera considérée par la suite par souci de simplification.

Au nord on distingue ainsi les alvéoles 1 à 5, dont seulement les alvéoles les plus récentes ne disposent pas encore de géomembranes en couverture (alvéoles 3 à 5).

Le site comprend également une partie ancienne réaménagée, avec une épaisseur de matériaux argileux très variable (entre 7 m et 30 cm).

La présence de travaux durant la période de suivie sur site (fin septembre 2011 – fin novembre 2012) a été signalée par l'exploitant, sans pouvoir toutefois planifier exactement la durée de vie des couvertures. Cette contrainte supplémentaire portant sur les zones intermédiaires (alvéoles 3 & 4 essentiellement) et les zones de couvertures hebdomadaires, des campagnes de mesures complémentaires ont été programmées et réalisées par l'INERIS en novembre 2011 et février 2012 pour obtenir un recouvrement du suivi sur une période plus longue.

Le choix d'un site comportant des travaux prévus pendant la période de suivie a amené à accepter ces contraintes d'exploitation inhérentes à la plupart des sites.

Pour chaque site, les types de couverture et de dégazage mis en œuvre peuvent varier selon les alvéoles. Dans le cas du site pilote retenu, le dégazage est réalisé par des puits mis en place progressivement a posteriori, en particulier pour les couvertures intermédiaires. Cette distinction a été réalisée pour l'application de la méthodologie CALMIM, afin de pouvoir considérer les surfaces réellement hors de l'emprise du captage.

4 Test de la méthodologie – mise en œuvre des mesures de calage

4.1 Test de la méthodologie suivie pour l'application de la modélisation par CALMIM

La méthodologie propre à CALMIM propose d'extrapoler le comportement d'un site en considérant les divers types de couvertures et les composantes météorologiques.

La méthodologie CALMIM est proposée par les auteurs sans calage, mais il apparaît que des paramètres concernant les conditions aux limites du modèle (concentration de méthane dans le biogaz, implantation des dispositifs de drainage,...) nécessitent un calage des résultats sur des mesures réalisées sur site.

Pour cela, le choix de 3 types représentatifs de couvertures a été prévu afin de pouvoir représenter les divers comportements émissifs des alvéoles et casiers de la zone de stockage (dans le but de pouvoir suivre les variations des émissions sur plusieurs échelles temporelles et de pouvoir comparer ainsi la modélisation et les émissions mesurées).

Afin de mieux connaître ces émissions de méthane et leur variabilité, des mesures exploratoires (campagne FID, mesures de flux) ont été réalisées par l'INERIS sur une zone du site sélectionné en juin 2011. L'objectif de ces mesures exploratoires a été d'identifier l'importance et la répartition des flux surfaciques de méthane sur une zone et la variabilité journalière de fuites de méthane au travers de la couverture. La réalisation et les résultats de ces reconnaissances sont présentés dans la section suivante.

La mise en œuvre des mesures de flux à fréquence plus élevée a ainsi été testée en juin 2011 sur un point d'une zone pré-sélectionnée du site correspondant à une zone ancienne, déjà reconnue.

Le choix du point de mesures complémentaires de flux à cadence plus élevée a été réalisé suite à la réalisation d'un scan (flux instantanés de méthane).

Ce point de mesure « pilote » pour la phase de test a été implanté à proximité d'un dispositif de suivi de la pression en continu mis en œuvre à cette occasion sur 5 points (puits 3 et 5, ainsi que sur 3 cannes de mesures de pression).

Lors du test, l'objectif était de pouvoir comparer les évolutions de la pression barométrique et de la pression de biogaz aux variations de flux sur une zone ancienne. Il faut noter que, outre les émissions et les flux surfaciques de méthane, les flux de CO₂ ont également été suivis sur une fraction des points d'échantillonnage.

4.2 Mise en œuvre du suivi de type « scan » + « chambre »

4.2.1 Méthodologie

Dans le but de disposer de valeurs de références et de calage de flux, une utilisation combinée de méthodes de mesure de flux décrites (chambre à flux, mesure instantanée de concentration) et largement utilisées a été utilisée, en considérant l'applicabilité de ces méthodes pour la mesure de l'ensemble du site.

Les tests prévus ont considéré successivement les principales difficultés, à savoir la méthode de couplage entre les mesures par flux et les mesures de type « concentration instantanée », ainsi que l'échantillonnage des flux.

4.2.2 Tests de couplage de méthodes de mesure de flux de biogaz

Les dispositifs de mesure utilisés comprennent des analyseurs de gaz associés à des dispositifs d'échantillonnage surfaciques des gaz.

Si la mesure par chambre à flux est souvent utilisée, son principal inconvénient provient de la nécessité de réaliser cette mesure un grand nombre de fois pour disposer d'un échantillonnage représentatif des mesures. L'INERIS a ainsi développé une utilisation combinée de mesures rapides de type ISM optimisées (Instantaneous Surface Measurements optimisées) et de mesures de type chambre à flux pour répondre à l'objectif de disposer d'une méthode fiable et relativement rapide, applicable sur l'ensemble des sites.

Des mesures de concentration sont ainsi enregistrées sur un intervalle court (20 - 30 secondes) au niveau d'une chambre cloche simplifiée de type statique et de dimension plus faible (diamètre de 0,2 m). Ces mesures instantanées de quasi-flux s'apparentent aux mesures ISM mais sont beaucoup plus robustes : elles sont présentées dans ce rapport sous le sigle IFM (Instantaneous Flux Measurements).

La mise en œuvre des mesures rapides de concentrations et de flux de méthane à la surface du site, utilise une canne-cloche associée à un analyseur ainsi qu'un dispositif de repérage de type GPS. Ce type de canne-cloche a fait l'objet d'optimisation et de test pour l'utilisation rapide sur site (Kheffi A. & al, 2009) en combinaison avec la chambre INERIS.

Ces travaux précédents réalisés avec l'ISSEP¹ ont permis de sélectionner un type de canne-cloche permettant d'obtenir la meilleure corrélation avec la chambre à flux INERIS, celle-ci disposant d'un calage sur banc d'essais des flux surfaciques. L'objectif a été d'obtenir un coefficient de corrélations le plus élevé, celui-ci variant couramment entre 0,6 et 0,99 selon les conditions de mesures, les dispositifs et les traitements appliqués lors de l'interprétation.

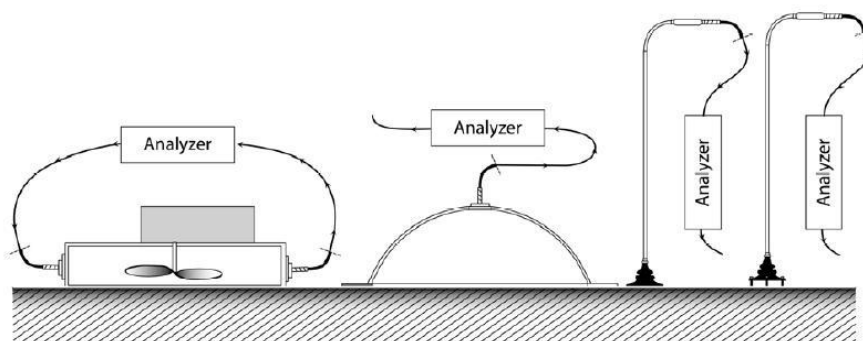


Figure 1 : Types de chambre utilisés : à gauche la chambre à flux INERIS, en allant vers la droite des cannes cloches de diamètres différents associé ou non à une surélévation (d'après Kheffi A. et al, 2009)

Il faut noter que la corrélation obtenue entre les divers types de canne-cloche est fortement dépendante de leur sensibilité au vent et nécessite ainsi un filtrage des conditions de vent (limite communément applicable de vitesse de vent : 3 m/s). Ce filtrage peut être réalisé sur site ou a posteriori, mais il complique alors l'interprétation des mesures.

¹ Institut Scientifique de S'ervice Public. L'INERIS collabore avec l'ISSEP depuis plus de 5 ans, pour améliorer les techniques de mesure des émissions diffuses

4.2.3 Stratégie d'échantillonnage des gaz

Outre le nombre de points souvent insuffisant, la répartition de ces points constitue souvent un des écueils de l'échantillonnage des gaz provenant de la couverture.

Les mesures de flux ont ainsi été réalisées historiquement par l'INERIS de manière systématique, à un pas d'échantillonnage compris entre 5 et 20 m et repérées à une précision métrique par GPS, sur les zones potentiellement reconnues comme les plus favorables lors d'une visite préliminaire du site.

Cet échantillonnage comprenait une part d'adaptation au terrain, la maille de mesures étant réduite lors de la rencontre de flux non nuls ou remarquables.

Ces zones de flux non nuls sont liées le plus souvent à la conjonction de deux facteurs :

- le positionnement en dehors du rayon effectif de dégazage du système de drainage du biogaz ;
- la présence de désordres mécaniques ou d'une insuffisance dans le couple perméabilité/épaisseur de la couverture.

Les mesures de flux réalisées par l'INERIS ont montré que sous l'impulsion des politiques de réduction des émissions de biogaz (mais aussi essentiellement de réduction des volumes de percolats engendrant des volumes de lixiviats à traiter), la perméabilité et l'épaisseur de la couche argileuse ont augmenté au cours des années 2000.

Les émissions essentiellement diffuses liées à un défaut d'épaisseur ou de perméabilité de la couverture ont fait place progressivement à des émissions plus localisées, de type point chaud « hot spot », plus difficiles à capter par un schéma d'échantillonnage classique.

Un schéma d'échantillonnage associant les émissions diffuses et les points remarquables a été nécessaire.

Concernant ces points remarquables, les ruptures de pentes, bordures de casier, on vu leur influence décroître avec l'augmentation de l'épaisseur d'argile, alors que la multiplication des puits de dégazage sans association avec une « jupe » d'étanchéité a fortement augmenté l'incidence des fuites autour de ces puits.

Ces observations ont été confirmées sur le site pilote étudié. Ainsi les zones d'émission de biogaz observées sont liées essentiellement aux couvertures intermédiaires et hebdomadaires et à certains puits de biogaz.

Dans la zone aménagée antérieurement à 1997, plus ancienne, l'efficacité de la couverture argileuse (épaisseur/perméabilité) est moins importante, et des zones d'émissions ont été observées (elles font l'objet de l'application de dispositifs passifs de type fenêtres/anneaux oxydants).

La stratégie d'échantillonnage des gaz a ainsi considéré deux étapes :

- l'investigation des surfaces hors puits ;
- une focalisation sur les puits se révélant émissifs.

Dans une première étape dite « exploratoire » (juin 2011), les mesures ont été réalisées par analyse de la concentration instantanée en méthane à la canne-cloche à la surface du sol, avec une densité de point de l'ordre de 100 points/ha.

L'objectif de ces premières mesures est de fournir des indices sur la répartition des flux et leur liaison avec les dispositifs de captage, à savoir les puits.

Dans une seconde étape, des mesures à la canne-cloche et à la chambre à flux ont été réalisées autour de points de scan remarquables avec des schémas de répartition différents, plus ou moins denses en fonction des émissions observées.

4.2.4 Densité des mesures

La densité des mesures est fonction du type de couverture, du captage et des déchets présents.

On doit distinguer plusieurs types de couverture selon l'avancement de l'exploitation :

- les couvertures temporaires ou journalières, qui ne disposent pas toujours de captage à l'avancement. Les émissions mesurées sur celles-ci sont généralement de type « diffus » ;
- les couvertures intermédiaires comprenant le plus souvent un niveau argileux d'épaisseur minimale comprise entre 30 et 50 cm. En fonction du captage et de la période de mesure, l'efficacité de la couverture est très variable (et généralement faible en été ou celle-ci subit une déshydratation et l'apparition de fente de dessiccation) : on assiste donc à une répartition des flux plus ou moins orientée par les fissures (cf. rapport final de la convention ADEME ISOBIOGAZ) ;
- les couvertures finales, comprenant généralement outre un niveau argileux, la présence d'une épaisseur de terre végétale ou assimilée permettant la prise en compte de l'oxydation du biogaz. Cependant les travaux ont montré qu'une partie importante des flux était liée à la proximité des puits de dégazage, du fait d'un affaiblissement mécanique de la couverture à proximité de ces puits.

Ces travaux ont ainsi amené à considérer différents types de répartition des flux :

- une répartition de type diffuse dans le cadre des couvertures journalières ou temporaires, généralement perméables ;
- une répartition mixte diffuse/hot spot dans le cadre des couvertures intermédiaires ;
- une répartition orientée des flux dans le cadre des couvertures peu perméables (émissions de type « hot spots » à proximité des puits et des limites de couverture).

Des densités différentes de mesure de type IFM ont ainsi été testées dans les zones émissives (à proximité des puits dans la zone de couverture finale) sur la zone aménagée antérieurement à 1997..

4.2.5 Application de la méthodologie à l'échelle du site étudié

L'INERIS s'est associé avec l'ISSEP, chargé du contrôle et de la réalisation des mesures de flux diffus de méthane sur 10 sites wallons) pour développer un protocole de suivi des émissions diffuses de méthane applicable au contrôle en routine des installations de stockage des déchets non dangereux (ISDND). Ce développement comprend une part métrologique et une part de développement des outils d'interprétation des résultats par le biais de méthodes statistiques et géostatistiques.

Le protocole à appliquer comprend 3 étapes. Ce protocole a été développé à partir du premier protocole diffusé au Royaume-Uni (« guidance on monitoring landfill gas surface emissions », LFTGN 07 (2004)), qui a été complété et modifié pour obtenir une précision significativement plus importante de l'estimation des flux.

Cette augmentation de la précision a été obtenue par la réalisation d'une densité de base de mesures de concentrations plus importante, tout en maîtrisant les temps et les coûts de mesure.

A titre d'exemple, la densité de mesures de flux proposée par le document LFTGN 07 atteint 21 points par hectare.

L'INERIS propose de réaliser dans un cas standard une densité de 100 points par hectare de mesures de type IFM, qui seront corrélées avec 10 à 20 mesures de flux, permettant ainsi de considérer de manière significativement plus précise l'hétérogénéité spatiale des flux.

4.2.6 Points remarquables et densité de mesure

Comme remarqué plus haut, les points émissifs particuliers représentés par l'environnement des puits peuvent représenter la majorité des émissions, voire la quasi-totalité suivant les types de couvertures.

L'environnement des puits a été considéré comme un sous-domaine de l'espace nécessitant un traitement particulier.

La densité de mesures dans ce domaine a été considérée comme dépendante des émissions constatées en explorant successivement des distances de plus en plus éloignées du puits : un schéma de base d'échantillonnage de 2 à 6 points à une distance de 0,5 à 1,5 m du puits considéré est reproduit selon une deuxième couronne, comportant également si nécessaire des points complémentaires. Ces points complémentaires sont laissés à l'appréciation du technicien réalisant les mesures. Celui-ci ayant toute latitude pour décaler les points en orientation (décalage de 45° par exemple pour reproduire un motif en quinconce) et en distance au puits (décalage de 1,5 m).

L'importance des flux surfaciques de méthane suit en effet généralement une tendance à la réduction en fonction de l'éloignement du puits selon le rayon considéré. Cette fonction est cependant dépendante des considérations mécaniques, une augmentation du flux pouvant être observée après une première diminution. Ces variations de flux sont liées à l'état de la couverture à proximité des puits, les zones en flexion étant plus susceptibles de fournir des émissions du fait de fissures dans la couverture argileuse.

On a considéré différemment les zones hors de l'emprise des puits, mais pour évaluer les flux totaux, les flux liés aux puits ont été réintroduits dans le jeu de données servant aux statistiques et à l'interpolation par krigeage des flux élémentaires ponctuels.

En se plaçant volontairement à distance des puits on limite leur influence, bien que celle-ci puisse être plus importante à partir d'une certaine distance du puits : la position des lignes de courant du biogaz capté dépend de la profondeur de la zone crépinée des puits.

L'augmentation de densité des mesures a été testée sur les zones émissives que sont les environnements des puits en réalisant des schémas d'échantillonnage allant de 2 à plus de 12 points dans une maille de 10 * 10 m.

La présence de hot spot a ainsi été traitée par le choix de densité forte de mesures au sein de maille de 10 * 10 m : ceci a permis d'explorer et de considérer des densités de mesure très élevées, qui ne peuvent être utilisées à grande échelle (ni même à l'échelle de l'alvéole).

Les densités explorées sont présentées dans le **Tableau 2** suivant. Elles correspondent pour la plupart à des densités autour de puits et de quelques autres points remarquables.

Dans le cas du dôme, l'épaisseur de l'argile (6 - 7 m) et la surface importante de la zone (12 ha) ont amené à limiter la densité de mesure pour mettre à profit une densité plus forte sur les points remarquables (puits 25 et 37 de la zone, et autres puits).

Tableau 2 : Densités d'échantillonnage de mesure de concentrations instantanées utilisées

Nombre de points utilisés par le schéma d'échantillonnage pour une zone de 10* 10 m	Densité équivalente (par ha)	Puits/points concernés
1 point	100 points/ha	Ensemble des zones, densité de base hors zone du dôme
2 points	200 points/ha	Points à flux non nuls
3 – 4 points	300 - 400 points/ha	Points et puits à flux faibles
8 – 10 points	800 – 1000 points/ha	Points et puits à flux moyens à forts
14 - 16 points	1 400 – 1 600 points/ha	Zone ancienne à flux moyens à forts
18 – 21 points	1 800 – 2 100 points/ha	Puits ancienne à flux moyens à forts

4.2.7 Exploitation en flux total

L'objectif final du projet est de pouvoir comparer les évaluations locales et globales des flux provenant des mesures et des modèles sur une base annuelle.

Des éléments de bibliographie montrent que les variations des émissions sont très importantes dans l'année et que celles-ci représentent probablement la part la plus importante des erreurs lorsque que l'on considère des valeurs issues de mesures comme invariable dans l'année.

L'INERIS a ainsi constaté par le passé que la réalisation de campagne des mesures de flux sur 3 semaines comportant en début de chaque semaine la répétition des mesures sur une même alvéole a montré des variations de l'ordre de 20 à 30% du flux total, en considérant plus de 20 points de mesures équitablement répartis sur la zone, dans une configuration de couverture semi perméable aux gaz. Cette constatation est supposée généralisable pour des périodes sélectionnées dans l'année pour représenter des « conditions moyennes » de température et d'humidité dans la couverture, à savoir généralement les périodes d'inter-saisons (milieu / fin du printemps, début / milieu de l'automne).

La comparaison des flux locaux (sur une alvéole d'un type spécifié de couverture) et globaux (sur site) suppose donc de pouvoir extrapoler les résultats de mesures sur une période plus importante mais également de pouvoir éventuellement limiter la modélisation des flux à une période correspondant aux mesures.

Du fait des variations importantes de flux attendues (de plus de 100 %), l'erreur liée aux incertitudes sur l'évaluation des flux globaux est supposée plus faible que les variations attendues, malgré le contexte majoritaire de type « hot spot ». Cette erreur a été évaluée par la répétition des mesures de flux et comprend donc une part de variabilité des conditions météorologiques.

Cette variation totale des flux reste comprise dans la gamme de 30 à 50% autour de puits arrêtés au moins 2 à 3 semaines pour représenter un régime équivalent de mise en pression progressive sur un site dont l'exploitation a été arrêtée. Dans le cas de puits en conditions de drainage, les variations de pression des puits constituent des variables supplémentaires susceptibles de diminuer ou d'augmenter significativement les émissions autour de ces puits, ce qui est le cas sur le site étudié.

Il faut noter que l'erreur de mesure et d'interprétation n'est pas linéaire sur toute l'étendue de la gamme des flux. Dans le cas des très faibles flux, les variations de pente autour de la valeur de concentrations comprises entre le bruit de fond (1,7 ppmv de méthane) et 2 à 3 fois cette valeur sont plus difficiles à exploiter car plus sensibles aux paramètres extérieurs. Par simplification, un « lissage » des faibles valeurs a été réalisé par affectation d'un flux de 0,07 ml/min/m² pour les très faibles flux (valeurs inférieure à 0,07 ml de méthane /min/m²). L'influence de ce lissage est négligeable et atteint au plus une surestimation du flux global de 42 l de méthane/heure/ha.

5 Descriptif de l'instrumentation et du matériel mis en œuvre

5.1 Chambres de mesure

Le dispositif de chambre à flux statique à recirculation mis en œuvre par l'INERIS a été testé dans de nombreuses configurations sur bancs à l'INERIS (en particulier pour le méthane et le CO₂). La répétitivité et la précision sur banc est meilleure que 5%. Cette méthode a fait l'objet d'intercomparaisons en 1995 (Pokryszka & al, 1995, Savanne & al, 1997) avec plusieurs méthodes et s'est révélée aussi fiable et précise que la méthode par utilisation de traceur, méthode reconnue comme une des méthodes les plus précises dans le cas de topographie plane (configuration du test).

L'erreur d'estimation provient donc essentiellement du choix de la densité de points de mesure de concentration associée, choix qui est traité dans les § 6.3, et 7.1.



Figure 2: Photographies de la chambre à flux.

Le dispositif de chambre simplifiée statique à recirculation pour réaliser les mesures de type IFM a fait l'objet d'une corrélation sur site avec le dispositif de référence que constitue la chambre à flux statique à recirculation. Du fait de l'absence d'un dispositif de mélange optimisé et d'une embase scellée au sol, la mesure IFM réalisée avec un dispositif simplifiée est fortement sujette aux conditions d'ambiance, de qualité des sols et du recouvrement de celui-ci par le dispositif.

5.2 Analyseurs utilisés

L'analyseur Ecoprobe 5 a été utilisé pour la réalisation de mesure de flux de CO₂. Il permet un enregistrement des mesures à une cadence choisie par l'utilisateur des teneurs en CO₂, CH₄, O₂. Il fonctionne par mesure de type infrarouge.

L'analyseur Licor, également de type infrarouge, a été utilisé pour le suivi des teneurs en CO₂ dans les chambres de mesure. Il nécessite une acquisition du signal.

Deux analyseurs Inspectra Laser fonctionnant sur le principe de la spectroscopie laser ont été mis en œuvre en parallèle sur site, pour permettre une acquisition rapide des teneurs en méthane.

Deux enregistreurs en continue de la qualité du biogaz (Gasclam®) ont été mis en œuvre en septembre 2011 pour l'analyse de la qualité des biogaz sous la couverture (donnée de calibration du modèle CALMIM). Ils permettent en particulier un enregistrement des teneurs mesurées in situ. Un des deux appareils a eu un incident sur site, ce qui a contraint les équipes à limiter le suivi par ces appareils dans l'attente de mieux connaître la cause de l'incident. Deux enregistrements (campagne de septembre 2011 et de fin novembre 2011) ont pu être dépouillés.

L'enregistrement des paramètres météorologiques a été réalisé sur site aux moyens de deux appareils :

- un appareil portable, Questrel® pour la mesure au niveau des chambres de mesure de flux ;
- une station météo équipée d'un mât, mise en place sur site en septembre 2011.

La station implantée sur site a connu des problèmes d'autonomie. Les jeux de données météorologiques ont été complétés par ceux provenant d'une station implantée à proximité du site.

6 Phase de mise au point

6.1 Phase de calibration en laboratoire

Le suivi des variations des émissions diffuses a nécessité des travaux de calibration des flux sur banc pour permettre de réaliser sans biais métrologique des mesures de flux à fréquence élevée (plusieurs mesures par heure) afin de prendre en compte les variations liées au principalement aux épisodes météorologiques. Les dispositifs existants de purge du volume de chambre à flux (ventilation haute, purge par gaz) induisent en effet une perturbation des faibles émissions.

Le dispositif utilisé, a été testé sur site avec succès en juin 2011 (tests de mesure à cadence imposée), après une phase de test en laboratoire (tests de répétitivité) ayant débutée en 2010.

6.2 Phase de calibration sur site

Les principaux problèmes de reproductibilité des mesures en chambre sur site proviennent des rafales de vents.

Concernant les vents, les directions et les vitesses ont été principalement mesurées par une station météorologique installée sur site et par une mini station implantée sur la chambre de mesure (Questrel®).

Dans le cadre de la campagne principale de mesure de septembre 2011 (26/9 au 30/9), les vitesses sont restées le plus souvent de l'ordre de 1 à 2 m/s.

Ces vitesses et directions des vents ont évolué lors des campagnes suivantes. Lors de la seconde campagne de mi novembre 2011, des rafales peu fréquentes ont ainsi pu atteindre 7,5 m/s (cf. annexe 1).

Or, les vitesses de vent restent compatibles avec la réalisation des mesures à la chambre à recirculation et à la réalisation de mesure de type ISM/IFM si celles-ci restent inférieures à 2 à 3 m/s.

Ces vitesses ont dépassé les 3 à 4 m/s en particulier sur l'après midi du 28 septembre de la première campagne et sur des périodes très courtes lors de la seconde campagne (cf. annexe 1).

Les effets du vent sur les mesures de flux sont bien connus : ils engendrent des « décrochages » de la pente d'accumulation, nécessitant de réaliser une interprétation manuelle des courbes pour les points concernés.

6.3 Incidence et corrélation mesure IFM – mesure à la chambre statique à recirculation

Suite à l'optimisation des moyens de mesure et des protocoles, des tests ont été réalisés par l'INERIS en mai 2011 sur une couverture finale d'une autre installation de stockage de déchets non dangereux, dans le but d'observer les corrélations pouvant être obtenues entre les deux techniques (mesures de type IFM, mesure par chambre INERIS à recirculation) pour des niveaux d'émissions de type mixte (diffus/hot spot).

Ces mesures ont été réalisées dès le mois de mai 2011 sur un site disposant d'une très bonne planéité de la surface (couverture finale sur site ancien, à végétation rase).

Des doubles mesures (77 doubles mesures concentration/flux sur 12 emplacements différents) ont été exécutées à proximité de puits de dégazage sur un site disposant d'une couverture comprenant 1 m de limons surmonté d'un mètre de terre végétale.

Ces tests ont consisté à réaliser des mesures de flux à la chambre à recirculation suivies des mesures IFM (suivi des concentrations sur un intervalle court (20 à 30 secondes)), au centre des emplacements de mesure à la chambre à recirculation.

Des corrélations atteignant respectivement 0,95 et 0,93 ont été obtenues dans ce contexte mixte diffus/hot spot pour les valeurs moyennes (cf. Figure 3) et maximales (cf. Figure 4) de concentrations.

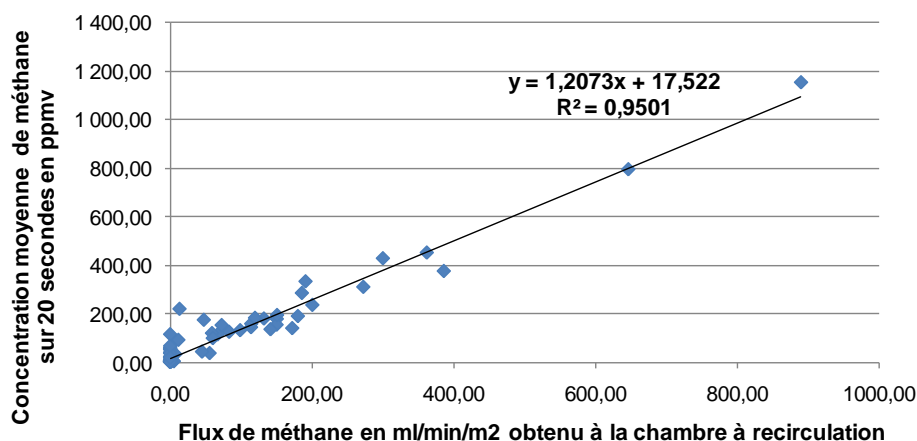


Figure 3 : Corrélation entre les mesures de concentration moyennes obtenues sur 20 secondes et les mesures de flux à la chambre à recirculation

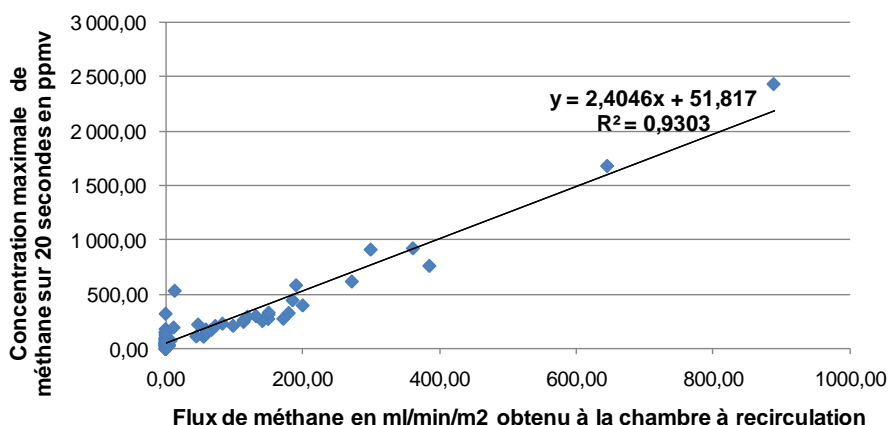


Figure 4 : Corrélation entre les mesures de concentration maximales obtenues sur 20 secondes et les mesures de flux à la chambre à recirculation

Dans le cas de mesure de type IFM, la mesure de la concentration moyenne permet de disposer d'une valeur très légèrement plus fiable mais suppose d'enregistrer l'ensemble des valeurs sur 20 secondes à une cadence rapide. Dans le cas de l'enregistrement de la valeur maximale seule, la corrélation reste importante ($R^2 = 0,93$), mais les valeurs sont beaucoup plus sensibles à des rafales de vents.

Par ailleurs le protocole de mesure, le terrain (la hauteur réelle de mesure est liée à la qualité du terrain (paramètre de planéité de la surface), la durée de mesure, le type de chambre ont une grande importance pour la mesure de la concentration en surface et influe ainsi directement sur le résultat de la mesure IFM.

Dans des contextes très favorables (absence de vent, sol plan) permettant un allongement de la mesure de type IFM (sur plus de 35 secondes), les coefficients de corrélation (R^2) relevés entre les mesures de concentrations maximales et les mesures à la chambre statique à recirculation de référence peuvent atteindre plus de 0,97.

Dans le cas du site d'étude, les mesures de type IFM ont été réalisées sur des couvertures de nature variée, comportant une très grande majorité (89%) de couverture de type intermédiaire et de type

hebdomadaire. Dans ce cas moins favorable, les coefficients de corrélations R^2 ont varié entre 0,80 et 0,87.

6.4 Autres effets des paramètres extérieurs

Les autres effets des paramètres extérieurs concernent plus particulièrement les paramètres pression barométrique et teneur en eau des sols superficiels.

Du fait de la rapidité des mesures (IFM), l'effet de la température extérieure et du rayonnement solaire sur les chambres non isolées (forçage thermique à l'intérieur de la chambre) est très réduit, voire inexistant : il n'est pas observé pour un allongement des mesures alors que la température croît avec cet allongement raisonnable de la durée de mesure.

Concernant les effets liés aux variations de pression, la pression a été mesurée en plusieurs points sur la zone ancienne.

Les mesures de dépression et pression ont pu dépasser les gammes de mesure des capteurs de pression utilisés (gamme variant de 0,127 mB à 12,7 mB) selon les capteurs. Dans ce cadre, seule une exploitation qualitative a été réalisée, en considérant le seul signal utilisable provenant de la canne 2 relié à un capteur de pression relative dont la gamme de mesure atteint +/- 2,54 mBar.

Malgré l'arrêt du captage sur le secteur, on constate une diminution de la dépression oscillant autour de - 1 mbar, particulièrement remarquable entre 14 h et 15 h (cf. Figure 5).

Cette diminution de la dépression est concomitante à l'augmentation de la pression barométrique observée.

La canne 2 étant enfoncée d'au plus 75 cm dans la couverture, elle ne peut atteindre que la partie supérieure du réservoir de biogaz que constitue la zone ancienne.

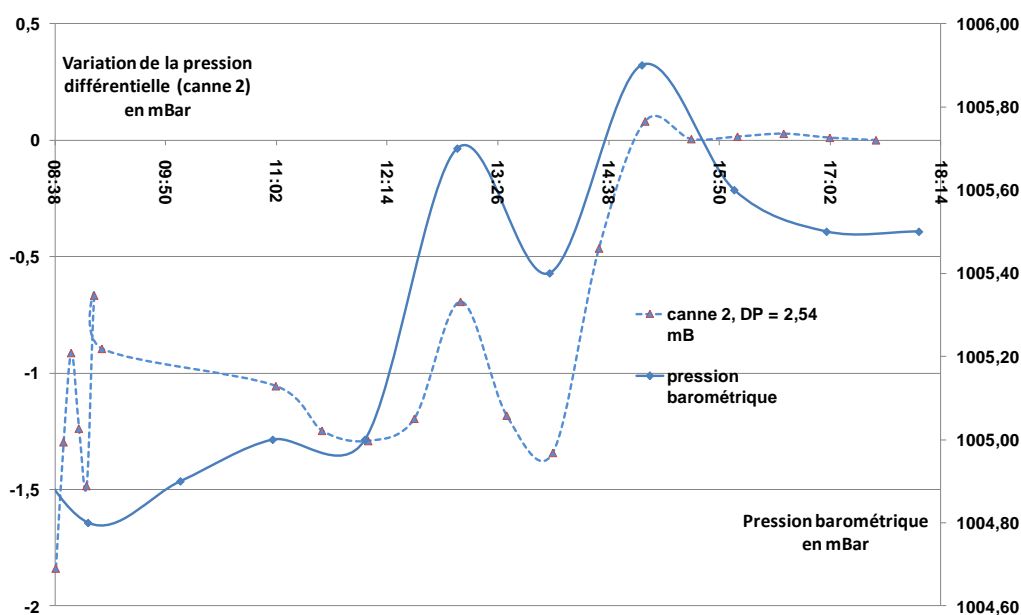


Figure 5 : Variation des pressions barométriques et différentielles sur la canne 2 le 8 juin 2011 sur la zone réaménagée avant 1997

Ces variations de pression ont une influence directe sur les flux, mais ils constituent des facteurs indépendants des mesures, les chambres utilisées n'influent pas sur la mesure du fait de l'utilisation de la recirculation des gaz dans les enceintes fermées.

7 Application du protocole au site pilote étudié

7.1 Protocole d'échantillonnage et d'interprétation des flux

Une stratification de l'échantillonnage par alvéole/casier a été appliquée.

L'évaluation du flux a considéré 4 densités d'échantillonnage selon les zones :

- densité de base (cas standard);
- densité de base + duplication de mesure autour des points à flux remarquable ;
- densité de base + schéma à 4 points si la seconde mesure de flux est remarquable ;
- densité de base + schéma supérieur (8 à 21 points) appliqué pour les points les plus émissifs (zone autour des puits essentiellement).

L'objectif de la campagne de septembre a été de couvrir l'intégralité du site, en dehors des zones déjà suivie (zone réaménagée avant 1997), des zones en travaux (extrémité du casier 11) et des zones déjà couvertes par une géomembrane (alvéoles 1 & 2, cf. § 3).

Les évaluations de débits par zone ont été réalisées par krigeage linéaire en utilisant toutes les données.

L'interpolation a été réalisée en deux étapes de krigeage :

- une première étape en considérant toutes les données hors puits et hors proximité des puits pour réaliser à une maille proche de 2 m une interpolation des flux notés comme « diffus ».
- une deuxième étape, après une phase d'élagage des données proches de puits, les données spécifiques à ceux-ci sont considérées avec une maille proche de 1 m, pour préciser les flux dits convectifs.

La portée de corrélation étant très réduite, voire inexistante, lors de la recherche d'un modèle de variogramme, on a néanmoins considéré une distance d'influence de 20 m pour les flux diffus et de 10 m pour les flux convectifs.

La méthodologie utilisée se base sur un modèle physique du puits : les fuites des puits en fonctionnement sont dues aux problèmes d'étanchéité liés à des phénomènes mécaniques sur la couverture et sur la zone de moindre efficacité des puits, sur une distance croissant avec la profondeur de la zone non crépinée du puits de captage du biogaz. (lignes de courant du biogaz plus éloignées du puits, permettant l'émission de biogaz au droit de celui-ci).

7.2 Hypothèse et considérations physiques utilisées

Les hypothèses suivantes ont été utilisées dans l'interprétation des similiflux IFM :

- pas d'influence des fuites des puits au-delà des distances mesurées (le technicien réalisant les mesures de similiflux s'assure de ce fait en réalisant un « couronne » de points de contrôle à un rayon de 1,5 m au-delà du rayon d'émission ;
- priorité des mesures réalisées à proximité des puits et en sur-échantillonnage au-delà ;
- transition courte (de l'ordre du mètre) entre les deux types de flux.

L'erreur liée à la transition flux convectif/flux diffus est d'autant plus faible que le gradient entre ces flux se réduit et que le rayon de mesure croît : l'erreur relative est ainsi a priori plus forte sur les flux faibles ou forts de faible extension spatiale (le flux lié uniquement à l'annulaire immédiat devrait être idéalement échantillonné avec une chambre spécifique).

Ces hypothèses se traduisent par l'interprétation suivante en 3 étapes :

- réalisation d'une interpolation sans les valeurs fortes rattachées aux puits à échelle métrique (« flux diffus uniquement ») ;

- élimination des valeurs interpolées à proximité des puits sur une distance égale au rayon d'influence des émissions des puits mesuré plus 1 m (élimination des flux diffus interpolés non représentatif à proximité des puits) ;
- ajout des valeurs mesurées (« flux convectif ») et nouvelle interpolation à une maille plus fine.

La présence des puits complexifie donc l'interpolation. Cette procédure à trois étapes est en cours d'amélioration. Elle simule un sur-échantillonnage des flux diffus autour de l'aire d'influence des émissions des puits, afin de mieux contrôler ces émissions plus fortes de type « hot spot ».

7.3 Distinction des flux diffus et convectifs

Cette distinction nécessite de prendre en compte toutes les données disponibles : la considération de la concentration de méthane seule n'est pas suffisante.

Les données de charge surfacique de méthane des études précédemment réalisées à l'INERIS montrent qu'au-delà d'une charge surfacique en méthane de 150 ml/min/m^2 , l'efficacité de l'oxydation s'affaiblit rapidement.

Or le sol dispose le plus souvent d'un potentiel d'oxydation élevé du méthane pour peu que le flux de méthane explore la porosité du sol, du fait du caractère ubiquiste des bactéries méthanotrophes.

Un flux de méthane explorant la porosité du sol sera ainsi par nature oxydé et présentera un ratio CH_4/CO_2 très nettement inférieur à 0,6.

Ces deux critères (flux de méthane $> 150 \text{ ml/min/m}^2$, ratio CH_4/CO_2) ont été utilisés pour différencier les flux diffus des flux convectifs.

7.4 Zone de couverture hebdomadaire

Cette zone est repérée comme la zone dite « de sable » du fait de sa couverture de type sableuse mise en place en fin de semaine lors de l'exploitation : elle représente la partie accessible aux mesures de la zone d'exploitation de l'alvéole 5.



Figure 6 : Vue de la surface de la zone de couverture hebdomadaire

Cette zone a fait l'objet d'une reconnaissance par 30 points de mesure de type « similiflux » en septembre 2011.

Les paramètres statistiques des distributions statistiques des similiflux IFM mesurés sont présentés ci-dessous.

Tableau 3 : Similiflux IFM de méthane de la zone des sables (09/2011)

Paramètres	Valeurs des flux de méthane en ml/min/m ²
Minimum	0
Percentile 25%	1,46
Médiane	2,18
Moyenne	7,97
Percentile 75%	9,85
Percentile 90%	25,51
Percentile 95%	27,54
Maximum	60,84
Coefficient de variation	1,6

Ces statistiques démontrent une répartition des flux assez homogène, avec une absence de « hot spot », le flux maximum (61 ml/min/m²) n'atteignant pas ici une valeur égale à 10 fois la valeur moyenne (environ 8 ml/min/m²).

La surface investiguée atteint environ 2 200 m², pour un flux total évalué par krigeage linéaire à 17 l de méthane par minute, soit environ 1 m³/h de méthane. Le débit surfacique moyen évalué est de 7,73 ml/min/m², soit très proche de celui évalué à partir de la moyenne des émissions (7,97 ml/min/m²)

7.5 Zone de couverture intermédiaire

La zone de couverture intermédiaire investiguée est répartie en fait sur 3 domaines : les alvéoles 3 et 4 ainsi que le casier 11.



Figure 7 : Vue de la surface des alvéoles 3 & 4

L'alvéole 3 disposait d'un couvert végétal parsemé en septembre 2011, mais plus important que celui très disséminé du casier 11. L'alvéole 4, plus récente, ne disposait pas de couvert végétal.

Les investigations ont été réalisées en deux sous ensembles : les alvéoles 3 et 4 disposées dans la partie nord du site (avec respectivement 35 et 27 points de mesures de similiflux de méthane), puis le casier 11 localisé dans la partie sud du site (85 mesures de similiflux de méthane) car les couvertures sont de fait différentes (liées à l'occupation de la végétation) sur ces deux sous-ensembles de couverture intermédiaire. Du fait de la quasi-absence de flux repérable sur la zone de couverture

définitive du dôme, les efforts de suivis matérialisés par les points de suivi ont été reportés en partie sur ces deux types de couvertures, supposées plus émissives.

Six points de suivis ont été sélectionnés (2 pour chaque type d'emplacement (alvéole 3, 4 et casier 11)) pour ce type de couverture.



Figure 8 : Vue de la surface du casier 11, 09/2011

7.5.1 Les alvéoles 3 et 4

Les paramètres statistiques des 62 similiflux de méthane mesurés sont présentés ci-dessous.

Tableau 4 : Similiflux IFM de méthane des alvéoles 3 & 4 (09/2011)

Paramètres	Valeurs des flux de méthane ² en ml/min/m ²
Minimum	0
Percentile 25%	0
Médiane	0
Moyenne	3,88
Percentile 75%	0
Maximum	179,81
Coefficient de variation	5,9

Tableau 5 : Paramètres des queues de distribution des similiflux des alvéoles 3 & 4

Alvéoles/paramètres de distribution	Alvéole 3 similiflux en en ml/min/m ²	Alvéole 4 similiflux en en ml/min/m ²
Moyenne	0,91	7,87
Percentile 90	3,85	0,07

² Pour mémoire : correspondance pour le méthane entre les unités ml.min⁻¹.m⁻² et g.m⁻².j⁻¹

Percentile 95	7,16	21,69
---------------	------	-------

On observe un comportement très différent de celui de la zone de couverture hebdomadaire : la moyenne reste ici faible sur les deux alvéoles (environ 4 ml/min/m²) avec la présence de quasi « hot spot », les valeurs notables étant néanmoins regroupées par 2. Seule 6 valeurs ont dépassé le seuil de 0,07 ml/min/m² (dont les 4 points de suivis, choisis pour présenter un flux mesurable).

L'alvéole 4 est plus émissive, du fait de la présence de deux points réellement émissifs recensés à la maille d'échantillonnage utilisée (10 m).

La surface investiguée atteint ici environ 5 300 m², pour un flux total évalué par krigeage linéaire à 16 l de méthane par minute, soit 0,96 m³/h de méthane.

Pour une surface 2,4 fois plus importante, le flux total de méthane émis reste équivalent, soit environ 1 m³/h de méthane, du fait de la baisse de la valeur moyenne des flux surfaciques de méthane.

7.5.2 Le casier 11

Le casier 11 dispose de puits de dégazage implantés au sein de la couverture. Or les émissions notées à proximité de deux de ces puits (les puits 38 et 41) sont notables au regard des faibles émissions mesurées sur l'ensemble de la zone. On a ainsi considéré de ce fait les émissions avec ou sans prise en considérations des émissions présentes autour de certains puits pour évaluer l'incidence de ces émissions sur la zone considérée.

Par ailleurs, 3 points de mesure ont fait l'objet de reconnaissances plus précises (schéma à 4 points), en complément des 85 mesures de similiflux réalisées sur la zone.

En complément des 85 mesures de type similiflux réparties sur la zone, 13 et 20 mesures ont été réalisées respectivement autour des valeurs remarquables et des deux puits.

Les paramètres statistiques des similiflux mesurés sont présentés dans le Tableau 6 ci-dessous. Ils correspondent :

- aux points sans les puits et les focus sur ceux-ci (96 points) ;
- aux points avec les 2 puits de la grille initiale (sans les focus sur ceux-ci, 98 points) ;
- aux points avec les puits et les focus sur ceux-ci et sur les valeurs remarquables (118 points).

Tableau 6 : Similiflux IFM de méthane du casier 11 (09/2011)

Paramètres	Valeurs des flux de méthane en ml/min/m ² sans les puits 38 et 41 96 mesures	Valeurs des flux de méthane en ml/min/m ² avec les puits 38 et 41 98 mesures	Valeurs des flux de méthane en ml/min/m ² avec les puits et leur focus (38 et 41) 118 mesures
Minimum	0	0	0
Percentile 25%	0	0	0
Médiane	0	0	0
Moyenne	1,70	25,91	47,16
Percentile 75%	0	0	1,60
Maximum	28,3	1950	1950
Coefficient de variation	2,84	7,71	4,47

Les deux valeurs les plus fortes sont apportées par la proximité des puits dans la grille initiale. La prise en compte de ces puits modifie de manière importante les moyennes en accordant une représentativité équivalente aux deux points mesurés à proximité des puits 38 et 41.

La valeur moyenne sans prise en compte de la proximité des puits montre l'intérêt du dégazage : le flux moyen reste très faible et inférieur aux flux mesurés sur l'ensemble des alvéoles 3 & 4 (cf. Tableau 6, Tableau 7).

Tableau 7 : Paramètres de la queue de distribution des similiflux du casier 11

Alvéoles/paramètres de distribution	Casier 11 similiflux en en ml/min/m ²
Moyenne	1,70
Percentile 90	2,99
Percentile 95	12,59

La prise en compte des puits 38 et 41 puis du sur-échantillonnage à proximité de ceux-ci fait progresser fortement la moyenne : il est donc nécessaire de traiter de manière particulière la proximité des puits émissifs afin de circonscrire l'importance du sur-échantillonnage local lors de l'évaluation des flux totaux.

En utilisant les valeurs de similiflux sans les puits et leur environnement, les 7 800 m² de la surface émettent environ 7,6 l/min de méthane, soit 0,46 m³/h de méthane. Ce flux de « bruit de fond émissif » représente une part faible mais non négligeable des émissions.

Cette évaluation a également été conduite en suivant la méthodologie proposée, à savoir le remplacement dans la zone émissive des puits des points interpolés à partir des mesures uniques de flux de type « diffus ».

Les flux totaux sont évalués à 21 l de méthane/minute, soit 1,3 m³/h de méthane. L'influence des fuites autour des puits est donc importante. On observe également ici un comportement sensiblement différent de celui des zones de couvertures intermédiaires : si la densité moyenne de flux surfacique totale reste proche (1 m³/h pour 5 300 m² investigués pour les alvéoles 3 & 4, 1,3 m³/h pour le casier 11 de 7 800 m² investigués), la répartition du flux est différente du fait du dégazage : les flux diffus sont plus faibles mais compensés par les émissions localisées au niveau des deux puits émissifs de la zone.

Un traitement local des puits permettrait donc de réduire facilement de 50% les fuites sur ce casier.

7.6 Zone de couverture finale

Cette zone est différenciée suivant le type de couverture présente. La couverture est très épaisse (plusieurs mètres) dans la zone ouest dite du dôme et on s'attend ainsi à très peu d'émission dans cette zone, ce qui a été vérifié sur site. La densité de mesure dans cette zone spécifique a été réduite à environ 50 points/ha du fait de la non-émissivité de cette zone, hors certains puits, qui ont été traités de manière particulière. Cette zone ancienne dispose d'une végétation herbacée relativement continue.

Dans la zone dite « Méthalix », où la couverture est moins épaisse, des émissions ont été notées sur plusieurs zones, en dehors des zones émissives liées à la proximité des puits.

7.6.1 Zone du Dôme

Cette zone dispose de nombreux puits de dégazage. Les investigations ont été conduites au moyen de 234 points de mesures complétés par un focus réalisés sur les deux puits émissifs rencontrés, à

savoir les puits 25 et 37, au moyen d'un schéma à 8 points (2 couronnes de 4 points de mesures à 1,5 et 3 m du puits) et de schéma plus réduits (à 3 points à 1,5 m) sur des puits très peu émissifs.



Figure 9 : Vue de la zone du Dôme, 09/2011

Les résumés statistiques du schéma initial avec et sans les puits émissifs et du schéma complété sont présentés ci-dessous.

Tableau 8 : Similiflux IFM de méthane du dôme (09/2011)

Paramètres	Valeurs des similiflux de méthane en ml/min/m ² sans les puits 25 et 37 232 mesures	Valeurs des similiflux et flux de méthane en ml/min/m ² avec les focus sur les puits 25 et 37 248 mesures
Minimum	0	0
Percentile 25%	0	0
Médiane	0	0
Moyenne	0,004	19,9
Percentile 75%	0	0
Maximum	0,33	1390
Coefficient de variation	8,33	7,02

En outre des puits 25 et 37 notés comme émissifs, les puits 28, 15 et 16 ont fait l'objet d'un schéma réduit à 3 points, où aucune émission n'a été mesurée. De nombreux puits ont été rencontrés lors de ce scanning : 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 30, 31, 33, 36, 37.

Le flux surfacique atteint au plus 0,33 ml/min/m² (hors puits dits « émissifs ») sur deux points, soit une valeur au plus égale à 5 fois la limite de détection et de traitement des données adoptée. Une valeur non nulle très faible, 0,2 ml/min/m², a également été rencontrée à proximité du puits 14. Ce puits n'a pas été considéré comme émissif.

Le flux total émis hors les deux puits émissifs est typiquement très faible, et atteint à peine 0,13 l/min, soit 0,008 m³/h pour une surface de 4 ha. L'épaisseur de la couverture permet ici de limiter très fortement les émissions de méthane et de participer également à l'oxydation du méthane.

Dans le cas du puits 37, le plus émissif, la procédure ne peut être appliquée correctement (limitation des flux par le flux faible diffus interpolé à l'étape précédente du fait de la position du puits en limite de cette zone). Une erreur importante persiste donc sur ce puits. Du fait du type de l'erreur (non limitation de l'interpolation), le débit réel émissif est probablement plus faible. Le débit lié à l'ensemble puits + flux diffus atteint environ 35 l de méthane/minute, soit environ 2 m³/h.

La zone du dôme a donc été abandonnée par la suite au profit de la zone plus ancienne et plus émissive à couverture moins profonde (zone aménagée antérieurement à 1997).

7.6.2 Zone finale à couverture moins épaisse

Cette zone comprend les puits 2, 3, 4, 5 & 6 ainsi que 3 sous-zones (11, 67 et 92) identifiées comme émissives lors d'investigations précédentes sur la zone réaménagée antérieurement à 1997.

On distingue ici trois types de zones :

- le flux diffus lié aux zones autres que la proximité immédiate (distance < 5 m) des puits ;
- les flux liés aux puits ;
- les focus sur 3 sous-zones émissives identifiées.

Pour cette zone particulière, on disposait d'un scan de surface de juin 2011. Du fait des émissions précédemment remarquées autour des puits, les efforts de mesure ont porté plus spécifiquement autour des puits et des 3 sous-zones d'émissions.



Figure 10 : Vue de la zone réaménagée avant 1997, vers le bassin des lixiviats, 09/2011

Outre les 3 sous-zones, l'extrémité sud-est de cette zone a engendré des flux diffus remarquables.

Une procédure de mesure de sur-échantillonnage a été utilisée pour les sous-zones en utilisant une grille régulière avec une maille de mesure de l'ordre de 1 à 2 m selon les sous-zones.

Tableau 9 : Similiflux IFM et flux de méthane de la zone réaménagée avant 1997 (06/2011 et 09/2011)

Paramètres	Valeurs des flux de	Valeurs des flux de	Valeurs des flux de
------------	---------------------	---------------------	---------------------

	méthane (IFM) en ml/min/m ² sans les puits 06/2011 123 mesures	méthane (IFM) en ml/min/m ² avec les puits 09/2011 160 mesures	méthane en ml/min/m ² des 3 sous-zones 09/2011 37 mesures
Minimum	0	0	0
Percentile 25%	0	0	0,47
Médiane	0	0	11,22
Moyenne	1,34	118	48,04
Percentile 75%	0.07	0,62	77,58
Maximum	81,7	6900	313
Coefficient de variation	5,92	5,59	1,47

Le flux diffus total est évalué à 14 l/min de méthane, soit environ 0,8 m³/h de méthane pour une surface d'environ 1 ha.

Le flux total (diffus + puits) est évalué à 61 l/min, soit 3,7 m³/h, soit une contribution importante des puits de l'ordre de 3 m³/h de méthane.

Tableau 10 : Paramètres de la queue de distribution des similiflux de la zone réaménagée avant 1997

Alvéoles/paramètres de distribution	Zone réaménagée avant 1997, hors puits Juin 2011 similiflux en en ml/min/m ²
Moyenne	1,34
Percentile 90	0,51
Percentile 95	4,98

7.7 Protocole d'extrapolation des résultats à l'ensemble du site

Le protocole d'extrapolation des flux à l'ensemble du site a été mis en œuvre à partir de la connaissance de la répartition des surfaces exploitées à la fin de l'année 2011.

L'estimation a été réalisée :

- par zone homogène ;
- en pondérant le résultat par type de zone en fonction des surfaces existantes.

Les flux de nature « diffusive » sont évalués à une fraction comprise entre 25% et 50% de l'ensemble des émissions du site. Ces flux sont fortement prédominants sur l'alvéole en exploitation.

Dans le cas des alvéoles récentes disposant d'une couverture intermédiaire (50 cm d'argile), l'importance des flux diffus est plus contrastée, en fonction de l'application stricte ou non de la règle concernant le ratio de méthane présent dans les flux de méthane et de CO₂ observés à la surface. Les flux sont donc de nature mixte sur ce type de couverture.

Une analyse de la sensibilité des paramètres régissant les flux diffus a été conduite par une variation des paramètres d'entrée lors de l'utilisation de CALMIM.

Les flux convectifs sont majoritaires sur le casier 11 (80 cm d'argile) et représentent la quasi-totalité des flux pour des épaisseurs d'argile plus importantes (zone du dôme).

L'extrapolation des flux convectifs réalisée est perfectible. L'exploration de la liaison de ceux-ci avec la conduite du captage n'a pas pu être conduite dans le cadre de ce programme de recherche. La pondération appliquée aux flux convectifs (fuites autour des puits) pourra donc être améliorée.

Contrairement aux flux de nature diffusive, les flux convectifs peuvent faire l'objet de travaux localisés permettant de réduire notablement ceux-ci, par l'emploi de jupe d'étanchéité autour des puits, par le renforcement de l'étanchéité par de l'argile et par la réalisation de dispositifs oxydants annulaires.

Tableau 11 Tableau des paramètres émissifs retenus pour les émissions de méthane du site pilote à la fin du mois de septembre 2011

Type de surface	Emission en méthane et surface correspondante de mesure	Surface en ha	Flux diffusif total par zone en m ³ /h de méthane	Flux convectif total par zone en m ³ /h de méthane	Total par type de couverture en m ³ /h de méthane
Alvéoles 1 & 2	non émissif en diffusif (géomembrane)	3,8 ha (zone 2 A)	0	< 0,5*	< 0,5*
Alvéoles 3 & 4	diffusif : 3 ml/min/m ² , mesuré sur 5 300 m ²		1 (flux mixte)		1
Alvéole 5 (en exploitation)	diffusif : 7,7 ml/min/m ² , mesuré sur 2 200 m ²		1,0	0	1,0
Surface réaménagée antérieurement à 1997	diffusif : 1,4 ml/min/m ² , mesuré sur 10 000 m ² convectif : 4,7 ml/min/m ² , mesuré sur 10 000 m ²	9,9 ha (zone 1 A)	8,3	28* 2,8**	36,3* 11**
Surface réaménagée en juin 2009, dont	diffusif : 0,0 ml/min/m ² , mesuré sur	12 ha (zone 1B et	0	6,3*	6,3*

le dôme	40 000 m ² convectif : 0,88 ml/min/m ² , mesuré sur 40 000 m ²	1C)			
Surface réaménagée plus récente, dont le casier 11	diffusif : 0,97 ml/min/m ² , mesuré sur 7 800 m ² convectif : 1,72 ml/min/m ² , mesuré sur 7 800 m ²	2,5 ha (zone 1D)	1,5	2,7*	4,2*
Total		28,2 ha	11,3	37,5* 12,5**	49* 24**

* : le ratio sur le nombre de puits en activité devrait être utilisé pour affiner le flux convectif sur l'ensemble de la zone réaménagée antérieurement à 1997 : une surestimation des flux convectifs est réalisée par l'emploi du ratio des surfaces.

** : on considère ici seulement les puits de la zone réaménagée avant 1997.

8 Sélection des points de suivi

Cette sélection a été réalisée à partir d'un scan de type IFM de la surface de chaque zone en septembre 2011. Suite à ce scan IFM, un choix des points a été réalisé pour le suivi à la chambre à recirculation.

Cette sélection a été réalisée avec comme contrainte principale de pouvoir mesurer si possible un flux de méthane. Un autre type de contrainte (localisation) des points a ensuite été considéré afin d'éviter les effets de bord. Enfin, des points représentatifs des différentes gammes de flux IFM ont été sélectionnés si cela était possible.

Un biais de surreprésentation des points à relativement fort flux existe donc. Cette surreprésentation des points à fort flux peut être appréciée par la comparaison des mesures de flux à la chambre avec les percentiles 90 et 95 du scan IFM pour la sélection des points réalisée.

Pour chaque type de zone il a été initialement prévu un suivi par une sélection de 3 points. Le suivi des émissions diffuses sur la zone de couverture finale a été réduit au profit des zones de couverture intermédiaire et mixte (cette zone a bénéficié de 2 points complémentaires de mesure sur le casier 11). Seul un des points les plus contributeur de la zone réaménagée avant 1997 a été conservé comme représentant d'une couverture finale relativement peu épaisse.

Le Tableau 12 présente les points suivis au sein de chaque zone.

Les 3 points choisis au sein de la couverture hebdomadaire sont représentatifs de l'ensemble de la gamme des flux IFM de méthane observés dans cette zone. Sur cette zone, 25 points (sur 30 réalisés) ont présenté des flux de méthane de type « diffus » situés dans l'intervalle 0,6 - 61 ml/min/m².

Ces points ont présenté des flux surfaciques de CO₂ élevés. Cette zone étant localisée au-dessus d'une couche de déchets frais, le biogaz initial est typiquement plus riche en CO₂, du fait de la mise en place progressive de la méthanogénèse (sur une durée typique de quelques mois, de l'ordre de 3 - 6 mois). Le ratio des flux de méthane et de CO₂ ne peut être utilisé ici pour distinguer flux diffus/flux convectif du fait de la production de biogaz de fermentation mixte aérobie/anaérobie.

La couverture intermédiaire dispose de 3 sous-zones et de 5 points de suivi permettant de considérer une couverture de plus en plus ancienne, de l'alvéole 4, la plus récente, à l'alvéole 3 et au casier 11 plus ancien.

Les 2 points choisis au sein de l'alvéole 4 sont les 2 seuls points où un flux IFM de méthane a pu être observé sur cette zone. Le point n°26 (flux surfacique de 61 ml/min/m²) est représentatif d'une gamme de flux diffus alors que le point n°27 (flux surfacique de 324 ml/min/m²) est plutôt situé dans la gamme basse des flux de nature convective. Le ratio des flux de méthane et de CO₂ corrobore ce classement.

Le point de suivi de l'alvéole 3 est le point où le simiflux IFM a été le plus élevé des 4 points présentant un flux IFM supérieur à 0,07 ml/min/m² sur les 35 points de mesure IFM de cette alvéole. Le ratio des flux de méthane et de CO₂ indique la présence d'une oxydation du méthane sur ce point.

Les deux points sélectionnés sur le casier 11 représentent des flux IFM moyens de méthane. Un des deux flux surfacique de méthane n'a pas été retrouvé avec la chambre à recirculation malgré la surface couverte plus importante (des variations de flux notables ont été mesurées dans le temps). Le ratio des flux de méthane et de CO₂ indique la présence d'une oxydation, les flux de méthane restant également dans la gamme des flux « diffus ».

Concernant le point 11, ce point a été choisi comme représentant des plus forts flux diffus en dehors de la proximité des puits et de 3 zones particulières où des émissions plus importantes de méthane ont été observées. Ce point est localisé à la limite de la zone réaménagée avant 1997 et du dôme. Le ratio des flux de méthane et de CO₂ proche de celui du point n°40 du casier 11 indique la présence d'une oxydation assez modérée.

Tableau 12 : Points suivis et appartenance aux zones et types de couverture

	N° du point de la zone	Flux de méthane en ml/min/m ²	Percentile 90% des flux IFM de la zone, en ml/min/m ² de méthane	Percentile 95% des flux IFM de la zone, en ml/min/m ² de méthane	Flux de CO ₂ en ml/min/m ²	Ratio CH ₄ /CO ₂ en %
C. hebdomadaire Zone « sable »	9	32	25,5	27,5	350	9,3
	12	9,7			150	6,3
	18	4,8			69	7,0
C. intermédiaire Alvéole 4	26	36	0,07	21,7	47	76,5
	27	324			280	114,5
C. intermédiaire Alvéole 3	13	35	3,85	7,16	110	31,3
C. mixte intermédiaire /final casier 11	39	-	2,99	12,6	29	0,0
	40	15			25	61,4
C. finale zone réaménagée avant 1997	11	70	0,51	4,98	110	63,4

Ces 9 points (points n°9, 12 et 18 ; 26, 27 et 13 ; 39, 40 et 11) ont été regroupés et notés respectivement H1, H2 et H3 (couverture Hebdomadaire), I1, I2 et I3 (couverture Intermédiaire) et F1, F2 et F3 (couverture Finale et mixte finale/intermédiaire) dans la suite du rapport pour améliorer la lisibilité de ce rapport.

9 Evaluation de la variabilité des émissions diffuses

Cette section présente l'étude de la variabilité des émissions de méthane. Cette évolution a pu être observée sur les mêmes points de suivi, hors zones de couverture hebdomadaire, pendant 3 campagnes de mesure en 2011 (fin septembre, mi novembre, fin novembre) et une partie des 3 campagnes de mesure en 2012 (fin février, fin mai et fin novembre 2012), les points de suivi de la zone intermédiaire ayant évolué en fin d'année 2011/ début d'année 2012.

L'étude de la variabilité des émissions a été plus spécialement focalisée sur la période de transition de l'importance des flux oxydés observée entre la fin septembre 2011 et la fin du mois de novembre 2011.

L'évolution constatée sur des flux de méthane et de CO₂ à différentes échelles de temps est présentée ci-dessous à différentes échelles temporelles.

9.1 Variabilité horaire à journalière

Les variations les plus rapides des émissions sont liées aux modifications rapides de la surface (du fait des précipitations), du réseau de captage (déconnection, arrêt) et du gradient barométrique.

La dépression engendrée par le système de captage au sein du massif ainsi que les émissions résiduelles de méthane sont essentiellement dépendantes de l'étanchéité de la couverture aux gaz.

Les opérations de maintenance du réseau de captage et de régulation de la dépression affectée aux puits sont susceptibles de modifier les émissions de méthane. Ces modifications n'ont pas été réalisées lors de la période de mesure et ne constituent donc pas des paramètres à prendre ici en compte.

La variabilité des émissions de méthane a pu être observée dès la réalisation de tests sur site en juin 2011.

Ces tests ont débuté le 8 juin 2011, avec la réalisation de mesures des flux de méthane et de CO₂ à fréquence rapide (plus de 2 mesures /heure) sur un point de la zone réaménagée avant 1997. Cette journée du 8 juin a été marquée par une progression de la pression barométrique et de la température.

Dans le but de tester la réponse de la couverture aux variations barométriques combinée à l'imposition d'un régime de dépression, un suivi des variations de pression a été mis en place sur 2 puits (puits 3 et 5) et 3 cannes.

Le suivi de pression a été réalisé au moyen d'un automate enregistrant les variations des pressions relatives avec l'atmosphère. Le signal provenant de l'ensemble des points de mesure à l'exception de la canne 2 est resté très faible et d'évolution comparable. La canne 5 présente ainsi ce signal commun, qui peut être comparé à celui observé sur la canne 2 et à un enregistrement de la pression barométrique local sur la Figure 11.

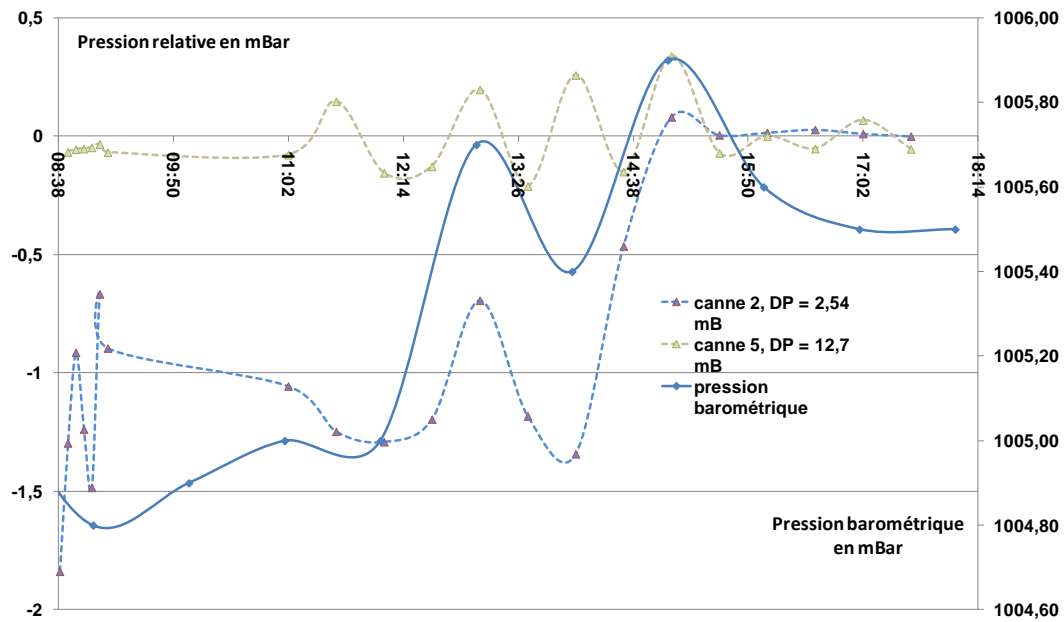


Figure 11 : Evolution comparée de la pression barométrique et de la dépression mesurée

Les oscillations des valeurs de pression relative sont globalement concomitantes à celles observées sur la pression barométrique. Celle-ci influence fortement les dépressions mesurées qui ont tendance à se réduire suite à la dernière oscillation de la pression barométrique.

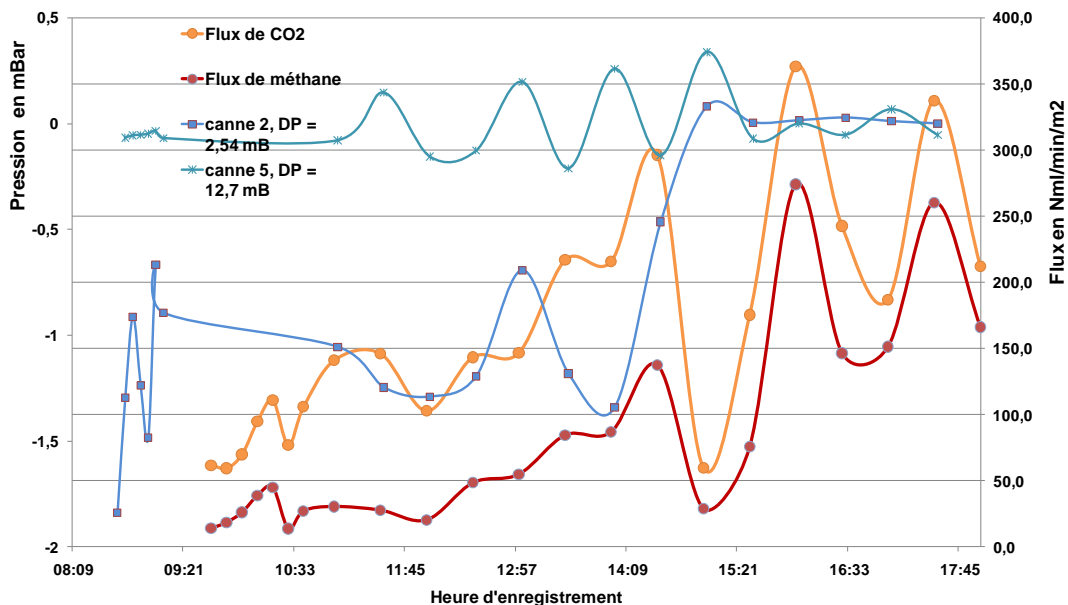


Figure 12 : Variations des flux de méthane, de CO₂ et de la pression différentielle sous la couverture mesurées le 8 juin 2011

On peut remarquer en exploitant les courbes de la Figure 12 que les flux de CO₂ sont restés toujours supérieurs aux flux de méthane, mais l'écart s'est réduit fortement lors de la première oscillation des flux. Suite à cette première oscillation des flux, les flux de CO₂ restent à peine supérieurs aux flux de méthane.

On observe une augmentation rapide et importante des flux de méthane et de CO₂ en début d'après midi. L'explication proposée à ce stade de la connaissance du site est multifactorielle :

- les cannes de mesure de pression différentielle (dont seule la canne 2 présentent un signal exploitable) montrent une diminution rapide de la dépression régnant sous la couverture et l'atteinte d'une pression positive, la dépression sous la couverture passant de -1,4 mbar à une dépression nulle en environ une heure : cette annulation de la dépression va permettre une émission de biogaz de nature autre que diffusive ;
- malgré le fait que les variations de pression mesurées sur un puits restent faibles et limitées (inférieures à +/- 0,5 mBar), ces variations concernent un massif important et pourraient permettre un transfert convectif.

Ces variations sur les flux ont pour conséquence des variations tout aussi importantes sur les ratios CO₂/CH₄ des flux surfaciques (cf. Figure 13) qui fournissent de nouveaux indices sur l'importance de l'oxydation et donc de la composante globale de flux diffus à ce point particulier.

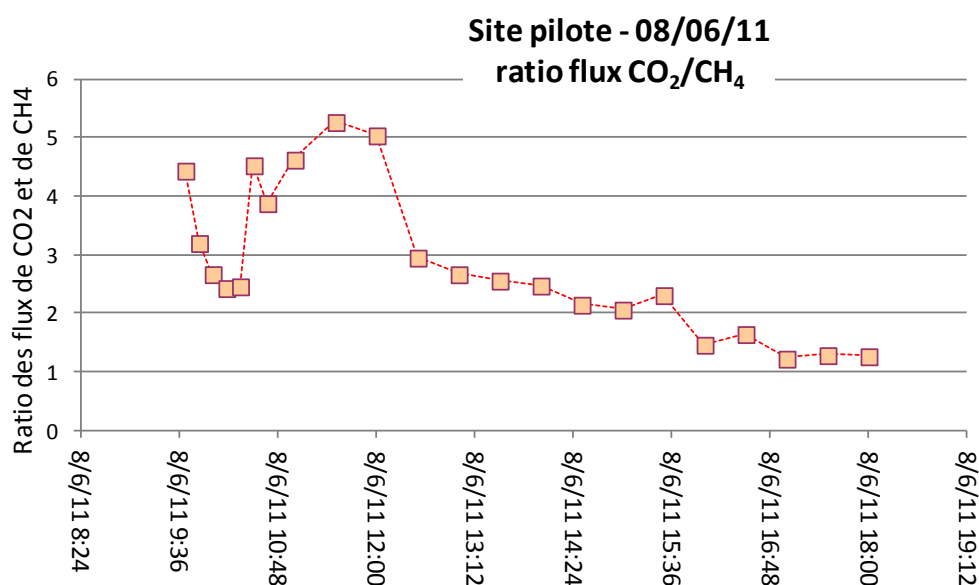


Figure 13 : Variations des ratios de flux de CO₂ et de méthane sur la journée du 8 juin 2011

Le ratio des flux de CO₂ et de méthane varie d'un facteur 5 dans une même journée sur ce point. Il décroît progressivement avec l'augmentation des flux, traduisant ainsi la diminution relative de l'oxydation. Cette oxydation est généralement représentée en fonction de la charge en méthane. Pour un état de saturation et de température donnée du sol, ces mesures du ratio CO₂/CH₄ selon la charge présentent une image du comportement de la couverture

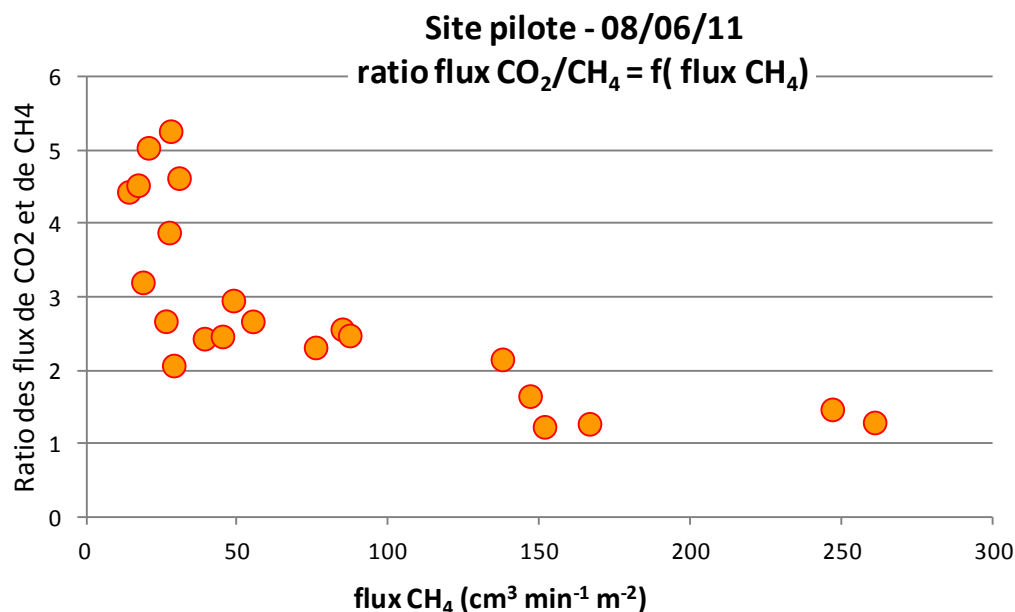


Figure 14 : Variations du ratio CO₂/CH₄ des flux en fonction du flux de CH₄

On observe ici (Figure 14) aussi une diminution progressive du ratio vers une charge de 150 ml/min/m² représentant généralement une des bornes supérieures des flux oxydés.

9.2 Variabilité pluri-journalière à saisonnière

Les paramètres météorologiques sont également susceptibles de modifier sensiblement les flux à une fréquence moins élevée, de type horaire à journalière, voire hebdomadaire (cf Figure 15, Figure 16), selon le gradient barométrique (Taramini & al, 2003, Scharff & al, 2005) .

On s'intéresse dans ce cas à des variations plus importantes et de plus grande amplitude de la pression barométrique, sur une période d'amplitude pluri-journalière.

Ce type de suivi a été réalisé en septembre et novembre 2011.

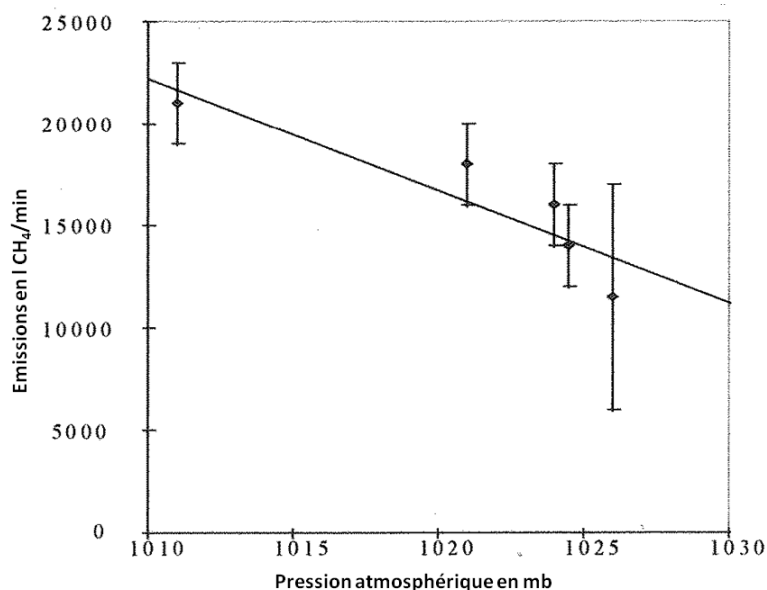


Figure 15 : Variations des émissions selon la pression atmosphérique, extrait d'après Scharff & al (2005)

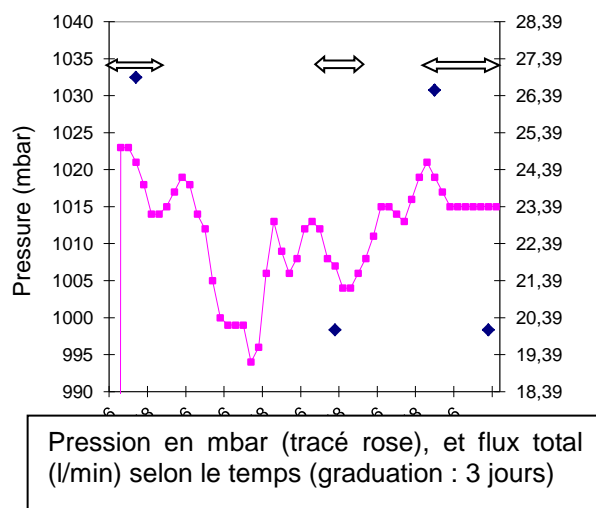


Figure 16 : Variation des flux de méthane émis avec la pression (d'après Taramini & al (2003))

9.3 Variabilité saisonnière à annuelle

Ce type de variabilité a été peu étudié. Certaines campagnes de mesure par des moyens optiques ont pu concerner le même site à des périodes et des saisons différentes. Néanmoins, du fait de l'approche globale utilisée, il n'est pas possible de remonter au comportement d'un type de couverture. Par ailleurs, en fonction de l'orientation des vents, la contribution des différentes sources au signal mesuré est souvent différente, car il est rare que la concentration dans l'air puisse être mesurée sur un transect complet en aval du site.

Les mesures IFM de méthane des scans des zones étudiées et les mesures de flux surfacique de méthane et de CO₂ réalisées sur la sélection de points lors des campagnes ont pour objectif de fournir une première évaluation de ces variations.

Par ailleurs, le suivi des paramètres climatiques a pour objectif de comparer les variations des émissions aux variations du comportement de la couverture déduit de ces paramètres climatiques.

Les modifications les plus lentes des émissions concernent a priori les phases de progression de la saturation en eau de la couverture, la température moyenne journalière (et donc l'oxydation du méthane) et s'apparentent aux modifications saisonnières.

Les données ont pour but de servir de calibration aux outils de modélisation disponibles pour suivre les évolutions saisonnières (tel que CALMIM) par les mesures de flux réalisées.

Les données de suivi ont été exploitées à l'échelle annuelle dans le rapport final, en considérant la variation des flux de méthane et CO₂ pour les points de suivis, pour chacun des types de couverture.

Il s'est avéré que les quatre campagnes de mesure de 2011 ont été les plus utiles, les flux diminuant et prenant un caractère convectif dès la fin de l'année 2011 : les campagnes de février et mai 2012 n'ont montré que très peu de points émissifs de nature convective et la campagne de novembre 2012 a reproduit des résultats proches de celle de 2011. Le choix de la période de mesure et de calage des flux est donc capital pour permettre de comparer les résultats de modélisation des flux et les flux mesurés sur site. La période de la fin de l'été représente ainsi souvent une période plus propice aux mesures pour le site étudié du fait de la plus faible saturation en eau des couvertures argileuses.

La variation du pourcentage d'oxydation a également été estimée et comparée aux évolutions proposée par le modèle CALMIM.

Les paramètres suivants ont été sélectionnés comme paramètres explicatifs des variations des émissions de méthane :

- température (diffusion des gaz, oxydation du méthane) ;
- pression (contrôle des flux convectifs, en particulier sur les zones anciennes en faible dépression où la dépression appliquée est proche de celle des variations barométriques journalières (100-150 Pa)) ;
- infiltration efficace : (saturation en eau de la couverture contrôlant la diffusion et la convection des gaz dans la couverture).

9.4 Application au site pilote étudié

Contrairement aux premières mesures réalisées en juin sur la zone réaménagée avant 1997 avec un arrêt du captage, les campagnes suivantes de septembre 2011 (1 campagne), novembre 2011 (2 campagnes) et de l'année 2012 (3 campagnes) ont été réalisées sans arrêt du captage.

Six campagnes de « scanning » IFM du site ont été réalisées sur la durée du programme sur chacun des types de couverture.

En complément de ces scans IFM, des mesures de suivi ont été réalisées sur des échelles de temps infra horaire à hebdomadaire sur les 9 points de suivi (H1, H2, H3, I1, I2, I3, F1, F2, F3) considérés. Ce suivi des couvertures a été réalisé en parallèle aux mesures de scan IFM par une équipe de deux techniciens dédiés afin de conserver la simultanéité des divers types de mesure (à l'échelle de la semaine).

La campagne initiale a comporté un scan IFM de l'ensemble du site comportant un raffinement du maillage au droit des zones les plus émissives (zone des puits), afin de pouvoir considérer l'importance des flux non diffus.

La première campagne a comporté également l'installation d'une station météorologique et de deux enregistreurs Gasclam®. L'objectif de l'installation de ce dernier type d'équipement a été de fournir des données complémentaires de variation de la qualité des gaz sous la couverture entre les points de suivi des alvéoles 3 & 4 lors de la première campagne de mesure.

Le Gasclam® a été disposé à la surface de la couverture, mais connecté à une sonde implantée à environ 50 cm de profondeur, à la limite de la couverture intermédiaire. Les températures élevées enregistrées sont dues au rayonnement solaire engendrant un effet de serre sur la tête du capteur. Les cycles diurnes/nocturnes des températures sont reproduits ainsi que les variations de la pression barométrique sur la Figure 17.

Concernant les teneurs en gaz, les enregistrements de teneurs démontrent une présence assez éparse de méthane à la profondeur de mesure (50 cm), atteignant au plus 0,5%, pour des teneurs en oxygène et en CO₂ relativement stables et proches respectivement de 14% et de 6% (cf. Figure 18).

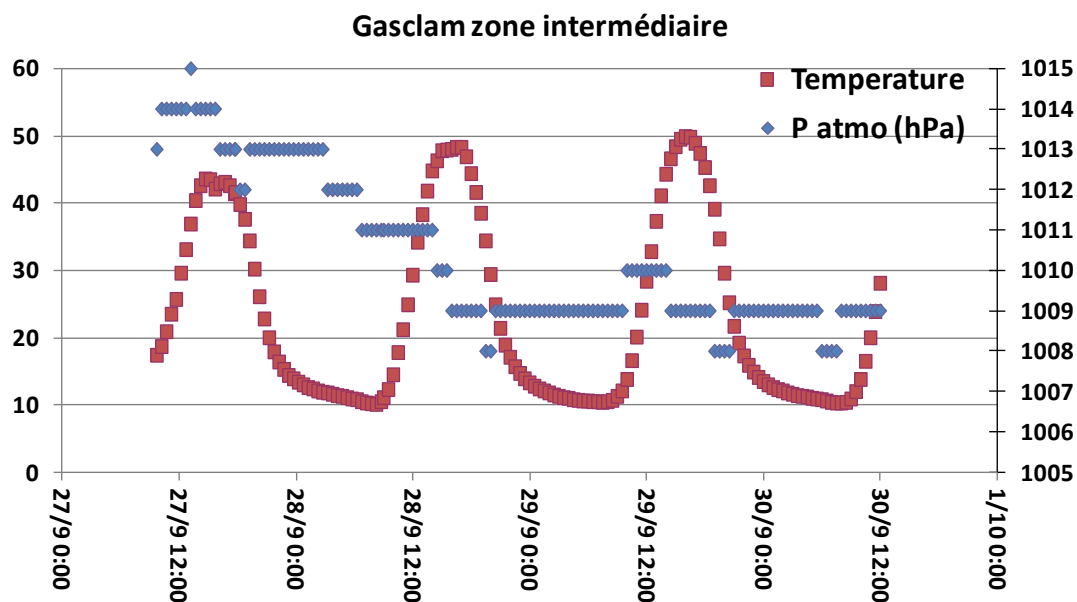


Figure 17 : Suivi des températures à la surface de la couverture et de la pression barométrique

Les évolutions symétriques des teneurs en O₂ et de CO₂ ainsi que la constance de la somme des teneurs en O₂ et de CO₂ sont des indicateurs de la consommation locale de l'oxygène et de la production également locale et concomitante de CO₂. Du fait de la présence de l'oxygène à une teneur de 14%, on ne peut exclure la présence d'un processus de fermentation aérobie dans la partie supérieure des déchets des zones des alvéoles 3 & 4, ce qui expliquerait les faibles flux de méthane observés à leur surface.

Les enregistrements effectués à la fin du mois de novembre 2011 sur un point ponctuel de la couverture intermédiaire démontrent une augmentation de la teneur en méthane. L'extrapolation de ces résultats ponctuels à l'ensemble de la couverture intermédiaire n'a pas été réalisée du fait de la faible représentativité de ce point. Ce suivi a permis néanmoins de mettre en évidence une probable augmentation de la teneur en méthane à la base de la couverture intermédiaire entre les mois de septembre et novembre 2011.

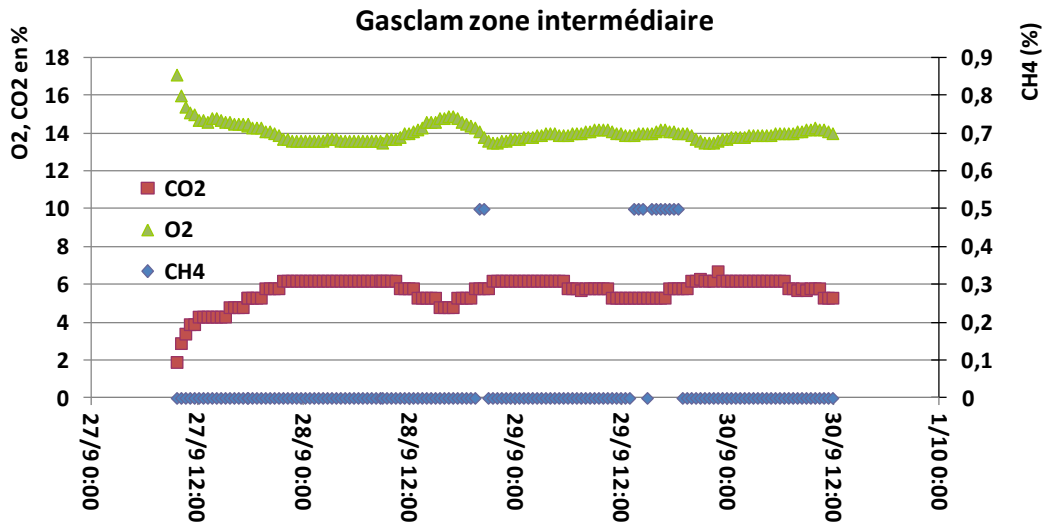


Figure 18 : Evolution des teneurs en CO₂, méthane et oxygène des gaz au sein de la base de la couverture de la zone intermédiaire (septembre 2011)

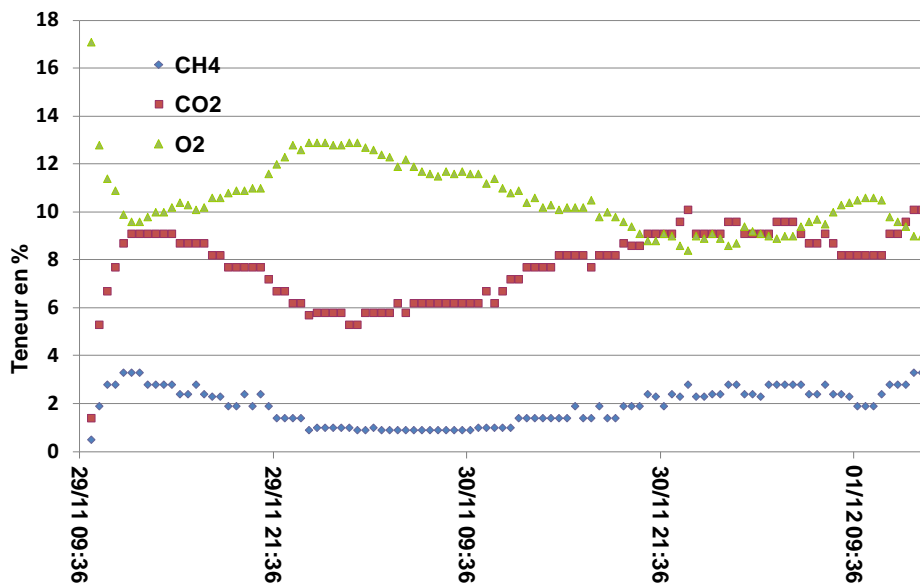


Figure 19 : Evolution des teneurs en CO₂, méthane et oxygène des gaz au sein de la base de la couverture de la zone intermédiaire (novembre 2011)

9.4.1 Evaluation des variations des émissions de méthane à partir des scans de la surface des zones concernées.

Chaque zone a bénéficié d'un scan de type IFM de la surface lors des campagnes de mesure des flux. Il a été affecté pour les besoins de l'analyse statistique, une valeur égale au seuil d'interprétation des valeurs IFM (0,07 ml/min/m²) au droit des points présentant une valeur de flux IFM non interprétable, afin de ne pas pénaliser l'interprétation sur ces zones.

Les valeurs moyennes des flux IFM sont donc estimées par excès, et ceci de manière plus nette dans les zones orangées du Tableau 13.

Les flux IFM de méthane mesurés lors des 3 campagnes de 2012 (février, mai et novembre 2012) ont été très faibles. Seule la période de transition entre les flux de la fin de septembre 2011 et de novembre 2011 a permis d'observer une faible variation de la moyenne des flux, qui est plus faible que l'erreur de mesure et d'interpolation. La faible amplitude des flux mesurés a engendré des intervalles d'erreur élevés présentés lors de l'étude des variations des flux des 3 types de couverture étudiés.

Du fait des faibles à très faibles valeurs de flux moyennes disponibles, et des intervalles d'erreur plus élevés que les valeurs moyennes, l'interprétation des variations reste délicate. Cette interprétation a été tentée au vu des connaissances générales disponibles sur le comportement des couvertures.

Les flux IFM mesurés à proximité des puits n'ont pas été comptabilisés afin de considérer les flux « diffus » uniquement. L'importance des flux de nature autre que diffuse a été évaluée plus haut dans le rapport, pour les données de la campagne de fin septembre 2011. Cette distinction a été rendue nécessaire pour l'application envisagée de la comparaison des flux diffus mesurés à ceux prédits par le modèle CALMIM.

Outre la moyenne, les paramètres statistiques décrivant la queue de courbe des distributions de flux IFM (percentile 90 et 95), sont présentés dans le Tableau 13 ci-dessous. La moyenne malgré sa sensibilité à la présence de valeurs extrêmes (et donc sa moins bonne « robustesse » statistique) a été ici préférée à la valeur médiane, du fait de la forte majorité de valeurs au seuil d'interprétation des valeurs IFM (0,07 ml/min/m²) pour les zones autres que la zone de couverture hebdomadaire, dite zone « sable ». Les cellules à fond coloré du tableau mettent en évidence la faible représentation statistique des flux diffus pour la couverture intermédiaire de l'alvéole 4 (une campagne de mesure très peu représentative sur 3 campagnes) et pour la couverture de l'alvéole 3 ainsi que la couverture mixte finale (deux campagnes très peu représentatives des flux diffus sur 3 campagnes).

Tableau 13 : Tableau récapitulatif des paramètres des distributions statistiques des flux IFM des campagnes menées en septembre et novembre 2011 sur 5 types de couverture.

		Flux IFM de méthane en ml/min/m ²				
		Couverture Hebdomadaire Zone « sable »	Couverture Intermédiaire Alvéole 4	Couverture Intermédiaire Alvéole 3	Couverture Mixte inter./finale Casier 11	Couverture finale Zone ancienne
Fin septembre 2011	Moyenne	8,0	7,9	0,91	1,6	1,38*
	Percentile 90	26	0,07	3,8	3,0	0,51*
	Percentile 95	28	22	7,2	13	5,0*
Mi novembre 2011	Moyenne	10	3,2	0,07	0,09	4,1
	Percentile 90	37	8,2	0,07	0,07	8,4
	Percentile 95	43	19	0,07	0,07	28
Fin novembre 2011	Moyenne	5,1	1,3	0,14	0,29	5,8
	Percentile 90	17	1,0	0,07	0,07	9,4
	Percentile 95	18	2,5	0,18	2	41

* réalisation des mesures en juin 2011 et non en septembre 2011 pour la zone ancienne

La couverture de la zone « sable » voit son débit moyen d'émission de méthane légèrement croître puis se réduire de moitié à l'issue des 3 premières campagnes de mesure. Ce comportement est différent des autres couvertures.

On observe néanmoins que le comportement émissif de la couverture de l'alvéole 4 se réduit également (d'un facteur 2,5) proche de celui de la couverture sableuse (facteur 2) entre les deux dernières campagnes (mais reste dans l'incertitude des flux moyens IFM du fait de la faible représentation statistique).

Ces deux alvéoles (zone sable et alvéole 4) ont vu ainsi leurs émissions globalement se réduire, de manière plus nette (mais moins robuste) pour l'alvéole 4. Le percentile 95 des émissions a décliné également indiquant que les flux sont restés de type diffus. Concernant l'alvéole 4, seuls 2 points sur 27 ont fourni un signal IFM exploitable en septembre, l'estimation par la moyenne est donc moins « robuste » sur cette campagne.

Le comportement de l'alvéole 3 et du casier 11 marque une chute très brutale des flux de méthane entre la fin septembre et la mi-novembre (d'un facteur 13 à 18), ces flux étant déjà très faibles et peu « robustes » en septembre pour l'alvéole 3. Cette chute ne peut a priori s'expliquer par une oxydation plus forte, et semble montrer ainsi une sensibilité forte de ces deux types de couvertures aux cumuls des pluies de la mi-octobre à la mi-novembre (cf. Figure 51 en annexe). Les émissions moyennes de ces deux types de couvertures remontent ensuite de la mi-novembre à la fin novembre de manière modérée (d'un facteur 2 à 3). Cette remontée s'explique probablement par l'arrêt de la période pluvieuse vers la mi-novembre.

Le comportement de la zone ancienne est singulier du fait de la croissance des émissions constatées. Cette croissance concerne néanmoins une période de 5 mois environ (début juin / fin novembre) plus longue que sur les autres zones, combinée avec des conditions de dégazage différentes.

La croissance très modérée (facteur 1,4) des émissions de méthane sur cette zone entre la mi-novembre et la fin novembre peut être comparée à celle plus importante décelée sur l'alvéole 3 et le casier 11. Le ressuyage a priori plus lent sur cette zone de nature plus argileuse peut expliquer cette croissance modérée des flux.

Le percentile 95 des distributions de flux IFM croît globalement de manière plus prononcée, pour atteindre un facteur 8 : on assiste donc ici à un phénomène de réduction des flux diffus de faible intensité au profit de plus forts flux : ce comportement semble s'expliquer par le passage préférentiel des flux dans les zones de fissures, l'augmentation de la teneur en eau moyenne de la couverture (en réduisant les flux diffus) augmenterait la part des plus forts flux. Cette augmentation des plus forts flux a probablement pour origine une fissuration de la couverture suite à la période estivale.

Il faut noter que la légère augmentation des flux notée sur l'intervalle entre les deux premières campagnes pour la zone sableuse n'est pas significative du fait du changement des points de mesure.

L'humidification de la couche de déchets par les précipitations concentrées sur la période entre les deux premières campagnes de mesure pourrait également expliquer une méthanogénèse plus active générant des émissions plus fortes (phénomène plus sensible pour les déchets sous la couverture sableuse, plus perméable).

On peut tenter de distinguer 4 comportements de couverture sur la période de suivi :

- un comportement de couverture de nature sableuse présentant une réduction modérée (d'un facteur 1,6) des émissions de méthane ;
- un comportement de couverture de nature plus argileuse sur les alvéoles 3, 4 et le casier 11 ; accompagné d'une réduction des émissions d'un facteur 6 ;
- un comportement de couverture argileuse de faible épaisseur, sensible aux fissures, sur la zone ancienne ;
- une absence de flux diffus de méthane sur la zone du dôme, indiquant ainsi l'importance de l'épaisseur d'argile.

Ces données permettent de fournir une première estimation quantitative de la variabilité des émissions de méthane dans un contexte de saturation hydrique progressive de la couverture à l'échelle saisonnière.

Un suivi des émissions de méthane a également été réalisé à des échelles de temps plus courtes sur les 9 points sélectionnés (suivi horaire, journalier et hebdomadaire) et fait l'objet des paragraphes suivants.

9.4.2 Evaluation des variations des émissions de méthane à partir des suivis ponctuels.

Afin de pouvoir estimer les variations des émissions à une échelle de temps plus courte que la durée moyenne d'une campagne de flux IFM calibrés par des mesures de flux par chambre à recirculation, soit une durée de quelques jours, un suivi a été réalisé sur 9 points à une fréquence variant entre 15 minutes et 12 h, sur deux périodes d'une semaine durant les campagnes de fin septembre et de fin novembre 2011.

Afin de pouvoir réaliser des mesures en parallèle sur 2 à 3 points, des dispositifs automatisés de mesure ont été utilisés ainsi que des mesures manuelles.

Ce suivi sur 1 à 3 points pour les 5 types de couvertures, à l'échelle d'une zone variant entre 0,22 ha et 1 ha ne peut prétendre évaluer de manière quantitative les émissions sur une zone mais il permet de démontrer les tendances et l'importance de la variabilité ponctuelle des flux. Du fait du choix de points « émissifs » pour les besoins du suivi et de la forte importance de ces points dans les moyennes des flux, les tendances observées sur ces points sont supposées être représentatives (ou majorantes) du comportement global des zones considérées.

Le suivi des flux a ainsi été typiquement réalisé sur une journée puis complété en fin de semaine afin d'obtenir des points complémentaires de suivi.

9.4.2.1 Suivi au droit de la zone de couverture hebdomadaire

Campagne de mesure de fin septembre 2011 (26/9 au 30/9/2011)

Ces flux sont représentés sur la Figure 20 et la Figure 22.

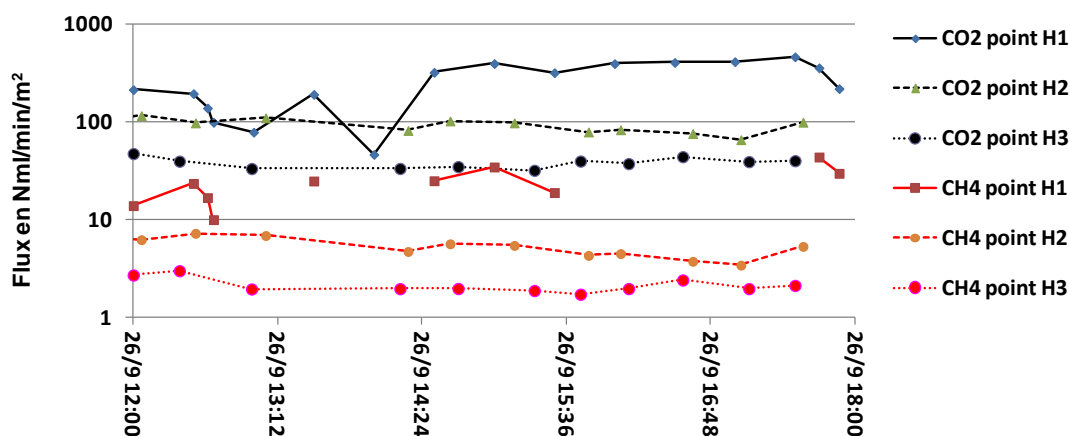


Figure 20 : Evolution des flux de méthane et de CO₂ pour les 3 points H1, H2 et H3 de la zone de couverture hebdomadaire le 26 septembre 2011

On peut observer des variations concomitantes des flux de CO₂ et de méthane, avec cependant pour ces derniers des valeurs beaucoup plus faibles des flux de l'ordre de un à deux ordres de grandeur.

Les variations relatives des flux sont d'autant plus importantes que les flux sont élevés : l'écart-type atteint plus de 50% de la valeur moyenne pour les flux de CO₂ au point H1, alors qu'il est de l'ordre de 13% pour ces mêmes flux au point H3, malgré la réalisation de 15 à 25 mesures au droit de chaque point. La bonne gradation des flux de CO₂ permet de fournir une estimation précise de la variabilité individuelle des points de mesure de flux pour une gamme étendue de flux de CO₂. La gamme des flux de méthane observé par mesure IFM est également reproduite pour les points H1 à H3, avec des flux moyens de méthane (de 22, 5,6 et 2,3 ml/min/m²) encadrant la valeur moyenne observées sur cette zone (8 ml/min/m²).

Les variations les plus notables sont observées sur les flux de CO₂ du point H1 : celles-ci sont particulièrement importantes alors que la variation barométrique reste assez faible (variation inférieure à 1 hPa sur la période concernée, cf. Figure 21). On remarque que malgré cette relative faiblesse de cette variation, les variations des émissions de CO₂ suivent de manière relativement symétrique les tendances de la pression barométrique. La couverture sableuse retransmet sans délai et de manière transparente l'influence de cette pression aux déchets sous-jacents du fait de sa faible épaisseur et de sa granulométrie grossière.

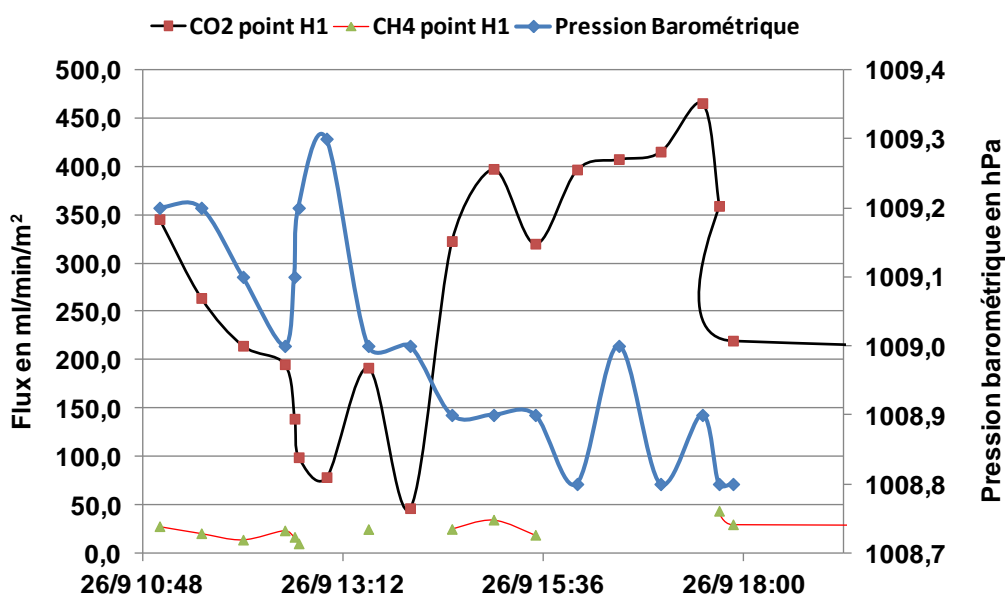


Figure 21 : Evolution comparée de la pression barométrique et des émissions en méthane au droit du point H1 (26 septembre 2011)

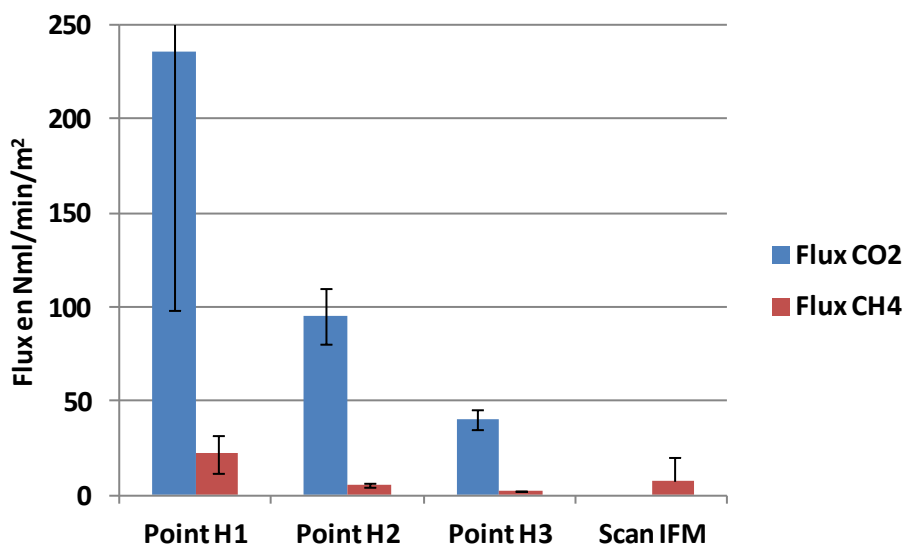


Figure 22 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO₂ au droit des points H1 à H3 et du scan IFM (26/9 au 30/9/2011)

Le coefficient de variation observé sur le point H1, dont la gamme des flux de méthane se rapproche le plus de celle observée sur la zone des sables (0,07 à 61 ml/min/m²) est plus faible que celui observé sur l'ensemble du site lors du scan IFM des flux de méthane, pour une taille d'échantillon de flux également comparable (30 flux IFM de méthane, 15 à 25 flux de méthane et de CO₂ par point H1 à H3).

On peut donc conclure que si les statistiques de flux du point H1 sont les plus proches de celles observées sur l'ensemble de la zone, la localisation unique des mesures (en considérant uniquement le point H1) réduit néanmoins la variabilité mesurée. Ce fait semble confirmer l'intérêt de suivre les points de plus forts flux (ce qui a été l'option choisie) avec la limite signalée sur la variabilité réduite. Un échantillonnage ponctuel d'une gamme de flux reste comparable à celui observé sur un échantillonnage spatial des flux, avec une variabilité cependant réduite.

Tableau 14 : Statistique concernant les flux de méthane et de CO₂ observées sur les 3 points H1 à H3 de la zone de couverture hebdomadaire (26/9 au 30/9/2011)

		Point H1		Point H2		Point H3	
		CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄
Flux en Nml/min/ m ²	Minimum	46,4	6,3	65,8	3,4	31,9	1,7
	Moyenne	236,4	21,9	95,2	5,6	40,2	2,3
	Maximum	465,5	43,7	116,1	8,2	48,3	3,0
	Coef. de Variat.	0,58	0,46	0,15	0,24	0,13	0,18

Campagne de mesure de fin novembre 2011 (29/11 au 1/12/2011)

L'évolution des flux sur les points de suivi constatée fin novembre (cf. Figure 23) est comparable à celle observée fin septembre, avec toutefois un affaiblissement général des flux, en particulier des flux de CO₂. La différence entre les flux de méthane et de CO₂ s'est ainsi réduit, en particulier pour les points H2 et H3. Cette réduction des différences entre les flux de méthane et de CO₂ semble indiquer une évolution vers l'établissement de la méthanogénèse.

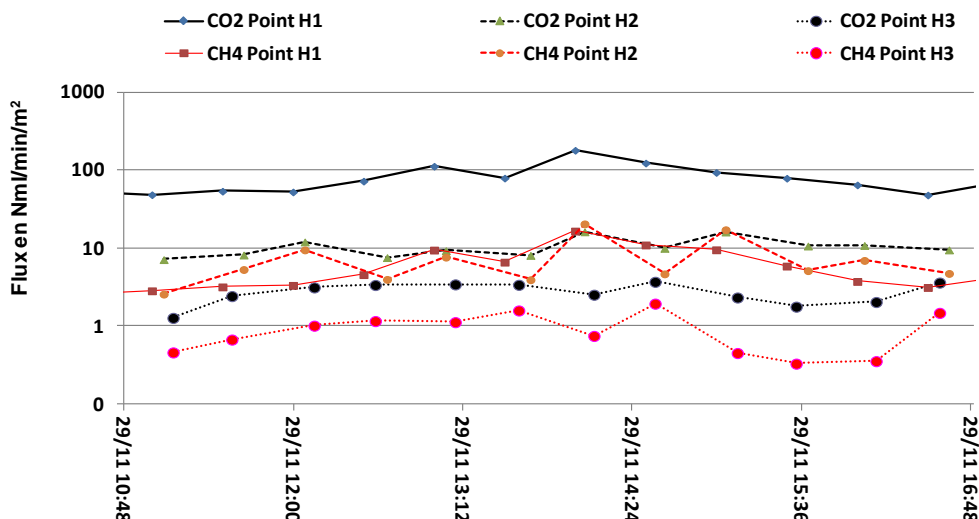


Figure 23 : Evolution des flux de méthane et de CO₂ pour les 3 points H1, H2 et H3 de la zone de couverture hebdomadaire le 29 novembre 2011

Le scan IFM de novembre a présenté un flux moyen de méthane (5,1 ml/min/m²) proche des flux moyens de méthane observés aux points H1 et H2, de respectivement 6,2 et 7,7 ml/min/m² (cf. Figure 24). La forte prépondérance des flux de CO₂ s'est réduite et n'est plus observée que sur un tiers des points de suivi.

Pour des flux de méthane comparables, les points H1 et H2 semblent donc présenter des stades différents d'avancement et de maturation des déchets.

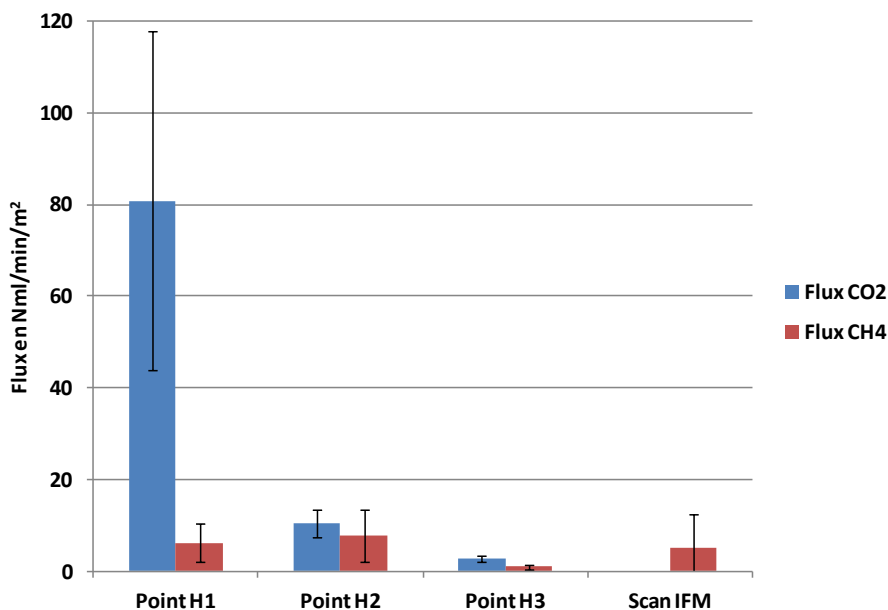


Figure 24 : Comparaison des valeurs moyennes et écart types des flux de méthane et de CO₂ au droit des points H1 à H3 et du scan IFM (29/11 au 1/12/2011)

9.4.2.2 Suivi au droit de la zone de couverture intermédiaire

Campagne de mesure de fin septembre 2011 (26/9 au 30/9/2011)

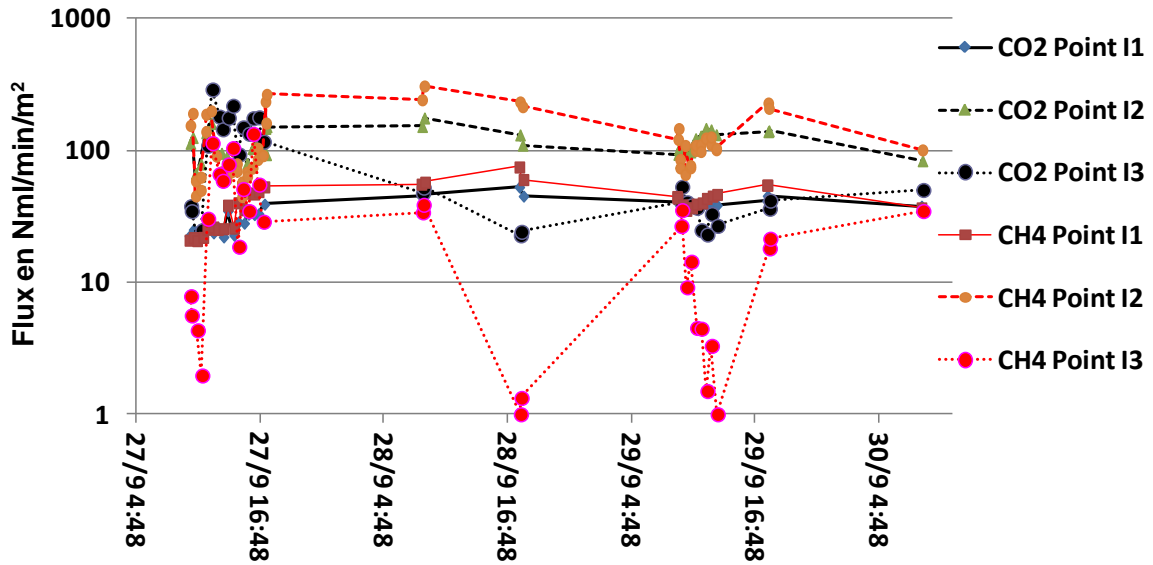


Figure 25 : Evolution des flux de méthane et de CO₂ pour les 3 points I1, I2 et I3 de la zone de couverture intermédiaire du 27 au 30 septembre 2011

L'évolution et l'importance des flux de méthane des points de suivi I1 à I3 est comparable à celle des flux de CO₂ : l'ampleur des variations est identique, avec toutefois des variations plus prononcées au niveau des émissions de méthane du point I3, qui ont diminué fortement sur 3 épisodes (de 10H03 à 11H08 le 27/9 (4 mesures), de 18H03 à 18H07 le 28/9 (2 mesures) et de 11H09 à 13H09 le 29/9 (5 mesures)).

Des variations aussi importantes n'ont pas été observées sur les points suivis de la zone de couverture hebdomadaire, alors qu'elles sont observées ici sur le point moins émissif en méthane.

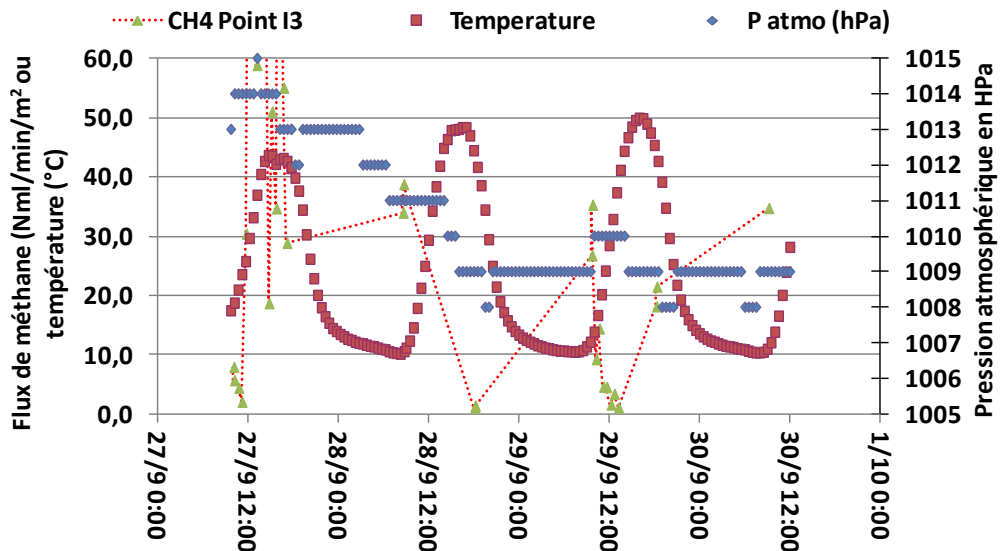


Figure 26 : Evolution comparée des flux de méthane du point I3, de la température et de la pression barométrique sur la zone de couverture intermédiaire (27/09/2011)

Les évolutions des flux sur le point I3 semblent être influencées par les deux paramètres que constituent la température de la surface du sol et la pression barométrique (cf. Figure 26):

- l'émission de flux est initiée par une baisse de la pression barométrique ;
- il semble qu'un écrêtage des flux est réalisé par la température : lors du passage du front de l'onde de progression de la température les flux ont tendance à diminuer.

Le « contrôle » par la température s'explique probablement par la dégradation plus active du méthane par les bactéries méthanotrophes. Le forçage radiatif sur la chambre de mesure avait en effet été réduit par la mise en place d'une protection (carton) afin de limiter l'élévation en température au sein de celle-ci. Par ailleurs, les flux mesurés à la chambre ont été normalisés en température et en pression pour éliminer les artefacts liés aux conditions différentes de mesure.

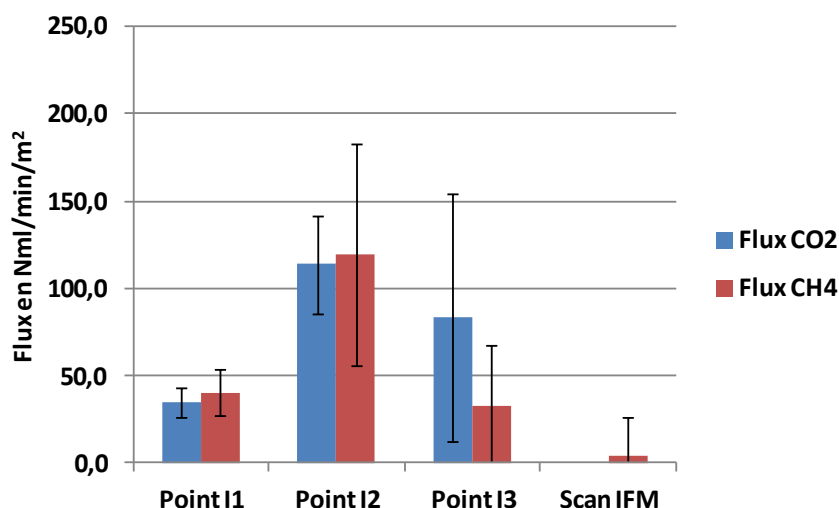


Figure 27 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO₂ au droit des points I1 à I3 et du scan IFM (27/9 au 30/9/2011)

Le biais lié à la surreprésentation des points à relativement fort flux est très visible sur le suivi des points de cette zone de couverture : du fait de la grande majorité de flux IFM non interprétables (sous la limite de 0,7 ml/min/m²), le flux moyen des alvéoles 3 et 4 est beaucoup plus faible que les flux moyens des points considérés. Le ratio CO₂/CH₄ des flux sur ces points est très différent de la zone de couverture hebdomadaire : le flux de CO₂ n'est pas très fortement majoritaire sur tous les points, seul le point I3 présente cette prépondérance. Celle-ci n'est probablement pas liée à la nature des biogaz produits sous la couverture, du fait de l'âge plus élevé des déchets sous l'alvéole 3. L'oxydation du méthane explique probablement cette prédominance des flux de CO₂, qui n'est toutefois observée que sur 1 des 3 points de suivi.

Campagne de mesure de fin novembre 2011 (29/11 au 1/12/2011)

Les courbes d'évolution des flux permettent de remarquer pour cette période automnale un croisement des courbes de flux de méthane et de CO₂ visible sur 2 points de suivi, avec en particulier une progression rapide et régulière des flux de méthane, le 30 novembre de 9h30 à 16h30, selon une pente supérieure à celle des flux de CO₂. Ce croisement s'est accompagné d'une progression de la température de l'air, de 2 à 3 °C le matin à 10 – 15 °C au milieu de l'après midi et d'une chute de la pression barométrique de 2 mBar.

Cette progression différenciée des flux de méthane et de CO₂ semble indiquer une plus grande sensibilité des flux de méthane à une chute de la pression barométrique. La contribution plus importante des couches plus profondes (plus riche en méthane), du fait de la chute de la pression barométrique, constitue également une hypothèse. Cette contribution plus importante du méthane reste limitée à un équilibre atteint entre les deux types de flux (cf. Figure 28, Figure 29).

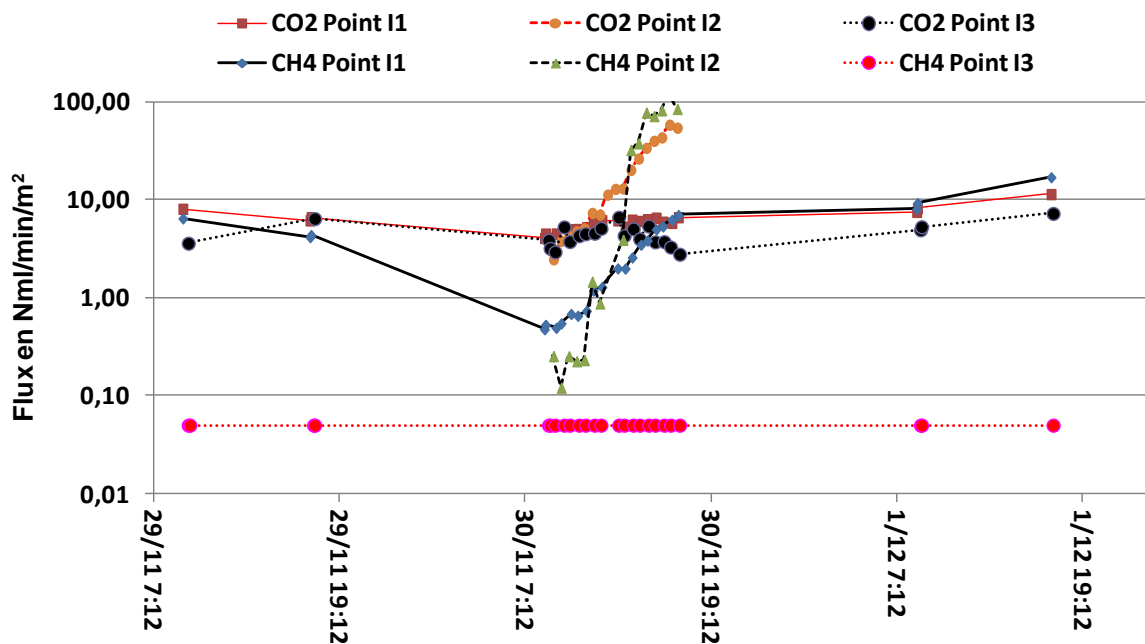


Figure 28 : Evolution des flux de méthane et de CO₂ pour les 3 points I1, I2 et I3 de la zone de couverture intermédiaire du 29 novembre au 1^{er} décembre 2011.

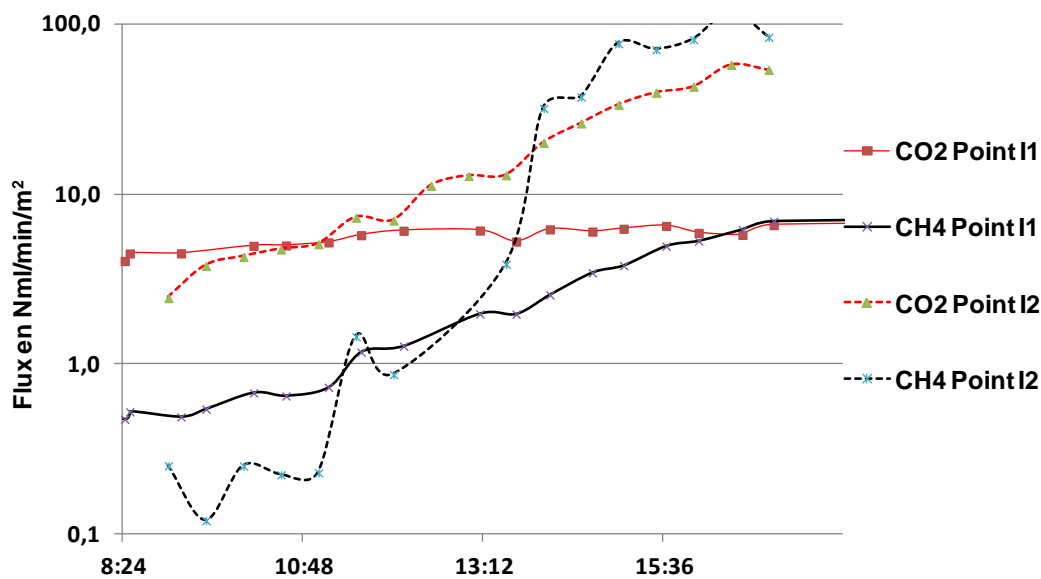


Figure 29 : Evolution comparée des flux de méthane et de CO₂ dans la journée du 30/11/2011

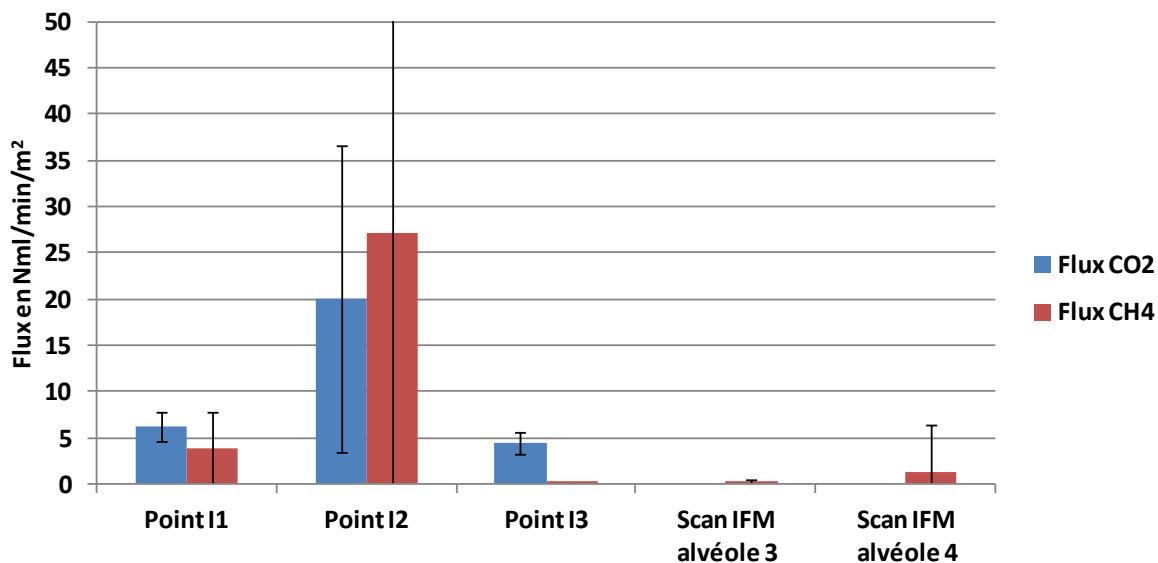


Figure 30 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO₂ au droit des points I1 à I3 et du scan IFM (29/11 au 1/12/2011)

Les valeurs de flux sont a priori très faibles pour le CO₂ sur l'alvéole 3 et quasi nulles pour ce qui concerne les flux de méthane, avec ainsi toujours la prédominance des flux de CO₂ observée en septembre (liée probablement à l'oxydation du méthane). Le point I3 représente probablement ainsi le comportement moyen de l'alvéole 3.

Les points I1 et I2 représentent les points de plus forts flux de l'alvéole 4. Le flux de méthane n'est plus majoritaire sur le point I1, mais la variabilité des flux de méthane reste élevée.

9.4.2.3 Suivi au droit de la zone de couverture finale

Campagne de mesure de fin septembre 2011 (26/9 au 30/9/2011)

Cette campagne de suivi a mis en évidence de très faibles flux de méthane, en particulier sur le point F2. Le point F1 a présenté une très forte amplitude de variation, sur plus de 4 ordres de grandeur, passant le 28/9 du seuil de mesure de la chambre à flux (0,05 ml/min/m²), à 10H30, à plus de 1l/min/m² le même jour à 17H39. Ce comportement de très forte amplitude indique que ce type de flux de nature convective est très fortement influencé par des paramètres extérieurs.

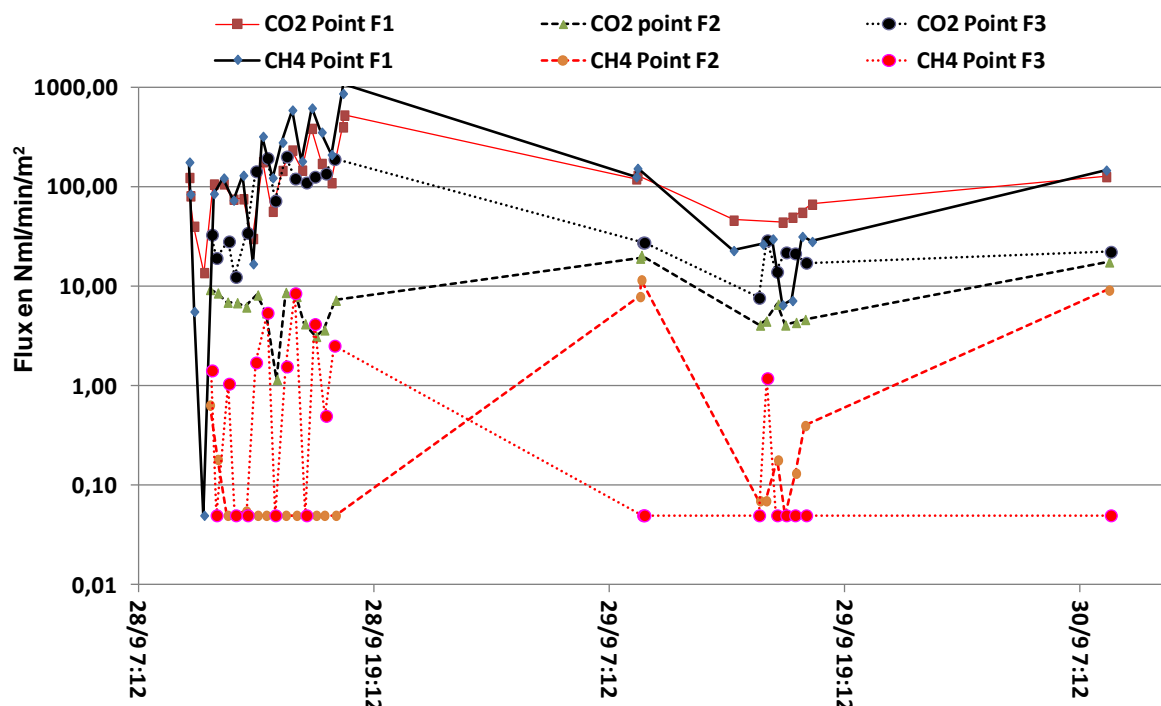


Figure 31 : Evolution des flux de méthane et de CO₂ pour les 3 points F1, F2 et F3 de la zone de couverture finale du 28 au 30 septembre 2011

Les données d'émissions des points où l'émission est suspectée d'être de nature convective doivent être comparées aux évolutions de la pression barométrique (cf. Figure 32). L'augmentation des flux de méthane est bien concomitante à la chute de la pression barométrique : la chute importante de la pression barométrique le 28 septembre 2011 a pour corollaire l'augmentation très nette des flux de méthane. Cette explication n'est cependant pas suffisante pour comprendre la chute des flux et de la pression barométrique observée le 29 septembre. Un second facteur susceptible de modifier les flux de nature convective est représenté par l'action des vents, en direction et en vitesse sur la surface de la couverture et sur le massif de déchets.

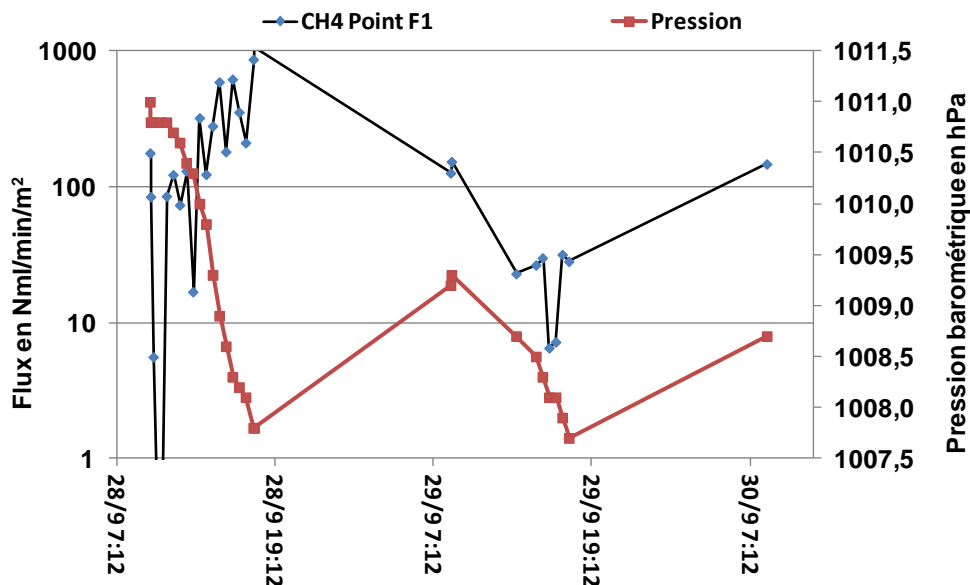


Figure 32 : Evolution comparée de la pression barométrique et des émissions en méthane au droit du point F1 (28 au 30 septembre 2011)

Les données de vitesse de vent de haute fréquence d'acquisition (une minute) de la station météorologique peuvent être confrontées aux évolutions des émissions de méthane de nature convective du point F1 (cf. Figure 33). On note que sur la journée du 28 septembre, le vent a vu sa vitesse moyenne progresser à un rythme comparable à l'évolution des flux observés sur une échelle logarithmique. Des rafales de vent étaient néanmoins présentes, ce qui rend plus complexe l'interprétation des éventuelles corrélations entre l'importance des flux observés sur le point F1 et l'évolution générale de la vitesse des vents. Ces rafales de vent, présentes dans la journée essentiellement, ne semblent pas avoir contrarié l'augmentation des émissions de méthane sur les journées du 28 septembre et du 29 septembre. Une analyse plus fine prenant en compte les directions et les vitesses instantanées mesurées pourraient éventuellement permettre de discriminer l'action des vents sur les mesures effectuées.

En effet, le vent va créer une surpression sur la partie du site au vent et une sous-pression sous les vents, engendrant une modification sensible des pressions au sein de la couverture. Ces pressions « dynamiques » s'ajoutent à la pression statique et la pression résultante va représenter un des moteurs du transport convectif du biogaz dans la couverture (avec la pression développée dans le massif de déchets, liée à la production de biogaz et au confinement de celui-ci).

Cette influence de la vitesse des vents est délicate à interpréter du fait des variations également rapide de direction observées. La prédominance des vents d'ouest sur ce site, en force et en fréquence, a été observée sur la période de la campagne de mesure de septembre (cf. Figure 34).

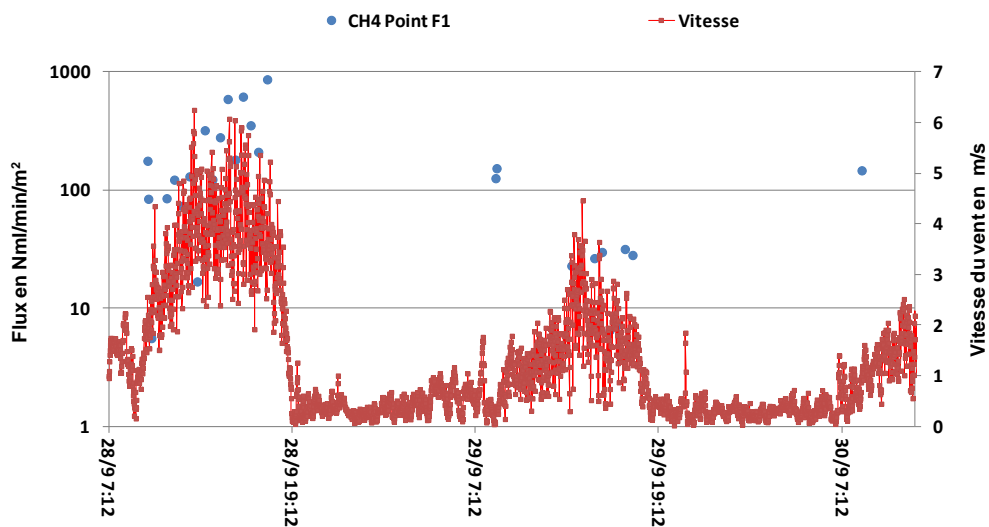


Figure 33 : Influence de la vitesse des vents sur les émissions de méthane du point de suivi F1 de la zone de couverture finale (28 au 30 septembre 2011)

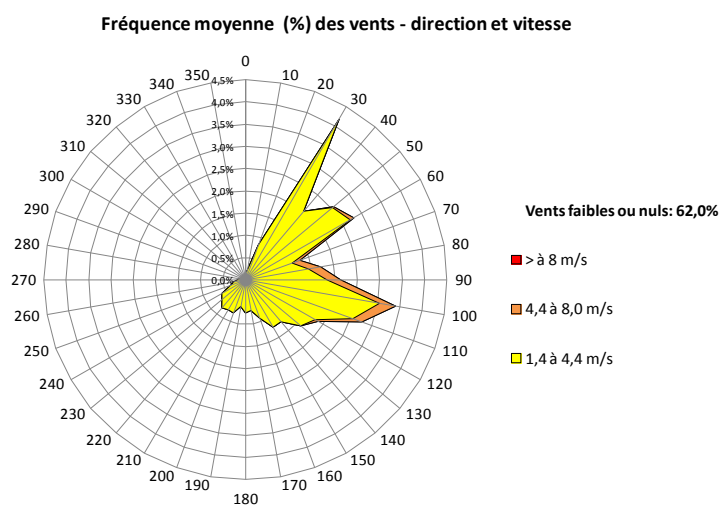


Figure 34 : Fréquence moyenne des vents en direction et vitesse sur la campagne de mesure de septembre 2011 (26/9/2011- 30/9/2011)

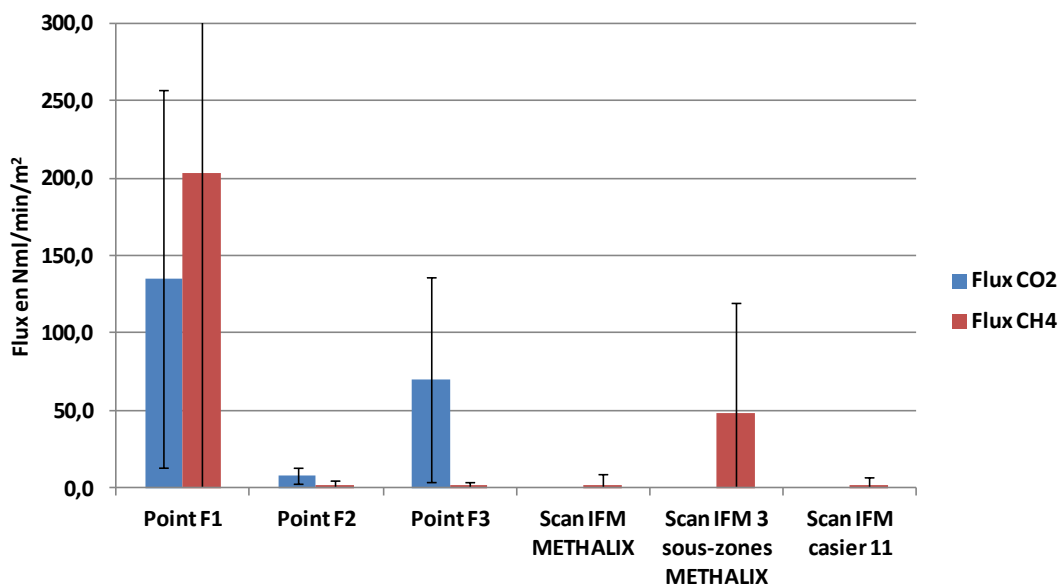


Figure 35 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO₂ au droit des points F1 à F3 et du scan IFM de la surface totale et des 3 sous zones émissives rencontrées (28/9 au 30/9/2011)

La Figure 35 souligne les constatations précédentes : le point F1 présente une dispersion de sa distribution statistique des flux de méthane et de CO₂ très supérieure aux autres points de suivi et aux scans IFM réalisés sur la zone ancienne et le casier 11. On rappelle que les seuls les points classés comme diffus ont été considérés dans ses statistiques, du fait de la présence sur la zone ancienne et sur le casier 11 de forts flux à proximité des puits.

Campagne de mesure de fin novembre 2011 (29/11 au 1/12/2011)

Cette campagne a permis de vérifier les hypothèses précédentes, à savoir :

- un comportement particulier du point F1, représentatif des flux convectifs ;
- une tendance à l'affaiblissement et à la stabilisation des flux sur les 2 autres points, présentant des comportements de flux de type diffus.

Il faut noter également que la chute de 4 mBar de la pression barométrique a engendrée une reprise modérée des émissions de flux, décelable sur le point F2 essentiellement.

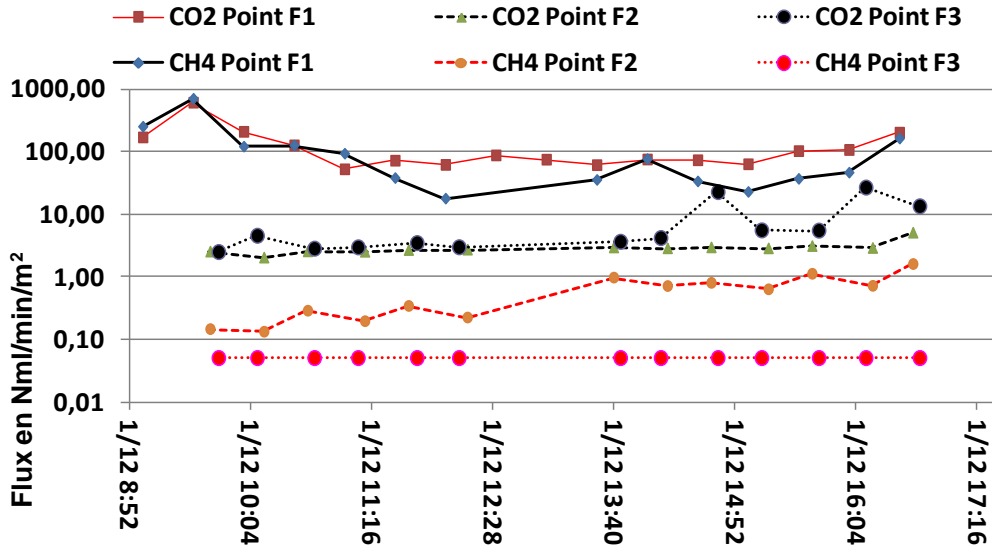


Figure 36 : Evolution des flux de méthane et de CO₂ pour les 3 points F1, F2 et F3 de la zone de couverture finale le 1^{er} décembre 2011

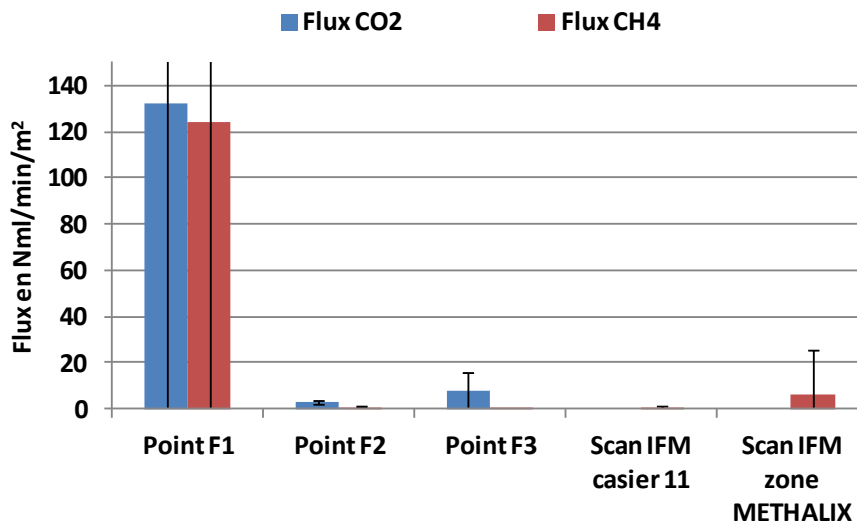


Figure 37 : Comparaison des valeurs moyennes et écart type des flux de méthane et de CO₂ au droit des points F1 à F3 et du scan IFM du casier 11 et de la zone ancienne (29/11 au 1/12/2011)

Concernant les flux moyens et leur variabilité (cf. Figure 37) la répartition des flux observée en septembre se confirme avec un affaiblissement des flux de méthane sur les points de suivis, a contrario de la moyenne sur la zone réaménagée antérieurement à 1997.

La valeur moyenne et la variation des émissions de méthane et de CO₂ observées sur certains points de surveillance ont été comparées. Nous avons observé de grandes variations de flux de méthane provenant des différents points de surveillance. Les variations des flux surfaciques de méthane sont généralement de l'ordre d'un ordre de grandeur pour la couverture temporaire et peuvent atteindre plus d'un ordre de grandeur pour la couverture intermédiaire et finale, pour une échelle de temps de quelques jours.

10 Utilisation des données de calage

10.1 Utilisation des modèles classiques

L'utilisation des données de calage a été prévue aux moyens de 2 types de modèle :

- les modèles classiques d'estimation de la production de GES et de manière indirecte des émissions non captées, dites « résiduelles » ;
- les nouveaux modèles d'estimation directe des émissions diffuses, tel que CALMIM.

Parmi ces « outils classiques », on doit distinguer :

- l'outil ADEME : il a permis d'harmoniser les pratiques d'évaluation de la production des gaz à effets de serre. Il demeure que cet outil doit être calibré sur site en utilisant des cinétiques et des potentiels de production de biogaz adaptés à chaque site ;
- les outils internes aux exploitants. Un outil de ce type a été mis en œuvre par SITA. Il résulte de l'optimisation des outils disponibles dont l'outil ADEME ;
- GasSim : ce modèle fait partie des modèles les plus aboutis en termes de prise en compte de la variabilité des paramètres.

GasSim a pour particularité d'avoir été conçu pour permettre de réaliser une approche probabiliste de l'estimation des flux. L'épaisseur et la conductivité hydraulique de plusieurs couches constituant la couverture peuvent être définies par une fonction de distribution, permettant ainsi d'évaluer l'incertitude sur le résultat final.

La principale faiblesse actuelle de Gassim consiste dans la répartition des flux diffus et des flux convectifs et en l'évaluation de l'oxydation : celle-ci est réalisée le plus souvent par défaut en considérant 10% d'émission. Or les travaux récents montrent que l'oxydation est principalement limitée par le temps de séjour au sein de la couverture (et donc la possibilité pour les biogaz d'explorer un volume poreux suffisant).

Les flux de nature diffusive sont donc minorés par l'oxydation que de manière forfaitaire.

10.2 Evaluation par les nouveaux outils : CALMIM

Le modèle CALMIM a été développé pour permettre une évaluation des émissions de GE, classée de « niveau 3 » par les experts de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

Cet outil comprend un modèle 1D de diffusion, transport et oxydation qui est spécifique au site.

L'INERIS a testé ce modèle à 3 niveaux d'utilisation :

- sans calibration : tel que proposé par les auteurs dans une optique de déclaration, sans visée de comparaison avec des seuils ;
- avec une calibration minimale : mesures de concentration en méthane du biogaz ;
- avec une calibration la plus complète sur 3 types de couvertures.

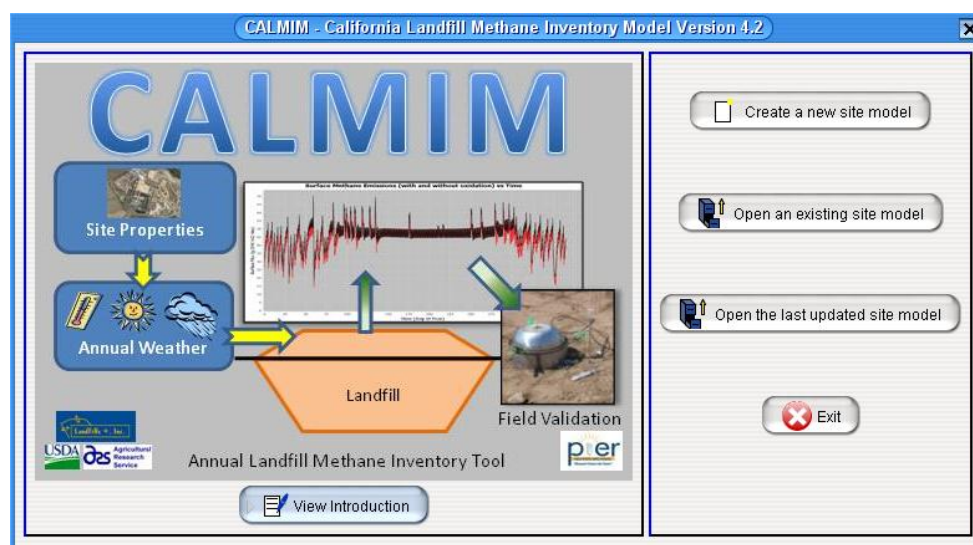


Figure 38 : Outil CaLMIM développé pour une évaluation spécifique au site de l'oxydation du méthane et de l'importance des émissions résiduelles (D'après K. Spokas & al, 2010)

10.2.1 Test de calage sur une couverture perméable

L'application de l'outil suppose des pré-requis non présentés dans le manuel d'utilisation : l'outil a été validé sans tenir compte de manière précise du captage des biogaz et suppose une évaluation par le modélisateur de la fraction de la surface des alvéoles de stockage captée par les puits/drains de captage.

Or, contrairement aux flux diffus, les flux à proximité des puits ne sont généralement que peu affectés par l'oxydation, aussi la variation de leur flux ne sera a priori pas expliquée par l'outil CALMIM.

Une des difficultés principales d'utilisation consiste donc à pouvoir estimer les surfaces à prendre en compte : l'outil a été construit selon un modèle 1D vertical des flux qui ne prend pas en compte la répartition des puits et de leur dépression. Un modèle numérique 2D, voire 3D serait nécessaire pour pouvoir réaliser cette prise en compte.

Des hypothèses fortes (discrimination des flux, répartition dans l'espace) ont été choisies pour contourner cette première difficulté, qui n'existe que pour les zones disposant d'un réseau de drainage des biogaz.

La difficulté de calage croissant avec le nombre de couches de matériau, les premiers essais de calage ont été réalisés avec la couche la plus simple (de la zone « sable ») consistant en la couverture hebdomadaire recouvrant la zone d'exploitation.

Sans calage, sur cette zone, le flux moyen de méthane estimé par le modèle est de l'ordre de 4 à 5 g/m²/jour (soit environ 5 ml/m²/min), soit une valeur équivalente au flux moyen le moins élevé rencontré.

Un paramètre de calage important est constitué par la qualité des gaz sous la couverture : cette qualité a été évaluée sous la zone intermédiaire par l'enregistrement du Gasclam. Elle doit faire l'objet d'une estimation par les teneurs mesurées sur les puits pour les couvertures disposant d'un dégazage.

Pour la couverture sableuse, on a supposé une teneur pouvant atteindre la teneur la plus élevée observée ponctuellement sous la couverture intermédiaire (mesure du Gasclam), soit 0,5% de CH₄ vol./vol..

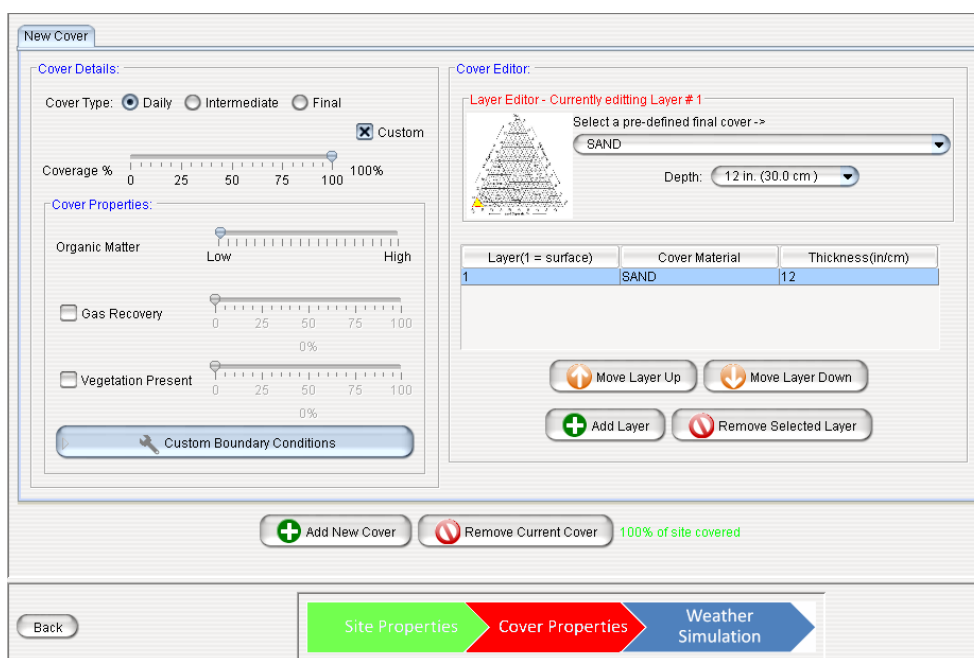


Figure 39 : Choix des paramètres pour la couverture hebdomadaire (CALMIM 4.2)

Site: zone sable

*	New Cover
Gas Recovery	0%
Cover Type	Daily
Cover area %	100%

*	New Cover
Layer 1	SAND [12 in. (30.4 cm)]
Layer 2	
Layer 3	
Layer 4	
Layer 5	
Layer 6	
Layer 7	
Layer 8	
Layer 9	
Layer 10	

*	New Cover
Methane Concentration Base of Cover (% vol)	0.5%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	8.083
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	7.796
% Oxidation (cover type)	3.627
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	6.218
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	6.447
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	0.0

Figure 40 ; Résultat de CALMIM 4.2 pour la couche de sable de 30 cm de la zone hebdomadaire et une calibration minimale (teneur en méthane sous la couverture)

Les premiers tests réalisés avec la version 4.2 montrent donc que l'on doit augmenter la teneur moyenne en méthane sous la couverture (par défaut fixée à 0,3% pour ce type de couverture) pour reproduire précisément les flux IFM moyens observés sur 3 campagnes de mesure (de 5 à 10 ml/min/m², unité équivalente au g/m²/jour pour le méthane) et pour permettre un calage sur cette couverture simplifiée.

Les calages postérieurs, plus complexes, ont été tentés avec la nouvelle version 5.1 de CALMIM.

On peut d'ores et déjà remarquer que le modèle fournit une estimation des émissions très proche des données mesurées, avec l'utilisation de données climatiques provenant d'un modèle global.

10.2.2 Calibration du modèle CALMIM v5.1

10.2.2.1 Calibration par les données climatiques spécifiques du site

Le premier paramètre de calibration concerne les données de positionnement du site étudié. Le modèle CALMIM comprend un module de calcul de l'insolation et d'évaluation des températures minimales et maximales pour une latitude, longitude et un avancement donné dans l'année.

Ces valeurs moyennes journalières vont permettre de calculer la saturation en eau de la couverture. Celle-ci représente un paramètre de variabilité de l'importance des flux diffus avant oxydation. La reproduction des variabilités journalières réelles est prévue dans CALMIM 5.1 au moyen de la transmission d'un fichier de données climatiques.

Dans le cas où l'on doit reproduire les émissions passées, il est donc possible d'utiliser des données mesurées de températures maximales, minimales et de précipitations journalières. Dans le cas du site pilote, les données d'une station météorologiques très proches du site ont été utilisées du fait des problèmes rencontrés avec la station météorologique mise en place sur le site à l'occasion du démarrage du suivi annuel (septembre 2011).

Si l'on compare les moyennes annuelles des paramètres climatiques mesurées à proximité du site et les valeurs du module de calcul climatique de CALMIM (Solarcalc), on remarque que l'amplitude calculée dans CALMIM des variations des paramètres climatiques est significativement plus faible (cf. Tableau 15).

Tableau 15 : Amplitude comparée des paramètres climatiques de CALMIM v5.1 et des données d'une station météorologiques située à proximité du site pilote

	2011	2012	CALMIM
Température maximale (°C)	36,9	37,5	24,3
Température minimale (°C)	-6,4	-16,4	0,5
Précipitation annuelle (mm)	495,5	753,7	607,7

Outre l'amplitude, la variabilité réelle des températures est significativement plus forte (cf. Figure 41).

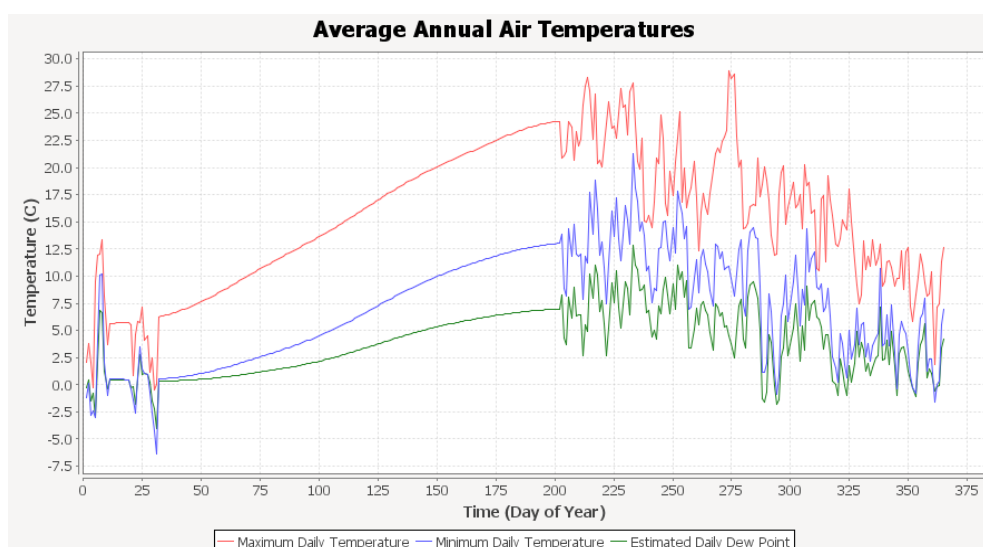


Figure 41 : Températures simulées dans CALMIM (du jour 30 au jour 200 environ) remplacées par les températures réelles (les autres jours de l'année 2011)

L'amplitude et la variabilité plus forte des données réelles sont également observées pour les précipitations (cf. Figure 42).

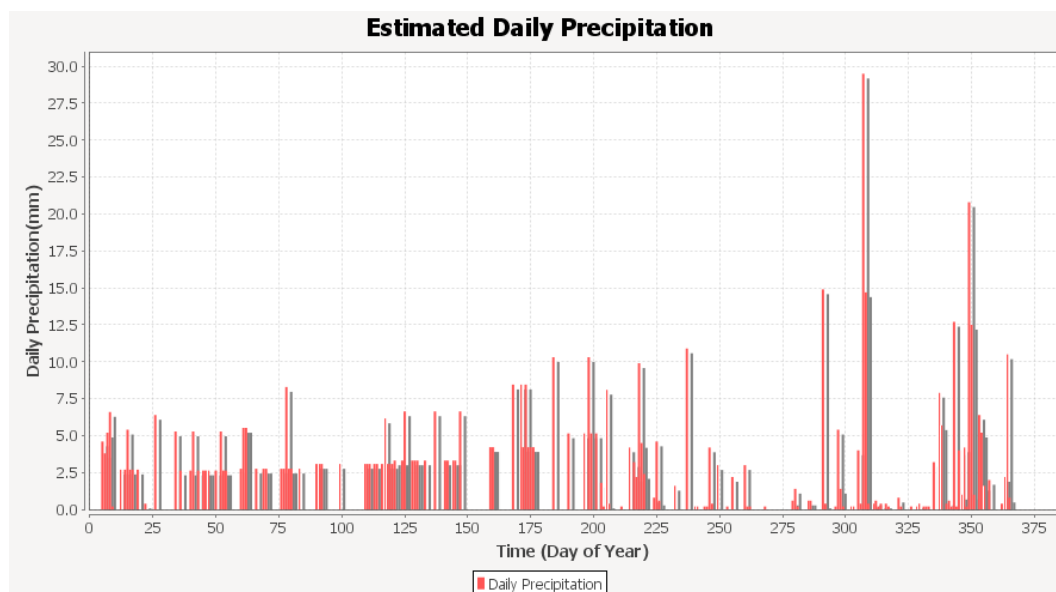


Figure 42 : Précipitations simulées dans CALMIM (du jour 30 au jour 200 environ) remplacées par les précipitations réelles (les autres jours de l'année 2011)

On note une modification de la zone d'oxydation calculée par CALMIM en utilisant les précipitations et les températures réelles. Les profondeurs de la zone d'oxydation sont équivalentes, mais les pourcentages d'oxydation sont plus élevés. A l'exception de la zone temporaire, cette variabilité accroît l'oxydation (cf. annexe 3).

10.2.2.2 Calibration par les données de textures

La texture des couvertures a été appréciée à partir d'échantillons de sols prélevés pendant la première campagne de mesure (juin 2011). Onze échantillons de sols ont été prélevés, au sein de la couverture (couverture « sableuse » de fin de semaine) et à mi-profondeur de la couverture intermédiaire et finale.

La variabilité de la présence d'une fraction fine argileuse et silteuse a engendré la formation d'agrégats de sols plus ou moins friables qui n'ont pas permis d'utiliser un tamisage par voie sèche. Une perte d'humidité des sols a également rendu le traitement des échantillons de sols par voie humide difficile.

L'interprétation a donc été essentiellement qualitative. On dispose des informations qualitatives suivantes :

- couverture temporaire (3 échantillons, sur 3 points) : texture sableuse dominante, avec une faible à moyenne fraction silteuse et une faible fraction argileuse ;
- couverture intermédiaire (6 échantillons de sol, de 5, 20 et 30 cm de profondeur sur 2 points) : texture variable sablo argilo silteuse, avec une fraction de silt et d'argile variable ;
- couverture finale (2 échantillons, sur deux points à 20 et 40 cm de profondeurs) : argile silteuse.

Ces données ont été comparées aux textures de sol disponibles dans CALMIM pour attribuer une texture à chacune des couvertures :

- couverture temporaire : texture sableuse ;
- couverture intermédiaire : texture sablo argileuse ;

- couverture finale : texture silto argileuse.

10.2.2.3 Calibration par les données de flux de méthane et de CO₂

On dispose de 7 campagnes de mesures réalisées entre le 8 juin 2011 (démarrage des tests) et le 21 novembre 2012 (fin du suivi). Du fait des travaux réalisés sur le site, des points de suivi ont été modifiés au début de l'année 2012, ce qui a réduit de fait la période de suivie. Il est apparu également que la période de calibration la plus intéressante disponible est représentée par le début de l'automne 2011, du fait de la réduction progressive des températures et donc en conséquence de l'efficacité de l'oxydation du méthane.

Deux phénomènes antagonistes sont donc à considérer :

- la réduction progressive de la porosité à l'air de la couverture, diminuant le flux diffusifs et les émissions à la surface ;
- la réduction de l'efficacité de l'oxydation, augmentant les flux de méthane décelables à la surface.

Les flux de méthane ont été investigués sur la quasi totalité du site en septembre 2011, ainsi que sur les zones de couverture « type » et sur les points associés pendant chaque campagne. Les flux de CO₂ et leur variation ont été mesurés sur les 9 points de suivi.

La mesure des flux de CO₂ et de méthane à la surface permet d'évaluer le taux d'oxydation à partir d'hypothèse sur le taux de méthane présent sous la couverture. Dans le cas où la respiration aérobie des déchets est faible (couverture comprenant peu de compost non mature, disposée sur des déchets suffisamment compactés), on peut faire l'hypothèse d'un bilan de masse et estimer le pourcentage d'oxydation à partir de la différence entre le flux estimé sous la couverture et le flux mesuré à la surface (cf. Christophersen & Kjeldsen, 2000) :

$$J_{CH4inf} = (J_{CH4sup} + J_{CO2sup}) * \left\{ \frac{C_{CH4inf}}{C_{CH4inf} + C_{CO2inf}} \right\}$$

$$\text{et \% oxydation} = 100 * (J_{CH4inf} - J_{CH4sup}) / J_{CH4inf}$$

où :

- J_{CH4inf} et J_{CO2inf} représentent les flux molaires de méthane et de dioxyde de carbone sur la face inférieure de la couverture ;
- J_{CH4sup} et J_{CO2sup} représentent les flux molaires de méthane et de dioxyde de carbone sur la face supérieure de la couverture.

Le pourcentage d'oxydation peut donc être estimé à partir du taux de méthane présent sous la couverture. Le calcul du pourcentage d'oxydation suppose néanmoins que ce ratio est suffisamment élevé pour que le flux J_{CH4inf} atteigne au moins le flux mesuré à la surface (J_{CH4sup}).

10.2.2.4 Phase de calibration du modèle avec les données des campagne de 2011

Problématique des couvertures temporaires

La teneur de la concentration en méthane à la base de la couverture conseillée par CALMIM est 0,3% pour ce type de couverture.

Les mesures effectuées en un point (suivi par le Gasclam® du 27/9/2011 au 30/9/2011), à la base de la couverture, ont montré des teneurs moyennes en méthane très faibles (<0,5%), atteignant au plus 0,5%.

Le pourcentage minimal de méthane est celui qui est observé à la surface de celle-ci, et qui peut être évalué à partir du ratio flux de méthane / (flux de méthane + flux de CO₂). En respectant strictement ce ratio, l'oxydation est nulle. Ce ratio constitue donc le ratio minimal à considérer.

Les mesures effectuées sur le terrain montrent que pour obtenir ce ratio minimal (correspondant à un bilan de masse équilibré), les ratios moyens (flux de méthane / (flux de méthane + flux de CO₂)) déduits des suivis des 3 points implantés sur la couverture temporaire sont beaucoup plus élevées que celui conseillé par CALMIM ainsi que celui mesuré ponctuellement : ces ratios croissent de 6,5 % (fin septembre 2011), à 20,5 – 22,4 % à la mi novembre 2011, pour atteindre 25% à la fin novembre 2011.

La croissance de ce ratio s'explique par une rétroaction de la couverture temporaire sur la teneur en biogaz à la base de la couverture : la perméabilité de celle-ci décroissant rapidement avec la saturation en eau plus élevée, la teneur en biogaz est ainsi d'autant moins diluée par l'air atmosphérique. Le calage de l'oxydation, qui nécessite l'utilisation d'un ratio de teneur en méthane, est donc délicat à réaliser à partir des points de suivi.

La comparaison des flux mesurés et estimés par CALMIM montre que les flux estimés par CALMIM sont compris dans l'intervalle de l'erreur des mesures (en considérant plus ou moins un écart type). La prise en compte des données climatologiques spécifiques permet essentiellement d'introduire une variabilité plus élevée dans le modèle CALMIM.

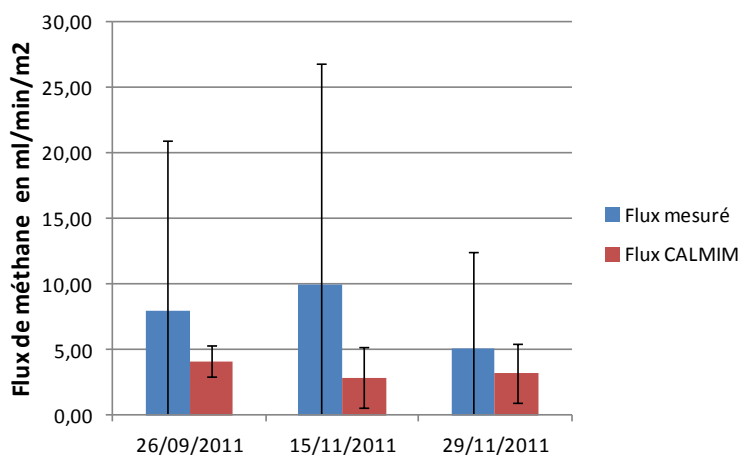


Figure 43 : Flux de méthane estimés et mesurés sur la zone de couverture hebdomadaire pour les 3 campagnes de 2011

Les flux de méthane résiduels, après oxydation, du modèle CALMIM présentent, du fait probablement de la plus faible variabilité des paramètres (couverture homogène, insolation calculée, teneur constante en méthane à la base de la couverture), un écart type moins élevé que les mesures. La valeur moyenne et la variabilité des flux mesurés de méthane diminuent vers la fin novembre : les flux mesurés sont alors très proches des flux estimés par CALMIM, malgré la teneur en méthane utilisée, qui est probablement trop faible. Le flux modélisé traversant la couverture est probablement plus élevé et doit compenser la teneur plus faible en méthane : la texture réelle du sable comprend une fraction fine qui n'a pas pu faire l'objet d'un ajustement plus précis de sa teneur en silt.

Le calage réalisé pourrait donc être affiné en cherchant à reproduire une texture de sol intermédiaire entre un sable et un sable silteux. La mesure du taux de méthane réalisé ponctuellement sous la couverture (Gasclam®) pour mieux estimer les flux résiduels diffus a permis de vérifier que la teneur proposée par CALMIM pour ce type de couverture (0,3% de méthane) est justifiée pour la période considérée (fin septembre). Les mesures des flux de méthane et de CO₂ sur les 3 points de suivi montrent néanmoins que la teneur moyenne en méthane sous la couverture doit augmenter significativement entre la fin septembre et la fin novembre, pour permettre d'atteindre un bilan de masse avec un taux d'oxydation nul, et être plus élevées pour permettre le calage d'un taux d'oxydation non nul. Cette forte variabilité de la teneur en méthane sous la couverture, spécifique à ce type de couverture, ne permet pas d'envisager un calage précis de l'oxydation sans modifier cette teneur.

Le flux de diffusion hors oxydation étant proportionnel à cette teneur de méthane à la base de la couverture, il est possible de traiter spécifiquement les flux de diffusion horaires et journaliers obtenu par CALMIM par un facteur lié à l'enrichissement périodique de la teneur en méthane pour obtenir une valeur de calage. Les variations de la richesse en méthane du biogaz capté (non disponibles sur le site pilote du fait des travaux sur la zone) constituent une modulation de la qualité du biogaz liée directement à la conduite du captage qui pourrait être mise en place dans l'avenir pour obtenir une estimation plus précise des émissions annuelles sur ce type de couverture.

Cas des couvertures intermédiaires

La teneur de la concentration en méthane à la base de la couverture (déduite du pourcentage de couverture du captage) est estimée par CALMIM à 34,47% de méthane. On ne dispose pas de mesures réalisées en continu par le Gasclam® sur cette zone.

Les teneurs en méthane nécessaires pour respecter un bilan de masse minimal (oxydation nulle) ont été calculées pour les 3 points de suivi et les 4 campagnes de mesures. Ces teneurs en méthane minimales déduites des mesures peuvent être comparées à la gamme de teneur proposée par CALMIM pour la base de ce type de couverture (31,5% - 45%). La valeur proposée par CALMIM (34,47%) reste dans l'intervalle représenté par la moyenne minoré/majoré de l'écart type des valeurs mesurées à la surface. La présence d'une oxydation suppose néanmoins une teneur majorée en méthane à la base de la couverture.

On peut donc conclure que la valeur du pourcentage de méthane présent à la base de la couverture, (condition aux limites du modèle proposée par CALMIM) constitue probablement une valeur par défaut, permettant de limiter les flux de diffusion, mais également le pourcentage d'oxydation.

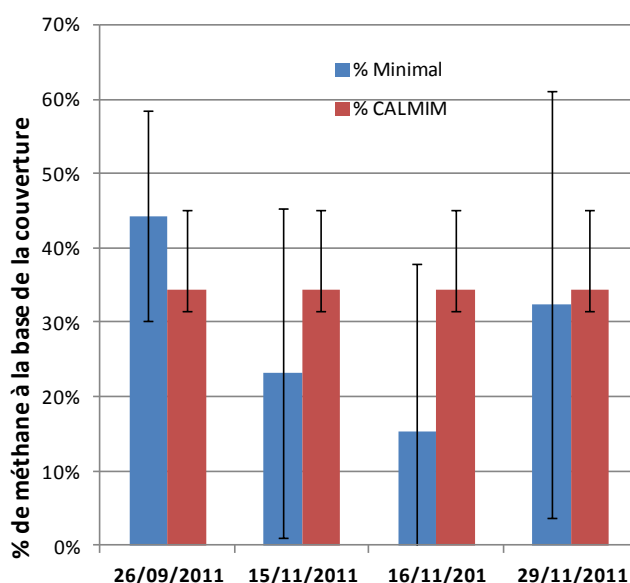


Figure 44 : Pourcentage minimal de méthane estimé d'après les mesures réalisées en surface comparé à la gamme de variation de teneur en méthane proposée par CALMIM

Contrairement à la zone temporaire, le flux sans oxydation est significativement plus élevé : il atteint en moyenne 101 ml/min/m², soit un flux 22 fois plus élevé sans prise en compte de l'oxydation.

Pour comparer les flux modélisés et mesurés nous disposons de deux zones intermédiaires (alvéoles 3 et 4) qui ont été suivies, mais seuls les points de mesure sur l'alvéole 4 ont été réellement émissifs.

Nous constatons ici un comportement différent du modèle : alors que les flux de méthane mesurés ont diminué au cours des campagnes, avec toutefois une grande variabilité due à un nombre de points émissifs de plus en plus réduit, les flux modélisés sont croissants avec CALMIM, avec également néanmoins une variabilité assez élevée (cf. Figure 45).

La variabilité des flux a été définie pour CALMIM par une fenêtre temporelle correspondant à la période de mesure sur le site : cette fenêtre temporelle varie typiquement d'une demi-journée à deux jours. Durant cette période les flux horaires après oxydation ont été recherchés au sein des fichiers

produits par CALMIM pour apprécier la moyenne et l'écart type des flux spécifiques à cette période (12 à 48 valeurs modélisées).

Dans le cas des mesures de flux, on a utilisé la moyenne et l'écart type des flux mesurés sur chacune des zones (de l'ordre de 30 à 80 mesures) pour la période considérée.

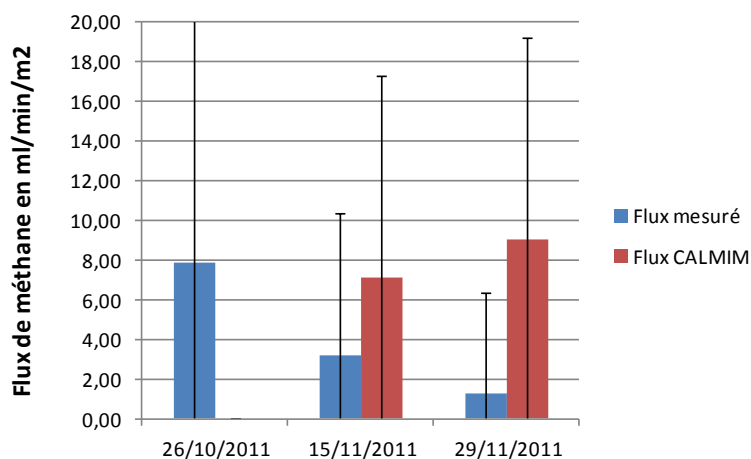


Figure 45 : Comparaison des flux moyens mesurés et modélisés sur l'alvéole 4 pour les campagnes de 2011

Les flux modélisés sans oxydation étant relativement constants et proches de 100 ml/min/m², la croissance des flux de CALMIM s'explique essentiellement par la diminution graduelle du taux d'oxydation de 100 % (26/9/2011), à 93% (15/11/2011) puis 91% (29/11/2011).

On peut noter que les flux modélisés par CALMIM restent dans l'intervalle d'erreur des mesures (moyenne des mesures majorée/minorée de l'écart type). Il est probable que l'oxydation se réduise, et donc que la tendance proposée par CALMIM soit adéquate pour l'oxydation, mais le comportement général n'est pas reproduit. Des changements de la texture de sols utilisée (argile sableuse) ont été tentés sur 7 autres textures (limon sableux, limon silto-argileux, limon sablo argileux, résultats présentés en annexe 3) sans parvenir à reproduire le comportement observé : l'influence de la réduction progressive de l'oxydation est prépondérante.

Du fait de ces difficultés de calibration, la condition de saturation de la base de la couverture (option par défaut de CALMIM) a été modifiée (en choisissant une condition de drainage) pour mieux tenter de reproduire les flux observés. L'action de la désaturation de la base de la couverture induite par cette nouvelle condition de drainage est importante : les flux moyens annuels de méthane avec et sans prise de l'oxydation augmentent respectivement de 10 et 100 ml/min/m² à 70 et 160 ml/min/m².

Ces flux sont beaucoup plus importants que ceux mesurés sur le terrain : il est probable que la couche de déchets ayant subi un premier tassement participe au drainage mais avec un comportement de sol présentant une porosité assez élevée. L'utilisation d'une couche de compost de 1,5 m (à la base de la couverture argileuse, dans le but de simuler le comportement hydrique de la partie sommitale de la colonne de déchets présente) a également été testée (résultats en annexe 3) pour moduler l'effet de drainage. Cette utilisation permet de réduire les flux, mais ne permet pas de reproduire la diminution des flux observée entre les campagnes de septembre et fin novembre.

Concernant les taux d'oxydation calculés par CALMIM, ceux-ci sont élevés (100 % à 91 %) sur la période considérée. Les taux d'oxydation estimés sur les 3 points de suivi sont très variables : ils varient de 0% à 100% suivant les points considérés et illustrent la forte variabilité ponctuelle liée à la texture de la couverture.

Le potentiel d'oxydation maximal utilisé par CALMIM (fourni par défaut par CALMIM) a également fait l'objet de tests et a été réduit progressivement de 400 µg/g de sol /jour à 150 - 200 µg/g de sol /jour sans pouvoir également reproduire les émissions mesurées sur le terrain.

Enfin l'effet d'un changement de latitude a également été testé en utilisant le même fichier d'entrée de données météorologiques, mais en modifiant la latitude de +/- 5° : le flux sans oxydation reste quasi constant, mais le flux avec oxydation est réduit de 12% pour une latitude nord plus faible de 5°, et il est augmenté de 12% également pour une latitude nord plus élevée de 5°.

La calibration par les données climatiques n'utilise que les données de pluviométrie, températures minimales et maximales. L'insolation est calculée par un modèle climatique (Solarcalc) : la calibration n'est pas encore possible sur ce paramètre par les données de site, ce qui induit probablement des distorsions dans le bilan hydrique et pourrait expliquer en partie les difficultés de calibration. Ce modèle climatique a été évalué (Kahimba & al, 2009) par comparaison avec des mesures sur sites d'insolation pour des régions comprises entre la latitude 49° N et 53°N. Les auteurs concluent que si le modèle reproduit bien la radiation annuelle horaire, le modèle présente de meilleure performance de prédiction durant l'été que pendant la saison hivernale, ce qui pourrait également limiter les possibilités de calibration pour la période considérée.

Cas de la couverture finale

La teneur en méthane à la base des 2 types de couverture finale modélisée (zone du Dôme et zone « 1D ») estimée par CALMIM dans le cas de la zone 1D (couverture du captage évaluée à 78%) atteint 42,1 % de méthane. On ne dispose pas de mesures réalisées en continu par le Gasclam® sur cette zone.

Deux types de couverture finale ont été investigués : la couverture du dôme et celle du casier 11 de la zone 1D. Cette dernière couverture est la plus représentative, car l'épaisseur d'argile du dôme (moyenne de 7 m) n'a pas permis d'observer des flux diffus mesurables.

Le pourcentage minimal de méthane moyen des deux points de suivi de la zone 1D respectant le bilan de masse des flux de méthane mesuré varie entre 38% et 33%. La teneur proposée par CALMIM v5.1 à la base de la couverture (42 %) respecte cette contrainte.

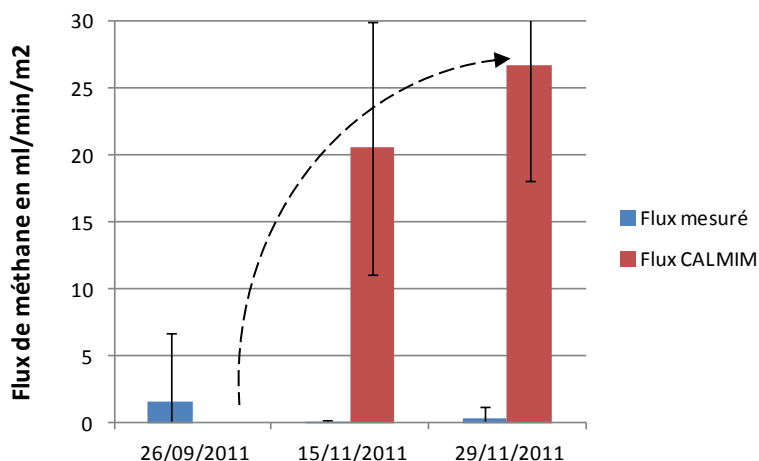


Figure 46 : Comparaison des flux moyens mesurés et modélisés le casier 11 pour les campagnes de 2011

Le calage par les données climatologiques et de texture est insuffisant : le flux calculé par CALMIM est notablement plus élevé à partir de la mi-novembre et les intervalles des valeurs des flux ne se recoupent pas (en considérant un intervalle d'un écart type autour de la moyenne).

L'augmentation observée entre les campagnes de septembre et de novembre est liée de manière quasi exclusive à la diminution de l'oxydation. Or, une diminution de l'oxydation a pour effet d'augmenter de manière générale les flux. Seule une réduction des flux diffusifs hors oxydation permettrait de réaliser le calage. Cette réduction n'a pu être réalisée avec les textures de sol proposées par CALMIM.

Par ailleurs, une augmentation du potentiel d'oxydation au-delà de 400 µg/g de sol /jour ne paraît pas justifiée. Seule une contribution à l'oxydation du massif de déchets permettrait de réduire les flux, or la progression de l'oxygène est limitée dans le profil de la couverture.

La période d'inflexion de l'oxydation modélisée par CALMIM n'a pas été observée sur le terrain : il est probable que les flux de méthane soient trop faibles pour permettre une réelle observation de l'effet de l'oxydation.

Si on applique la teneur de 42% de méthane présente à la base de la couverture pour le calcul de l'oxydation à partir des flux mesurés à la surface (de méthane et de CO₂), le calcul n'est pas possible pour le premier point de suivi, sur 2 des 4 périodes de suivi. Ce pourcentage atteint néanmoins 100% pour la mesure du 15 novembre 2011.

Le second point de suivi présente, en utilisant les mêmes hypothèses que CALMIM, une oxydation variable : 64% (28-29/9), non mesurable (flux nuls de CO₂ et CH₄) le 15/11/2011, 83 % le 16/11/2011 ; 59% le 1/12/2011. Ce taux d'oxydation est comparable à celui calculé par CALMIM qui atteint 100% (26-29/9), 65% (15-16/11), puis 62% (29/11-1/12).

Ces éléments nous amène à considérer que le phénomène d'oxydation est relativement bien reproduit par CALMIM à partir des données fournies. Néanmoins, l'estimation des flux par CALMIM (avec ou sans oxydation) apparaît significativement supérieure aux flux dits « diffusifs » mesurés sur site.

Comparaison avec les mesures des flux de type diffus de 2012.

Les mesures de 2012 ont consisté en la réalisation de 3 campagnes de mesures des flux de type IFM complétées par un suivi sur quelques jours des flux de méthane et de CO₂ sur les points de suivi encore disponibles. Du fait des travaux de finalisation de la couverture intermédiaire, les points de suivi I1 à I3 des alvéoles 3 et 4 n'ont plus été disponibles respectivement dès le début de l'année 2012 et lors de la dernière campagne de mesure.

La campagne de mesures des flux IFM des zones de suivi réalisée fin février 2012 peut être comparée aux flux mesurés et aux résultats de CALMIM de fin novembre 2011 (l'oxydation de ces périodes est très proche selon CALMIM).

Les déchets sous la couverture hebdomadaire ont évolué depuis la fin novembre : le flux moyen de méthane mesuré a atteint 13 ml/min/m², soit une valeur assez proche de celle mesurée à la mi-novembre 2011 (10 ml/min/m²), plus élevée de 30% mais dans l'intervalle de l'erreur d'estimation des flux. Cette croissance éventuelle des flux peut s'expliquer par l'oxydation du méthane en couverture qui reste encore faible et par la mise en place progressive de la phase de méthanogénèse stabilisée, ce qui augmente encore un peu l'écart avec les flux faibles estimés par CALMIM. Un calage par des mesures de méthane sous la couverture temporaire ou par le suivi des teneurs en biogaz des puits proches reste donc nécessaire pour ce type de couverture.

Dans le cas de la couverture intermédiaire, le flux moyen de méthane mesuré fin février sur l'alvéole 4 (1,21 ml/min/m²) est très proche de celui mesuré sur cette même alvéole fin novembre 2011 (1,27 ml/min/m²) : les remarques précédentes sur les difficultés de calibration de CALMIM par des mesures de flux à la chambre en saison humide s'appliquent. Ce comportement est également observé sur les couvertures plus épaisses et argileuses : le flux moyen quasi nul mesuré ne rend pas compte des flux estimés par CALMIM qui ne pourront rejoindre probablement l'atmosphère durant cette période que par le biais de cheminements très préférentiels.

La campagne de mesures complémentaire réalisée fin mai 2012 a montré des flux très faibles sur l'ensemble des couvertures, avec une présence sporadique de valeurs de flux de type convective : le point d'inflexion des courbes d'oxydation a probablement été dépassé.

La campagne de mesure de fin novembre 2012 a permis de reproduire le comportement observé à la fin de novembre 2011 : les flux « diffus » de méthane ont été essentiellement détectés sur les déchets (à un niveau comparable au niveau d'émission atteint en fin d'année 2011). Sur les autres couvertures, les émissions atteignent la limite des flux mesurables.

10.2.3 Conclusion sur la calibration

Le modèle CALMIM a permis de reproduire l'évaluation des flux diffus pour les périodes les moins humides, en fonction de la texture des couvertures : le comportement des couvertures de type sableuse, plus perméable à l'air est mieux reproduit par les 7 campagnes de mesures réalisées.

Dans les cas des textures plus argileuses, dont la saturation reste généralement plus élevée, le modèle CALMIM en version 5.1 modélise des flux diffus pour les périodes des saisons automnales, hivernales et de début de printemps qui ne n'ont pas été observés sur site. La difficulté réside probablement dans la modélisation des circulations de biogaz de nature préférentielles qui sont plus souvent rencontrées dans les matrices complexes argilo silteuses. Il est probable qu'une partie des flux diffus rejoignent ces circulations préférentielles.

On notera que le modèle CALMIM reproduit globalement le comportement d'un site, car les émissions résiduelles calculées à l'échelle d'un site sont comparables à celles évaluées par une approche classique d'estimation des flux résiduels, par une modélisation de la production de biogaz combinée à la déduction du volume capté.

La confrontation du modèle de diffusion a été réalisée avec des campagnes de mesure de flux qui maximise le nombre de points de mesures, mais qui restent tributaire de la répartition des flux : les campagnes de mesures ont été volontairement réalisées dans des périodes pas toujours favorables pour la mesure ponctuelle des flux sur site. La saturation élevée en eau des sols induit du fait de sa répartition non homogène dans les périodes transitoires d'infiltration des eaux des circuits préférentiels des flux de biogaz, qui sont plus délicats à détecter et à mesurer.

Les limites du modèle CALMIM ont également été observées. CALMIM ne dispose pas de moyen d'adapter durant l'année la teneur en méthane sous la couverture (ce qui correspondrait à l'utilisation d'une condition aux limites variable). Si on peut supposer celle-ci relativement stable dans le cas de couvertures épaisses, ce n'est pas le cas des couvertures temporaires. Dans le cas des couvertures intermédiaires on atteint en moyenne (avec la valeur proposée par CALMIM) la teneur en méthane minimale pour représenter les flux sans oxydation. Un calage simple a été réalisé. Un calage « multi points » à partir de la variation de la qualité du biogaz sur l'année est envisageable pour obtenir des valeurs plus précises sur ce type de couverture.

11 Comparaison avec des modèles de production

Cette comparaison a été réalisée à partir de données transmises par SITA pour deux nouveaux sites notés site 1 et site 2 en complément du site pilote. Le choix des paramètres retenus est explicité. Ce choix a été réalisé dans l'optique de permettre une comparaison entre les différents modèles.

11.1 Utilisation de Gassim V2.0

GasSim V2.0 (Golder Associates) a été utilisé par l'INERIS pour estimer la fraction résiduelle non captée à partir d'une évaluation de la production de biogaz, en considérant les différentes fractions de déchets (OM, DIB, déchets verts, boues de station, inertes,...), une répartition de l'ensemble des tonnages annuels selon les 3 types de couvertures étudiés (temporaire/hebdomadaire, intermédiaire et finale) ainsi que des hypothèses sur les taux de captage du biogaz.

GasSim dispose d'une spécificité : il permet de réaliser des calculs en considérant les paramètres d'entrée comme des distributions statistiques (des densités de probabilité/distribution de probabilité, « pdf »), et permet donc d'obtenir comme résultat une distribution statistique. Néanmoins, pour permettre une comparaison avec CALMIM, dans la plupart des cas où l'on disposait de mesures, une variable simple « single » a été utilisée.

Les caractéristiques des déchets ont ainsi été rentrées de manière déterministe (entrée du tonnage en variable « single ») en considérant la caractérisation en matière organique par défaut des déchets anglais des années 1980-2010 proposée par GasSim. Les caractéristiques de ces déchets (provenant du manuel GasSim v2) sont présentées en annexe 4.

Les modèles de production de biogaz calculant à pas annuel la production de biogaz ne permettent pas de fournir une estimation du biogaz produit sur l'alvéole en exploitation. Or les mesures sur site montrent qu'une production de biogaz intervient dès que la couche de déchets est suffisamment épaisse et humide. Par ailleurs, le modèle CALMIM permet d'estimer les émissions des zones de déchets sous la couverture temporaire.

Du fait de ce pas temporel minimal de l'année employé par GasSim pour les calculs et les entrées de tonnages déposés, la production de biogaz n'intervient que pour l'année suivante. Afin de disposer néanmoins d'une valeur estimée, même grossièrement, pour la zone en exploitation, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- dépôt de la dernière année (année n) comme intervenant l'année n-1. ;
- prise en compte de l'âge moyen des déchets (6 mois) par un facteur de réduction de 2 de la production annuelle ;
- prise en compte d'un facteur supplémentaire de réduction de 3 pour tenir compte d'une durée moyenne de démarrage de 4 mois pour la production de biogaz, soit pour des déchets d'un âge moyen de 6 mois, une durée effective de production de 2 mois.

La production de l'alvéole en exploitation a ainsi été réduite d'un facteur 6.

L'estimation de la production a été réalisé en considérant pour chaque calcul une alvéole de forme carré, de surface équivalente à la somme des surfaces des casiers et alvéoles de même type de couverture, en agglomérant ainsi les casiers et alvéoles selon le type de couverture.

Les hypothèses des calculs sont reproduites ci-dessous :

- humidité moyenne des déchets, fixant ainsi des cinétiques de dégradation également moyennes, celles-ci pouvant être déclinées sous GasSim pour 3 fractions et pour 3 humidités de déchets ;
- répartition des tonnages des déchets sur les 3 types de couverture définis, en considérant l'année n du dernier dépôt comptabilisé :
 - couverture finale pour les déchets déposés du début de l'activité à l'année n-2 ;
 - couverture temporaire pour les déchets de l'année n-1 ;
 - couverture hebdomadaire pour les déchets de l'année n.

GasSim permet de considérer également des variantes de dégazage, celles-ci étant également différentes suivant la présence ou non d'une couverture, et suivant la qualité de celle-ci (couverture temporaire ou finale). Des distributions triangulaires (dégazage minimal, moyen, maximal) sont ainsi proposées. Le dégazage définit un débit de biogaz qui se soustrait à la production de biogaz pour obtenir un débit résiduel qui est ventilé par GasSim en émissions résiduelles, avec une répartition entre le méthane et le CO₂ dépendante des options choisies pour l'oxydation du méthane.

L'option par défaut de GasSim considère une oxydation de 10%, le débit résiduel constitué initialement de 50% de méthane et de 50% de CO₂ se répartissant ainsi en 55% de CO₂ et 45% de méthane. Pour être plus proche de la réalité pour ce qui concerne les flux diffus, on a considéré une oxydation de 25%.

Afin de pouvoir mieux comparer les résultats, GasSim a été utilisé seulement pour évaluer la production.

Les données de deux sites, notés site 1 et site 2 (reproduites en annexe 4), ont ainsi été utilisées en complément du site pilote étudié pour évaluer la production de biogaz constitué de 50 % de méthane et de 50 % de CO₂.

11.2 Paramètres communs avec CALMIM V 5.1

11.2.1 Texture et perméabilité des sols

Les épaisseurs de matériaux ont été fixées (en « single »), pour permettre une meilleure comparaison avec le modèle CALMIM.

Des distributions de probabilités ont été utilisées pour la qualification de la perméabilité des matériaux des couvertures, avec une distribution de type logUniforme (min, max), car elles représentent a priori le paramètre le plus variable. Les matériaux de couverture présentent en effet une variabilité intrinsèque aux matériaux naturels mis en place (argiles, limons,..). Dans le cas des matériaux manufacturés (géomembrane), on a considéré également la mise en œuvre « non parfaite » de ceux-ci, incluant donc des fuites résiduelles.

Les caractéristiques suivantes de perméabilité à saturation ont été choisies pour les couvertures mises en place :

- couverture finale :
 - avec argile (1 m) : perméabilité : $1 \cdot 10^{-9}$ à $5 \cdot 10^{-8}$ m/s (site 1 +site pilote) ;
 - avec argile (1 m) + géomembrane : perméabilité : $1 \cdot 10^{-9}$ à $5 \cdot 10^{-9}$ m/s (site 2) ;
- couverture intermédiaire : épaisseur de 0,5 m, perméabilité comprise entre $1 \cdot 10^{-7}$ et $1 \cdot 10^{-5}$ m/s
- couverture temporaire : épaisseur de 30 cm, perméabilité variable entre $1 \cdot 10^{-6}$ et $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

On a supposé ainsi que les perméabilités des couches sont uniformes mais incertaines. Dans ce cas, on a utilisé comme valeur nominale de perméabilité provenant des distributions de type logUniforme utilisées sous GasSim (pour la comparaison avec CALMIM), la moyenne de la transformée, soit pour une distribution simple ne comportant qu'un seul intervalle défini par (min, max) :

$$\text{Valeur nominale} = \exp((\ln(\max) + \ln(\min))/2)$$

$$\text{Valeur moyenne} = (\max - \min) / ((\ln(\max) - \ln(\min)))$$

Pour les divers types de couverture, le Tableau 16 ci-dessous récapitule les paramètres utiles pour la comparaison avec le modèle CALMIM, qui n'utilise qu'une description déterministe et fixée par le choix des textures de sol (sable, argile sableuse,...).

Tableau 16 : Valeurs moyennes et nominales de la perméabilité des couvertures correspondantes aux distributions utilisées sous Gassim V2.0

Type de couverture	Distribution de la perméabilité LogU(min, max) (m/s)	Moyenne de la perméabilité (m/s)	Valeur nominale de la perméabilité (m/s)
Couverture finale sans géomembrane argileuse	LogU($1 \cdot 10^{-9}$, $5 \cdot 10^{-8}$)	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$7,07 \cdot 10^{-9}$
Couverture finale avec géomembrane argileuse	LogU($1 \cdot 10^{-9}$, $5 \cdot 10^{-9}$)	$2,49 \cdot 10^{-9}$	$2,24 \cdot 10^{-9}$
Couverture intermédiaire argilo-sableuse	LogU($1 \cdot 10^{-7}$, $1 \cdot 10^{-5}$)	$2,15 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
Couverture temporaire sableuse	LogU($1 \cdot 10^{-6}$, $1 \cdot 10^{-4}$)	$2,15 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$

Il faut noter que ces paramètres de perméabilité servent à GasSim pour évaluer la part du biogaz résiduel se partageant entre les flux de surface et les migrations latérales.

Dans les 3 cas étudiés, on a considéré la présence d'une géomembrane sur l'ensemble des parois latérales des casiers, d'une perméabilité définie par $\log U(1 \cdot 10^{-14}, 1 \cdot 10^{-12})$, telle que proposée par GasSim v2.0, de moyenne proche de la valeur $2 \cdot 10^{-13}$ m/s. Cette dernière valeur est très proche de celle utilisée par CALMIM v5.1 ($4 \cdot 10^{-13}$ m/s). Cette valeur amène à obtenir un flux de migration latérale très faible et négligeable : l'ensemble du débit résiduel calculé par GasSim v2.0 est émis par la surface des casiers.

La correspondance entre les classes de couverture définies dans GasSim v2.0 et celles de CALMIM v5.1 peut s'effectuer en comparant les classes de perméabilités offertes par CALMIM v5.1.

Les caractéristiques des 12 textures de sol du département de l'agriculture des Etats Unis (USDA), des 14 matériaux assimilés à des sols et de 7 matériaux de couverture sont présentées dans le manuel final de la version CALMIM v4.2 et sont reproduites en annexe.

Une sélection de ces paramètres est présentée dans le Tableau 17 ci-dessous.

Tableau 17 : Texture et perméabilité des type de sols considérés (d'après CALMIM v4.2)

Type de couverture considéré	Texture de sols de l'USDA	Perméabilité (m/s) de la texture de sol de l'USDA	Porosité (à 33 kPa) de la texture de sol de l'USDA
Temporaire / Sableuse	Sable	2,65E-05	0,386
Intermédiaire / Argilo-sableuse	Limon argilo sableux	3,49E-06	0,445
	Argile sableuse	1,73E-06	0,455
Finale / Argileuse	Argile silteuse	3,04E-07	0,517
	Argile	3,34E-07	0,524
Finale / Argileuse avec géomembrane	Géomembrane (HDPE)	3,34E-07	0,524

En police grise sont présentés les choix effectués pour l'application de CALMIM.

On remarque que la gradation des perméabilités est assez réduite pour les classes de sols de l'USDA choisies dans CALMIM. Les descriptions de texture et les perméabilités associées permettent néanmoins de pouvoir choisir des équivalences entre les textures de sols de CALMIM et les classes de perméabilité utilisées dans GasSim v2.0.

Contrairement à GasSim v2.0 qui ne conserve que la contrainte de la couche de perméabilité minimale pour évaluer les flux émis à la surface, CALMIM utilise l'ensemble du profil pour modéliser les échanges d'eaux météoriques (en particulier pour pouvoir modéliser les couvertures épaisses limitant les flux verticaux d'infiltration par reprise de la réserve hydrique par évapo transpiration).

11.2.2 Oxydation du méthane

Concernant l'oxydation du méthane, trois approches sont présentes :

- une approche de déduction forfaitaire de 10% des émissions résiduelles (GasSim V2.0) ;
- une approche empirique (GasSim V2.0) de limitation du flux en considérant une soustraction d'un potentiel d'oxydation. Cette soustraction est limitée par un taux de fuite et par des fissures. Une table des potentiels d'oxydation est fournie dans le manuel. On applique ensuite au choix du potentiel d'oxydation un facteur empirique de correction pour tenir compte de l'efficacité réelle sur le terrain. L'application d'un taux moyen de 25% est proposée par défaut, avec une distribution normale variant entre 10 % et 46%, pour toute couche de sol de plus de 30 cm d'épaisseur ;
- une approche spécifique de la cinétique de biodégradation par CALMIM, tenant compte du profil de sol, de son humidité et de sa température.

Une comparaison sur ces 3 approches sera donc réalisée pour les trois sites, afin de pouvoir estimer au mieux les émissions résiduelles pour les 3 types de couverture utilisés.

11.2.3 Evaluation de la qualité du dégazage et des émissions convectives

11.2.3.1 Evaluation du dégazage (*vis-à-vis des émissions diffuses*)

Le problème de l'utilisation des modèles étudiés concerne le choix des paramètres liés au dégazage et aux fuites résiduelles.

Deux approches différentes sont proposées pour cette étape qui est commune aux deux modèles GasSim et CALMIM : il est explicitement noté dans le manuel de CALMIM que le pourcentage de couverture de l'emprise du dégazage (à renseigner) est différent du pourcentage de captage. Or il existe une liaison entre ces deux variables qui n'est pas décrite ;

Concernant le modèle GasSim, des distributions triangulaires sont proposées (dégazage minimal, moyen, maximal).

L'évaluation de ce dégazage constituant une étape commune importante, une comparaison de l'application de ce dégazage est décrite pour mieux apprécier son importance sur l'enchaînement des calculs et évaluer comment cette étape est susceptible de modifier sensiblement la comparaison des deux modèles.

Afin de pouvoir appliquer des ratios de captage/emprise de la collecte pour les deux modèles, des hypothèses ont été nécessaires.

Pour les 3 sites pris comme exemple, l'hypothèse retenue est que les puits dégazent au plus chacun une surface de couverture équivalente à un disque de 25 m de rayon, ce qui correspond à l'option la plus souvent appliquée en pratique : les puits sont souvent implantés au centre de cercles de 25 m de rayon disposés en quinconce sur la surface des couvertures.

Dans le cas de l'utilisation de drains, l'évaluation est plus délicate : le rayon de captage des drains est plus faible, mais compensé par une longueur de drains plus importante. Le volume final dégazé dépend beaucoup de la profondeur du drain, une profondeur plus importante permettant d'utiliser une dépression plus importante. Le rayon d'action des drains étant environ deux fois plus faible, on a considéré une équivalence entre un puits et un drain possédant une longueur quatre fois plus importante que l'épaisseur des déchets.

Ces considérations de surface équivalente de dégazage ne prennent pas en compte l'intersection et le recoupement des zones du fait de l'implantation préférentielle de puits de dégazage. On a supposé ainsi une implantation régulière des puits.

On peut ainsi déduire pour chaque site un ratio de surface sous l'emprise du dégazage, utilisable dans CALMIM. Il faut noter que la surface des émissions résiduelles, complémentaire à celle de l'emprise du dégazage pourrait être déduite d'un relevé FID montrant des émissions de méthane significativement supérieures au bruit de fond (5 ppmv).

Dans le cas de l'usage du modèle GasSim, on peut considérer le mode des distributions triangulaires d'efficacité de collecte proposé comme représentatif du ratio applicable à chaque couverture pour déduire le flux résiduel. Ces taux ont été néanmoins légèrement modifiés : les distributions triangulaires utilisées (Tri(min, mode, max)) sont présentées ci-dessous dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Taux de captage utilisés avec GasSim

	En l'absence de couverture (ou couverture temporaire)	Sous couverture intermédiaire	Sous couverture finale sans géomembrane	Sous couverture finale avec géomembrane
Collecte temporaire	Tri(10, 30, 50)	Tri (40, 50, 60)	Tri (55, 65, 75)	-
Réseau de collecte définitif	Tri(50, 60, 70)	Tri (75, 85, 95)	Tri (75, 90, 96)	Tri (90, 95, 96)

Dans le cas de la couverture de qualité intermédiaire, le réseau de collecte est le plus souvent à mi-chemin entre le réseau définitif et le réseau temporaire : on a appliqué un taux de collecte de 65%, qui se situe donc entre les deux valeurs moyennes proposées (50% et 85%).

11.2.3.2 Evaluation du dégazage vis-à-vis des émissions convectives résiduelles

Cet aspect est assez peu abordé dans les documents accompagnant les modèles, du fait probablement de l'opinion souvent admise que ces fuites peuvent être facilement repérées et traitées, par étanchéification et/ou reprise de la couverture.

Ces fuites sont le plus souvent liées aux puits de dégazage. Du fait des tassements différentiels résiduels, la qualité de la liaison entre ceux-ci et la couverture se dégrade dans le temps, amenant ainsi les puits dans une position de relief, favorable aux émissions.

Ces fuites sont dépendantes de l'épaisseur de la couverture argileuse disponible : une épaisseur d'argile variant entre 50 cm et plus de 1 m peut être nécessaire localement à la reprise des tassements résiduels et pour permettre une certaine « cicatrisation » de la couverture. Ces fuites sont encore assez visibles sur des couvertures de l'ordre de 1 – 1,5 m d'épaisseur n'ayant pas fait l'objet de renforcement au niveau des puits (jupe d'étanchéité ou surépaisseur d'argile).

L'estimation théorique de l'importance de ces fuites est assez délicate, car ces fuites dépendent de :

- de la liaison entre les puits et la couverture ;
- de la profondeur de la zone crépinée de la couverture : l'augmentation du rayon d'action des puits limite le captage des fuites au droit de celui-ci (cf. Figure 47) ;
- de manière générale, de l'argilosité et de l'épaisseur de la couverture.

Des études théoriques existent pour évaluer le rayon d'action des puits (rayon maximal d'influence des puits) en fonction de la position de la zone crépinée, mais à notre connaissance, l'efficacité du captage en « champ proche » (rayon minimal d'influence) n'a pas fait l'objet de travaux publiés et dédiés.

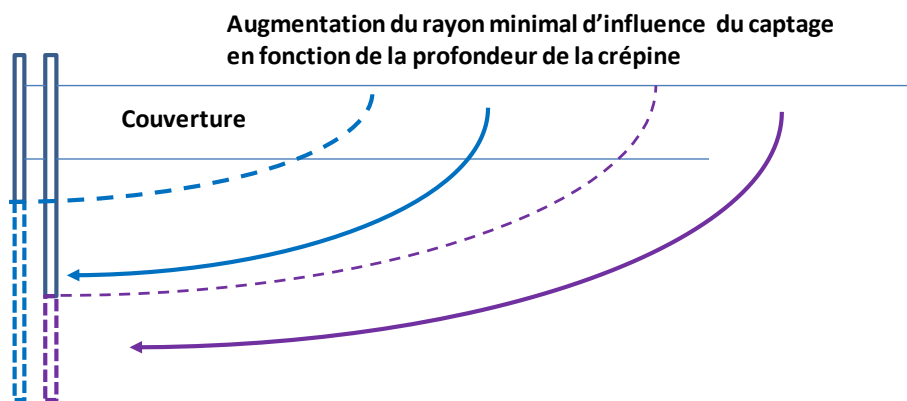


Figure 47 : Rayon « minimal » d'influence du captage en fonction de la position de la crépine

A ce stade nous proposons une reconnaissance particulière sur site de celles-ci, si des fuites sont avérées lors d'une campagne d'inspection par FID.

Les modèles utilisés (GasSim, CALMIM) ne proposent pas de moyens précis d'évaluer les fuites convectives.

GasSim propose d'utiliser un facteur empirique de correction à appliquer sur le débit résiduel disponible (après soustraction de la collecte et des flux de migrations latérales). Des taux de fuites par fissure de 5% - 10% du débit résiduel disponible en base de la couverture sont mentionnés. Une mesure sur le terrain semble s'imposer pour évaluer ces fuites.

11.3 Résultats des simulations par GasSim v2.0

11.3.1 Résultats obtenus par GasSim pour le site 1

La description des paramètres du site 1 est présentée en annexe 4. Ce site de 8,6 ha a été réaménagé en fin d'année 2007 – début d'année 2008. La couverture finale comprend une épaisseur minimale de 30 cm de terre végétale : l'oxydation du méthane est prise en compte, mais de manière modérée au regard de l'épaisseur de cette couche (25%). Ces résultats sont présentés dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Résultats de GasSim pour le site 1

Résultats : biogaz en m ³ /h à 50% de CH ₄ , 50% de CO ₂ , méthane en m ³ /h	Couverture finale, 6,4 ha	Couverture intermédiaire, 1,1 ha	Couverture temporaire, 1,1 ha	Production/ Emission totale
Production totale de biogaz 2007	670	149	15,8	834,8
Production totale de biogaz 2008	621	138	14,7	773,7
Emission totale de biogaz 2007	67	52,15	15,8	135,0
Emission totale de biogaz 2008	62,1	13,8	1,5	77,4
Emission de méthane en 2007	25,1	19,6	5,9	50,6
Emission de méthane en 2008	23,3	5,2	0,6	29,0

Les émissions de méthane du casier en activité (avant simulation d'un réaménagement final (année 2008)) restent limitées après application d'un facteur de réduction de 6 et elles sont encore très fortement réduites après la simulation de la fermeture (en 2008). Pour l'année 2007, de référence, les émissions de biogaz (et de méthane) représentent respectivement 16 % et 12% de la production au vu de ces résultats bruts.

Il faut noter que les émissions réelles de l'alvéole en exploitation sont très tributaires des conditions d'humidité des déchets et de leur préparation éventuelle, qui accélèrent (ou non) la mise en place de la phase de méthanogénèse. Dans le cas où un captage à l'avancement serait opérationnel avec une efficacité maximale (50%), les émissions estimées de méthane atteindraient une valeur de l'ordre de 11% de la production en appliquant un taux d'oxydation de 25%.

Les 42 puits représentent au maximum une surface de dégazage de 96% de la surface du site après mise en place d'une couverture finale : ce taux sera appliqué pour le modèle CALMIM et pour les couvertures intermédiaires et finales.

La valeur obtenue d'émission de méthane paraît cohérente avec la densité de puits, mais le modèle de production n'a pas fait l'objet d'un calage (avec des données de débit collecté et des mesures d'émissions en surface du méthane) : une incertitude assez élevée persiste sur la donnée de base que constitue la production de biogaz.

11.3.2 Résultats obtenus par GasSim pour le site 2

On dispose pour le site 2 de la répartition des différents types de couverture de la surface totale du site. L'épaisseur moyenne des dépôts est évaluée à partir du ratio tonnages/surface à environ 6,6 mètre : cette épaisseur est probablement plus importante réellement, du fait de la relative jeunesse du site (dépôts des 5 premières années). La hauteur crépinée des puits est donc évaluée à environ 6 mètres : le dégazage d'une tranchée drainante de 50 m est estimé équivalent à celui correspondant à deux puits de rayon de 25 m d'influence. Le nombre d'« équivalent puits » atteint ainsi $12 + (8 \times 2) = 28$ puits, soit une surface de dégazage équivalente de plus de 5 ha, supérieure à la surface de la zone concernée par l'apport des déchets. Le pourcentage de couverture du système de collecte est ainsi évalué à 100% (pour le modèle CALMIM).

Nous avons utilisé deux taux de collecte pour le modèle GasSim :

- un taux de 65% tenant compte de la forte densité des puits mais également de la mise en place de matériaux décrits comme semi perméable sur la zone estimée en couverture « intermédiaire » ;
- un taux de collecte de 95% pour la zone avec géomembrane.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Résultats de GasSim pour le site 2

Résultats : biogaz en m ³ /h à 50% de CH ₄ , 50% de CO ₂ , méthane en m ³ /h	Couverture finale, 1,6 ha	Couverture intermédiaire, 1,7 ha	Couverture temporaire, 0,56 ha	Production/ Emission totale
production totale de biogaz 2012	175	80	13,8	268,8
production totale de biogaz 2013	163	75	12,8	250,8
Emission totale de biogaz 2012	8,75	28	13,8	50,6
Emission totale de biogaz 2013	8,15	3,8	0,6	12,5
Emission de méthane en 2012	3,3	10,5	5,2	19,0
Emission de méthane en 2013	3,1	1,4	0,2	4,7

Si l'on applique le même principe de correction (réduction d'un facteur 6) sur les émissions brutes estimées sur la zone de la surface du casier en exploitation, les émissions totales de biogaz et de méthane se réduisent également fortement et atteignent respectivement 51 m³/h de biogaz et 19 m³/h de méthane, soit respectivement 18 % et 14% de la production.

Sur ce site les émissions de l'alvéole en exploitation (malgré la correction appliquée) demeurent élevées, mais une incertitude forte demeure sur ces émissions résiduelles. L'absence de spécification de l'utilisation du captage sur la zone en exploitation ne permet pas d'envisager une réduction potentielle de celles-ci.

11.3.3 Résultats obtenus par GasSim pour le site pilote

Le site pilote, toujours en exploitation, comprend plusieurs zones réaménagées, avec des épaisseurs de couverture assez différentes. Il comprend en particulier des surfaces réaménagées antérieurement à 1997, dont on ne connaît pas la typologie et la répartition des tonnages de déchets et qui représentent environ 10 ha, soit 30% de la surface du site. On ne peut donc pas utiliser GasSim sur cette partie du site (contrairement à CALMIM).

On distingue dans la partie la plus ancienne réaménagée postérieurement à 1997 deux types de couverture : plus de 5 m d'argile sur le dôme (zone 1B, 1C, 5,2 ha), environ 80 cm d'argile sur la zone dite 1D comprenant le casier 11 (2,5 ha). Ces deux zones n'ont pas été individualisées dans GasSim. La zone dite 2A de couverture temporaire comprend les nouvelles alvéoles. Nous avons « lissé » le dépôt en considérant la mise en place annuellement d'une alvéole de 5 500 m². Cette zone fait également l'objet de travaux et ne disposait pas encore de réseau définitif de collecte du biogaz en 2012.

Les dépôts de déchets des années 2011 et 2012 ont ainsi été affectés à une couverture intermédiaire de 11 000 m². Les dépôts antérieurs à 2011, en particulier de 2009 et 2010 ont été affectés à une couverture de type finale de type argileuse. Le tonnage et la typologie des déchets de 2012 et 2013 sont considérés constants et équivalents aux données de 2011. De ce fait l'estimation réalisée sur les couvertures temporaires et intermédiaires pourra être comparée aux émissions mesurées en 2011 et 2012 sur ces couvertures.

La répartition des puits implantés sur la couverture définitive permet de mieux évaluer les pourcentages de couverture de la collecte :

- la zone du dôme et la zone 1D concentrent l'influence d'environ 30 puits, soit une surface théorique totale de dégazage d'environ 5,9 ha, avec une densité un peu plus élevée de puits sur la zone 1D et variant entre 68 % (dôme) et 78% (zone 1D) ;
- les autres puits sont disposés dans la surface réaménagée 1A, avec une couverture plus faible (20%).

Concernant l'utilisation de GasSim (cf. Tableau 21), on a considéré un dégazage sur la couverture intermédiaire et finale d'une efficacité respective de 65% et de 95%.

Tableau 21 : Résultats de GasSim pour le site pilote

Résultats : biogaz en m ³ /h à 50% de CH ₄ , 50% de CO ₂ , méthane en m ³ /h	Couverture finale, 9,8 ha	Couverture intermédiaire, 1,1 ha	Couverture temporaire, 0,55 ha	Production/ Emission totale
production totale de biogaz 2013	617	171	14,8	802,8
production totale de biogaz 2014	577	158	13,7	748,7
Emission totale de biogaz 2013	30,85	59,85	14,8	105,5
Emission totale de biogaz 2014	28,85	7,9	0,7	37,4
Emission de méthane en 2013	11,6	22,4	5,6	39,6
Emission de méthane en 2014	10,8	3,0	0,3	14,0

Les émissions brutes de biogaz et de méthane sont évaluées à respectivement 13 % et 10 % de la production.

11.3.4 Conclusion concernant l'utilisation de gasSim

L'application de la méthodologie proposée par GasSim sur une répartition des surfaces exploitées pour 3 types de couverture amène à évaluer un potentiel d'émission de méthane variant entre 10 % et 14% de la production, en fonction principalement de la répartition des tonnages sur les différents types de couvertures, les sites les plus anciens bénéficiant d'un meilleur captage du biogaz.

Des fuites convectives de méthane, sur lesquelles l'oxydation (25%) n'est pas applicable sont estimées à environ 5 à 10% des émissions résiduelles et se substituent aux fuites diffusives : cette

substitution augmente assez faiblement (de l'ordre de 2,5%) le volume des émissions totales de méthane.

Les pourcentages d'émission en méthane étant assez peu variables (10 à 14% de la production sans captage à l'avancement, 9 à 12% de la production avec un captage à l'avancement), la principale variabilité non explorée concerne l'application du modèle de production.

11.4 Utilisation sans calage de CALMIM v5.1

11.4.5 Choix des paramètres

11.4.5.1 Pourcentage de collecte surfacique

L'émission de méthane hors oxydation est une fonction linéaire de la concentration en méthane à la base de la couverture. Celle-ci dépend également linéairement du ratio de surface sous l'emprise du système de captage : dans le cas d'une couverture dite « intermédiaire », le taux de méthane du biogaz appliqué par CALMIM à la base de la couverture décroît linéairement de 45% à 31,5% pour un taux de couverture du système de captage variant de 0 à 100%.

Les taux de couverture du système de dégazage précédemment évalués (paramètres communs avec GasSim) ont été appliqués sur les couvertures intermédiaires et finales. Dans le cas des zones d'exploitation, aucun taux de couverture du système de dégazage n'a été appliqué, du fait de la très faible teneur en biogaz sous la couverture considérée par défaut par CALMIM (0,3% de méthane).

11.4.5.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites par défaut de la couverture ont été utilisées. Le taux d'oxydation maximal proposé de 400 µg de méthane/g de sol/jour a ainsi été utilisé.

Contrairement à l'approche de GasSim v2.0 qui considère un « potentiel d'oxydation », CALMIM calcule pour un climat donné et pour la texture de sols de l'USDA donnée, l'oxydation réellement mobilisée et une capacité résiduelle. Ainsi une capacité d'oxydation du méthane variant entre 110 et 189 g/m²/jour (pour une couverture intermédiaire de 50 cm d'épaisseur et pour un climat du centre de la France) est calculée, mais elle ne peut être mobilisée que par des flux plus élevés de méthane, induisant ainsi le plus souvent des émissions résiduelles de méthane. La capacité d'oxydation calculée est conforme à la gamme mesurée sur le terrain par l'INERIS (de l'ordre de 100 – 150 g/m²/jour) sur des couvertures intermédiaires.

Le pourcentage d'oxydation calculé résultant est élevé. Des taux d'oxydation de 100% ont ainsi été atteints avec des sols limoneux de 80 cm à 1,5 m d'épaisseur (site pilote, zone ancienne).

Pour une couche de 50 cm d'épaisseur (typique des couvertures intermédiaires), le taux d'oxydation atteint :

- 49 % pour le sable ;
- 56 à 59 % pour les sables limoneux et les silts ;
- 68 à 82% pour les limons et les argiles.

Ces taux sont ainsi de 2 à plus de 3 fois plus élevés que ceux conseillés par GasSim (25%) : les flux de méthane après oxydation calculés sont ainsi réduits dans des proportions équivalentes.

11.4.5.3 Choix des matériaux

En l'absence de donnée sur la zone en exploitation des sites 1 et 2, l'épaisseur de la couverture temporaire de sable a été réduite à 15 cm.

Les couvertures standard suivantes ont été appliquées par défaut :

- 15 cm (30 cm si présence attestée) de sable pour la zone d'exploitation ;
- 50 cm d'argile sableuse sur les zones intermédiaires ;
- 1 m d'argile silteuse surmontée de 30 cm de limon pour les couvertures définitives.

Le choix de texture doit être orienté par la courbe granulométrique des sols. Dans le cas des sites 1 et 2, on ne dispose pas d'échantillons de sols : on a donc utilisé les 3 catégories de texture par rapprochement avec les perméabilités atteintes généralement sur les couches mises en place, soit les textures correspondant au sable, à l'argile sableuse et à l'argile silteuse.

11.4.6 Résultats de CALMIM pour le site 1

La surface de dégazage atteint 96% de la surface du site. La couche drainante de la couverture finale n'a pas été modélisée : les caractéristiques proposées du géotextile ne sont pas conformes à un géotextile drainant (perméabilité très faible).

Les émissions totales de l'année 2007 sont calculées à partir des émissions des 3 types de couverture (cf. Tableau 22).

Tableau 22 : Résultats de CALMIM pour le site 1 (1/2)

*	temporaire 0% recov	intermédiaire 96% recov	final 96 % recov
Methane Concentration Base of Cover	0.3%	32.04%	39.16%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	10.31	94.13	26.77
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	2.34	7.8	0.0
% Oxidation	77.01	91.68	100.0
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	9508.57	31632.93	0.0
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	41831.42	381937.72	618255.51
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	4.74	60.02	231.53

La conversion des résultats en m³/h (cf. Tableau 23) fournit des valeurs 3 fois supérieures aux émissions totales de méthane estimées par GasSim (environ 68 m³/h de méthane avant oxydation), avec une répartition assez similaire des émissions entre la zone de couverture finale et la zone intermédiaire. Les émissions de la zone d'exploitation restent assez faibles et contribuent peu aux émissions avant oxydation.

Du fait de la très forte oxydation sur la zone finale (100%), seule la zone intermédiaire contribue majoritairement aux émissions après oxydation.

Tableau 23 : Résultats de CALMIM pour le site 1 (2/2)

Emission de méthane	Surface casier année début à n-2	Surface casier année n-1	Surface casier n	Emission totale
Site 1 (n = 2007), surface	63518	11000	11000	85518
Emission totale 2007 en m3/h sans oxydation	105,9	65,4	7,2	178,4
Emission totale 2007 en m3/h avec oxydation	0,0	5,4	1,6	7,0

Les émissions après oxydation sont plus de 5 fois plus faibles que celles évaluées par GasSim, mais elles ne comprennent pas les émissions convectives. Ces pourcentages d'oxydation semblent très élevés :

- l'oxydation sur la zone d'exploitation est généralement faible (peu ou pas de couverture) : elle peut être négligée ;
- l'oxydation effective sur la zone de couverture intermédiaire est également très élevée : l'application d'un ratio de l'ordre de 50% d'oxydation paraît plus justifié ;

- dans le cas de la couverture finale, des taux d'oxydation élevés sont possibles : un taux réel de 75% semble néanmoins plus adéquat pour prendre en compte des circuits préférentiels non visibles à la surface.

Si l'on module les résultats de CALMIM ainsi, on obtient un débit de 66 m³/h de méthane, comparable au débit de 51 m³/h d'émission évalué avec un ratio d'oxydation de 25% sur les débits résiduels par GasSim.

11.4.7 Résultats de CALMIM pour le site 2

La surface de collecte atteint 100% de la surface totale. Le site 2 représente une zone ouverte, dont la couverture est en cours de mise en place.

Dans ce cas particulier, la couverture ne dispose généralement pas encore de végétation et de niveau de terre végétale : la couverture dite finale a été simplifiée pour ne comprendre qu'un niveau d'argile sableuse.

Tableau 24 : Résultats de CALMIM pour le site 2 (1/2)

*	temporaire 0% recov	intermédiaire 100% recov	final 100 % recov
Methane Concentration Base of Cover	0.3%	31.5%	38.5%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	10.31	92.55	43.62
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	2.34	7.28	10.44
% Oxidation	77.01	92.09	74.54
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	4686.27	45783.18	62630.33
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	20616.47	581630.07	261660.75
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	4.74	61.1	53.64

Les pourcentages d'oxydation (cf. Tableau 24) sont identiques à ceux présentés par le site 1, pour les couvertures temporaires et intermédiaires. La couverture de type finale simplifiée réduit son pourcentage d'oxydation de 100% à 75%.

Tableau 25 : Résultats de CALMIM pour le site 2 (2/2)

Emission de méthane	Surface casier année début à n-2	Surface casier année n-1	Surface casier n	Emission totale
Site 2 (n = 2012), surface	16130	17420	5600	39150
Emission totale 2012 en m ³ /h sans oxydation	44,8	99,6	3,5	147,9
Emission totale 2012 en m ³ /h avec oxydation	10,7	7,8	0,8	19,4

Le débit total d'émission de méthane (cf. Tableau 25) avant oxydation est élevé : il dépasse d'un facteur 6 les émissions calculées par GasSim (25 m³/h de méthane avant oxydation). Les pourcentages d'oxydation étant plus de 3 fois plus élevés (de 75% à 92%), les émissions après oxydation sont identiques (19 m³/h pour GasSim et pour CALMIM).

Si on applique le même schéma de répartition des taux d'oxydation que celui proposé pour le site 1, on atteint un débit d'émission de 65 m³/h de méthane, avec une forte contribution de la zone en couverture intermédiaire. Ce type de couverture étant donné comme relativement semblable à la couverture finale, l'application d'un taux d'oxydation de 75% ne semble donc pas suffisant : l'application de taux d'oxydation plus élevés que 75% (plus proche du taux de 92% calculé par CALMIM) est nécessaire pour compenser les flux estimés avant oxydation plus élevés et se rapprocher des résultats de GasSim.

11.4.8 Résultats de CALMIM pour le site pilote

Le site pilote est constitué de deux zones :

- une zone comprenant les dépôts postérieurs à 1997, de 11,4 ha ;

- une zone ancienne de 10 ha.

11.4.8.1 Zone postérieure à 1997

Tableau 26 : Tableaux présentant les émissions de méthane de la zone postérieure à 1997 du site pilote

*	temporaire 0% recov	Intermediaire 78% recov
Methane Concentration Base of Cover	0.3%	34.47%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	4.64	101.27
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	3.47	10.22
% Oxidation	24.85	89.86
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	7229.91	42555.81
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	9665.27	421840.04
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	2.18	55.3

*	alveoles 1/2/3 78% recov	dome 68% recov	zone 1D 78% recov
Methane Concentration Base of Cover	42.13%	43.78%	42.13%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	37.62	3.18	60.94
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	6.12	0.45	16.93
% Oxidation	76.39	82.7	70.62
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	45919.53	8388.68	155175.39
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	282084.64	59516.91	558409.3
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	49.49	18.54	53.01

Emission de méthane	Zone 1D, couv finale, 2,5 ha	Zone du Dôme, couv finale, 5,2 ha	Zone alv 1/2/3, couv finale, 2,1 ha	Zone alvéole 4/5, couv intermed., 1,1 ha	Zone exploit., couv temp., 0,55 ha	Emission totale
Emission totale 2013 en m ³ /h sans oxydation	95,7	10,2	48,4	72,3	1,7	228,0
Emission totale 2013 en m ³ /h avec oxydation	26,6	1,4	7,9	7,3	1,2	44,4

Concernant la zone en couverture finale (cf. Tableau 26), les émissions de méthane hors oxydation sont 2 fois plus élevées que celles calculées par GasSim pour le biogaz composé à 50% de méthane. Après oxydation (variant entre 71 et 83%), ces émissions totales de méthane (44 m³/h) sont très proches de celles calculées par GasSim (40 m³/h).

Les résultats de la zone de couverture intermédiaire présentent un comportement identique : les émissions calculées par CALMIM hors oxydation (72 m³/h) sont 2 fois plus élevées que celles concernant le méthane émis évalué par GasSim (30 m³/h). Du fait de l'oxydation proche de 90%, les résultats après oxydation de cette même zone nettement plus faibles (7,3 m³/h (CALMIM), 22 m³/h (GasSim)).

Du fait de la forte imprécision de GasSim pour évaluer les émissions de méthane après oxydation de la zone d'exploitation (5,6 m³/h), il est difficile d'évaluer le résultat de CALMIM (1,2 m³/h).

Si l'on applique le même schéma d'oxydation que celui proposé pour le site 1 (oxydation de 0%, 50%, 75% pour respectivement les couvertures temporaires, intermédiaires et finales), on obtient des émissions totales de méthane élevées atteignant 77 m³/h, qui restent donc élevées pour une production totale de méthane estimée par GasSim à 400 m³/h.

Ces résultats laissent supposer une potentielle surestimation des émissions non oxydées par CALMIM, qui est elle-même compensée (ou pas) par une surestimation de l'oxydation en utilisant les paramètres par défaut des potentiels d'oxydation.

Le site comprend également une zone ancienne qui a été évaluée en considérant une variation de l'épaisseur de la couverture constatée sur site. Sur cette zone ancienne, la couverture est de nature plus limoneuse

Tableau 27 : Emissions de méthane de la zone ancienne

*	zone methalix	zone 1A avec captage (Hors METHALIX)	zone 1A hors captage
Methane Concentration Base of Cover	46.75%	46.75%	55.0%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	97.74	49.33	58.03
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	0.29	0.0	0.05
% Oxidation	99.7	100.0	99.92
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	2633.91	0.21	900.69
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	891516.78	449923.05	1058643.21
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	149.56	298.88	290.23

Dans cette zone ancienne (cf. Tableau 27), les flux après oxydation sont quasi nuls. Ces flux n'ont donc pas été considérés.

11.5 Comparaison des modèles

Outre le modèle GasSim, les modèles ADEME et interne à SITA ont été mis en œuvre par SITA sur le même principe de répartition des couvertures, en considérant des taux de captage des biogaz produits de 65% et 85% pour respectivement un confinement par une couverture semi perméable de type intermédiaire et imperméable naturelle.

Les calculs ont été réalisés pour chacun des 3 sites pour l'année de référence correspondant aux tonnages totaux renseignés ainsi que pour une année suivante correspondant à la fermeture du site.

Nous allons considérer l'année de référence pour le calcul des émissions de biogaz et de méthane (après oxydation). Le modèle CALMIM ne propose d'évaluer que les émissions de méthane et non de biogaz. Pour évaluer celles-ci avant oxydation on considéré un ratio de 50% de méthane et de 50% de CO₂ du biogaz avant oxydation.

On peut ainsi évaluer les émissions de biogaz et de méthane de l'ensemble des modèles.

11.5.1 Résultats pour le site 1

Dans le cas du site 1 (cf. Tableau 28, Figure 48) tous les modèles fournissent des résultats comparables, à l'exception du modèle CALMIM, qui fournit des émissions potentielles de biogaz 2 à 3 fois supérieures aux émissions calculées par les autres modèles. Celles-ci se réduisent ensuite très fortement et deviennent 7 à 10 fois plus faibles que les émissions de méthane après oxydation calculées par les modèles de production.

Tableau 28 : Répartition des productions et émissions selon les modèles et les couvertures pour le site 1

Nm ³ /h à 50% CH ₄		Casier année 1999-2005	Casier 2006	Casier 2007	Total
PRODUCTION DE BIOGAZ					
2007	Gassim 2007	670	149	16	835
	Outil interne 2007	629	92	0	721
	ADEME 2007	593	172	0	765
EMISSIONS DE BIOGAZ					
2007	Gassim 2007	67	52	16	135
	Outil interne 2007	117	17	0	134
	CALMIM	212	130	14	356
	ADEME 2007	119	35	0	154
EMISSIONS DE CH₄ (APRES OXYDATION)					
2007	Gassim 2007	25	20	6	51
	Outil interne 2007	44	6	0	50
	CALMIM	0	5	2	7
	ADEME 2007	54	16	0	69

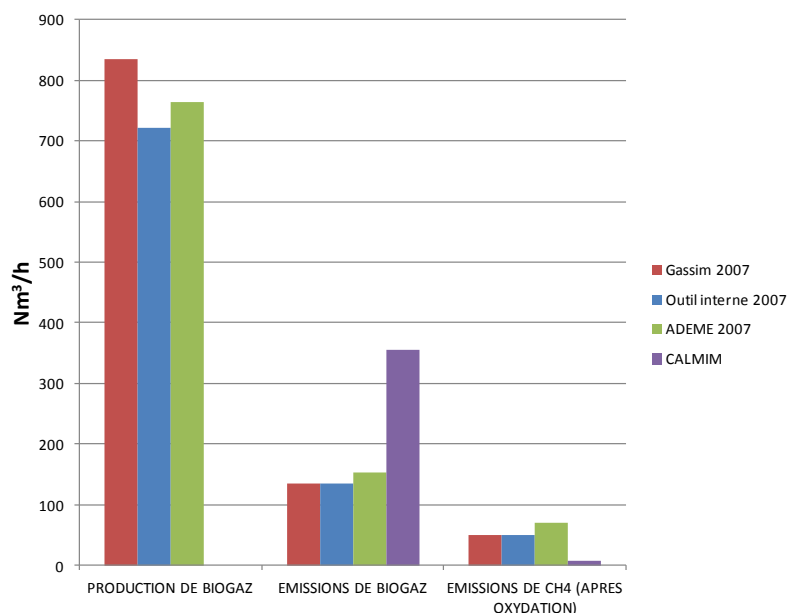


Figure 48 : Comparaison des productions et émissions totales de biogaz et de méthane pour le site 1

Si l'on regarde plus particulièrement les 3 types de couvertures, on peut remarquer que les émissions de méthane après oxydations du modèle CALMIM sont relativement proches des résultats des modèles de production pour les couvertures temporaires et intermédiaires. L'émission de biogaz maximale estimée par CALMIM atteint un niveau d'environ 50% de la production de biogaz estimé par les modèles, ce qui reste plausible.

Par ailleurs, les résultats des émissions de biogaz et de méthane du modèle GasSim sont équivalents à ceux obtenus par l'outil interne de SITA. Les taux de captage utilisés (65% et 85% pour le modèle ADEME, 65 et 90% pour GasSim) reproduisent donc relativement bien le taux de captage réellement observé sur le site 1 (de l'outil interne de SITA). Le modèle CALMIM sous-estime ainsi probablement les émissions de la zone de couverture finale présente sur des déchets relativement récents (ancienneté inférieure à 10 ans).

11.5.2 Résultats pour le site 2

Dans le cas du site 2 (cf. Figure 49, Tableau 29) on observe un comportement assez différent.

Le débit d'émission de biogaz estimé par CALMIM est supérieur au débit de production des modèles, tout en restant assez proche de la production estimée par GasSim. Les émissions de méthane sont relativement proches entre les différents modèles, avec un débit d'émission de méthane plus faible pour le modèle interne de SITA. Ce débit plus faible s'explique par un calage sur le débit capté, calage qui est plus précis que l'utilisation d'un taux de captage empirique, qui a été une option commune entre les différents modèles de production. Le taux de captage réel du site 2 est donc a priori supérieur aux taux de 65% et 85% appliqués aux couvertures respectivement de type « intermédiaire » et « final ».

Le modèle CALMIM fournit dans ce cas de figure un débit équivalent à l'application des modèles GasSim et ADEME, avec toutefois une répartition des émissions selon les 3 types de couverture plus proche de celle du modèle ADEME (peu ou pas d'émission sur la zone en exploitation) : les émissions liées à ce type de zone (exploitation) sont difficilement reproduites par les modèles de production.

Tableau 29 : Répartition des productions et émissions selon les modèles et les couvertures pour le site 2

Nm ³ /h à 50% CH ₄		Casier année 2008-2010	Casier 2011	Casier 2012	Total
PRODUCTION DE BIOGAZ					
2012	Gassim 2012	175	80	14	269
	Outil interne 2012	127	56	0	182
	ADEME 2012	105	61	0	166
EMISSIONS DE BIOGAZ					
2012	Gassim 2012	9	28	14	51
	Outil interne 2012	15	6	0	21
	CALMIM	90	200	8	298
	ADEME 2012	21	21	0	42
EMISSIONS CH₄					
2012	Gassim 2012	3	11	5	19
	Outil interne 2012	5	2	0	8
	CALMIM	11	8	1	19
	ADEME 2012	8	8	0	16

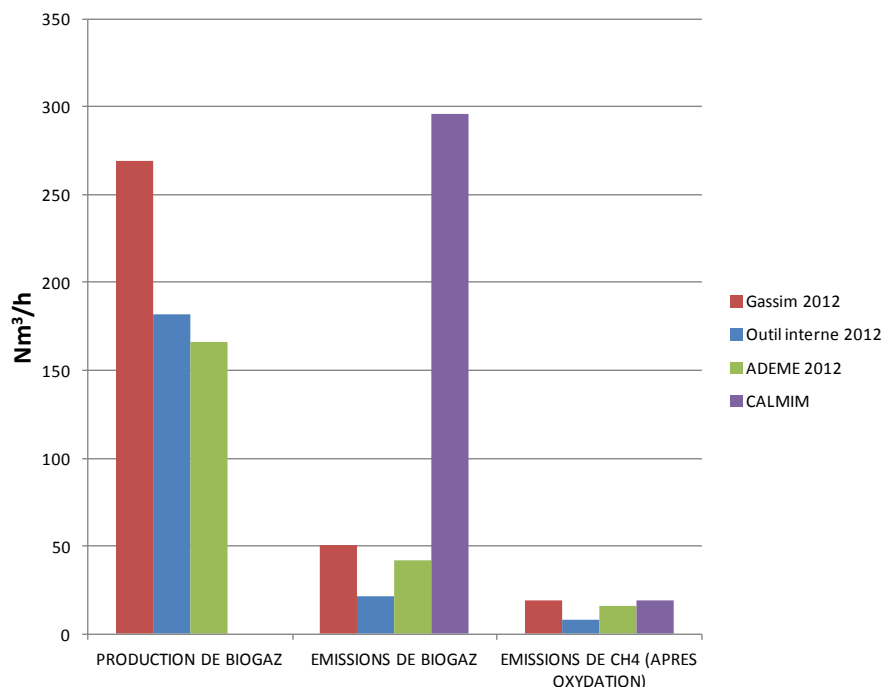


Figure 49 : Comparaison des productions et émissions totales de biogaz et de méthane pour le site 2

11.5.3 Résultats pour le site pilote

Le site pilote constitue un cas particulier : on dispose de la répartition des émissions diffuses et de leur variations. Les paramètres disponibles de calage du modèle CALMIM v5.1 n'ont néanmoins pas permis d'effectuer le calage pour les couvertures à texture fine (argileuse). On a donc utilisé le modèle CALMIM en spécifiant les types de couvertures et la latitude et longitude du site étudié, ce qui constitue l'utilisation « normale » du modèle.

Tableau 30 : Répartition des productions et émissions selon les modèles et les couvertures pour le site pilote

Nm ³ /h à 50% CH ₄		Casier année 1997-2009	Casier 2010-2012	Casier 2013	Total
PRODUCTION DE BIOGAZ					
2013	Gassim 2013	617	171	15	803
	Outil interne 2013	280	225	0	505
	ADEME 2013	264	229	0	493
EMISSIONS DE BIOGAZ					
2013	Gassim 2013	31	60	15	105
	Outil interne 2013	42	34	0	76
	CALMIM	309	144	3	456
	ADEME 2013	40	34	0	74
EMISSIONS CH₄					
2013	Gassim 2013	12	22	6,0	40
	Outil interne 2013	16	13	0	29
	CALMIM	36	7	1	44
	ADEME 2013	15	13	0	28

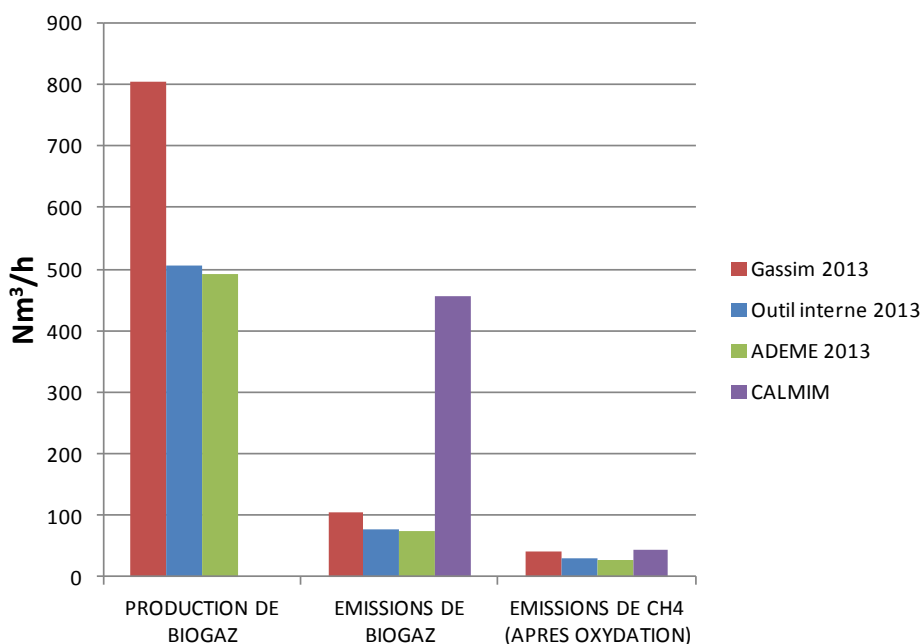


Figure 50 : Comparaison des productions et émissions totales de biogaz et de méthane pour le site pilote

Dans le cas du site pilote (cf. Tableau 30, Figure 50) on observe un comportement proche de celui du site 2 : les émissions de méthane sont évaluées globalement au même niveau, avec une estimation des émissions de biogaz par CALMIM proche du niveau d'évaluation de la production de biogaz. L'oxydation relativement forte appliquée par CALMIM permet de retrouver des émissions de méthane comparables aux autres modèles.

La répartition des flux d'émission est différente : le flux évalué par CALMIM est plus élevé sur la zone ancienne en couverture finale, du fait de la prise en compte de la surface par CALMIM.

11.5.4 Conclusion : influence des paramètres

Contrairement aux approches classiques de délimitation de zones d'influence, une approche par discrimination des types de flux a été mise en place. Cette discrimination a permis d'observer le comportement dans chaque type de couverture, des deux types de flux.

L'étude des flux convectifs, liés plus ou moins directement au système de dégazage, à la fissuration des couvertures et aux modifications de la pression barométrique, avait été initiée lors de l'étude de l'influence directe de la fissuration sur les émissions avec les données du programme ISO BIOGAZ (Widory & al, 2012). La prise en compte de ce type d'émissions, en liaison avec les puits de dégazage, a été poursuivie pour évaluer leur importance.

Tableau 31 : Type de flux selon les couvertures et leur état de saturation

	Couverture à texture sableuse	Couverture mixte (intermédiaire) à texture argilo sableuse	Couverture à texture argileuse sur déchets récents	Couverture à texture argileuse sur déchets anciens
Type de flux en période de saturation intermédiaire	Flux diffus dominant	Flux mixte diffus/convectif	Flux convectif dominant	Flux mixte diffus/convectif
Type de flux en période de saturation forte	Flux diffus dominant	Flux convectif dominant	Flux convectif dominant	Flux convectif dominant
Paramètres les plus influents sur les flux	Saturation en eau	Saturation en eau Variations barométriques	Variations barométriques	Saturation en eau Variations barométriques

12 Conclusion

Les travaux présentés ont pour but de permettre une évaluation quantitative des émissions de méthane et de leurs variations à partir de la combinaison de mesures sur site et de la calibration d'un outil permettant d'évaluer directement les émissions diffuses d'une ISDND.

Pour mener à bien ces recherches, des tests démarrés dès le premier semestre 2011 sur deux sites, ont permis de valider les dispositifs de mesure et de démarrer la réalisation de 6 campagnes de mesure sur le site pilote choisi. Ces campagnes de mesure de flux de méthane ont intégré également un suivi à plusieurs échelles temporelles des émissions de méthane et de CO₂.

Le suivi en continu de 9 points représentatifs des types de couvertures existantes sur le site pilote a mis en évidence des sensibilités très variables des émissions de gaz à effet de serre aux paramètres extérieurs (chute barométrique, élévation de la température, vitesse des vents).

Les campagnes de mesure ont mis en évidence une contribution significative des émissions dans l'environnement des puits de drainage du biogaz, de nature plus convective que diffusive.

L'importance des émissions diffuses dépend fortement de la qualité de la couverture : ces émissions sont très variables sur le site étudié : elles sont non mesurables sur la zone du dôme (couverture de plusieurs mètres d'argile) et atteignent des valeurs significatives sur les couvertures les plus perméables (couverture hebdomadaire).

On doit cependant tenir compte des émissions convectives liées à la présence de fissures : celles-ci ont été encore très peu étudiées du fait de la difficulté de les quantifier. La mesure conjointe des flux de méthane et de CO₂ a permis d'identifier ces flux très peu oxydés du fait de leur passage rapide au travers de la couverture. Il faut noter qu'il n'existe pas actuellement de modèle décrivant ces flux de manière macroscopique : les modèles existants (GasSim, CALMIM) ne prennent pas en compte de manière satisfaisante ces flux (déduction forfaitaire sur un pourcentage de la surface).

La distinction des deux types de flux de méthane (convectif avec biogaz peu oxydé et diffusif avec biogaz oxydé) constitue donc une étape importante, qui a permis de progresser sur le traitement et l'interprétation de chaque type de flux.

D'après les résultats obtenus sur le site pilote et lors de l'application comparative des différents modèles sur les différents types de couverture et la prédominance des flux diffusifs et/ou convectifs, on peut proposer des domaines d'application préférentiels des modèles :

- le modèle CALMIM s'applique plus particulièrement :
 - sur les couvertures de texture sableuse ;
 - sur les couvertures de texture mixte sablo argileuse à faible saturation en eau ;
 - sur les couvertures argileuses présentant en surface un niveau de terre perméable atteignant plus de 50 cm, sur des déchets suffisamment anciens.
- les modèles de production permettent d'évaluer de manière plus précise la modulation des flux convectifs de méthane présent de manière dominante sur les couvertures de type argileuse de type intermédiaire ou finale, qui ne possèdent pas une épaisseur suffisante de sols perméables (moins de 50 cm).

Evaluation des émissions résiduelles de biogaz : choix du type de modèle	
	<p>Modèle classique de production de biogaz (couplé si possible à une déduction du volume capté) : GasSim v2.0, ADEME, interne SITA</p> <p>Modèle de diffusion 1D du biogaz dans les couvertures : CALMIM v5.1</p>
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • considère la production de biogaz : c'est un avantage pour évaluer les flux convectifs, qui sont en relation avec cette production : les flux ou fuites convectives sont estimées par un taux de fissure de la couverture applicable sur le débit résiduel ; • apparaît le plus adapté pour décrire la phase de méthanogénèse stabilisée (les premières phases de stockage ne sont pas prises en compte). <p>Ce type de modèle apparaît le plus adapté pour les couvertures à dominante argileuse, où les flux diffus de méthane sont très faibles.</p>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • prise en compte empirique de l'oxydation du méthane, du confinement et du captage (déclinaison de taux de captage) ; • nécessite un calage (sur les débits captés) pour réduire les incertitudes sur le flux résiduel non capté ; • nécessite de connaître la répartition des tonnages sous les différents types de couvertures pour appliquer des coefficients de collecte spécifiques. <p>La prise en compte de l'apport des déchets est réalisée généralement au pas de calcul annuel : les émissions sur la zone d'exploitation ne sont pas prises en compte (l'application d'un ratio empirique de 1/6 est proposée pour réduire cette limitation).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • considère l'ensemble des couches de sol et réalise un bilan hydrique : permet ainsi de connaître la saturation des sols modulant les flux diffusifs. L'oxydation du méthane est également modulée (température, humidité des sols) • adapté a priori à toutes les phases de stockage des déchets avec mise en place d'une couverture à texture adaptée. <p>Ce type de modèle apparaît le plus adapté pour les textures de sols de surface à dominante silteuse ou sableuse, où les flux diffus sont majoritaires</p>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SAVANNE (D), CASSINI (P), POKRYSZKA (Z), TAUZIEDE (C), TREGOURGES (A), BERNE (P), SABROUX (J.C.), CELLIER (P), LAVILLE (P) : A comparison of methods for the measurement of methane emissions from municipal solid waste landfills for the purpose of evaluating their contribution to the greenhouse effect (5th International Landfills Symposium, Sardinia'95, Margherita di Pula, 2-6 octobre 1995, vol III, p 475-479).

SAVANNE (D), ARNAUD (A), BENEITO (A), BERNE (Ph), BURKHALTER (R), CELLIER (P) (P), GONZE (M.A.), LAVILLE (P), LEVY (F), MILWARD (R), POKRYSZKA (Z), SABROUX (J.C.), TAUZIEDE (C), TREGOURES (A) : Comparaison of different methods for measuring landfill methane emissions. 6th International Landfills Symposium - Sardinia'97, Cagliari, 13-17 octobre 1997, vol IV, p 81-85.

SCHARFF (H) : Landfill gas production and emissions on former landfills, NV Afvalzorg, Interreg IIIC, oct. 2005

TARAMINI (V), BUDKA (A), POITEL (D), PUGLIERON (L), BOUR (O) Assessment of landfill gas emissions through different type of covers, Proceedings Sardinia 2003, 9th International landfill Symposium, CISA publisher

WIDORY (D), PROUST (E), BELLENFANT (G), BOUR(O) Assessing methane oxidation under landfill covers and its contribution to the above atmospheric CO₂ levels : The added value of the isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ CO₂, $\delta^{13}\text{C}$ and δD CH₄) approach, Waste Management 32 (2012) p 1685-1692

ANNEXES

Annexe 1 – Enregistrements des paramètres climatiques du site étudié

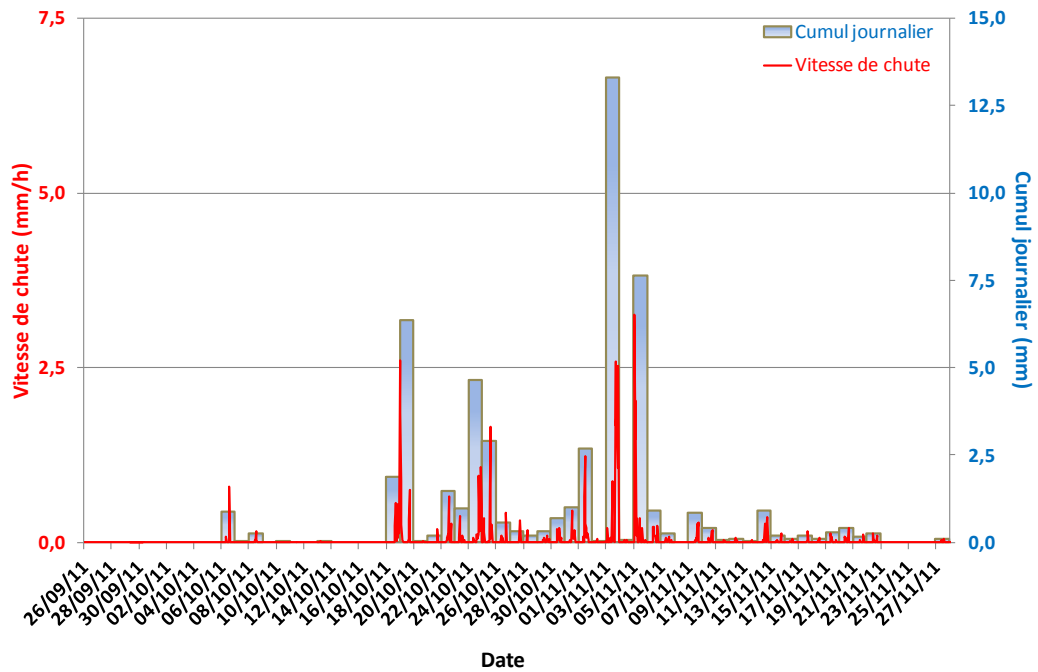


Figure 51 : Intensité des pluies et cumul journalier des pluies sur la période considérée (26/9 au 27/11/2011)

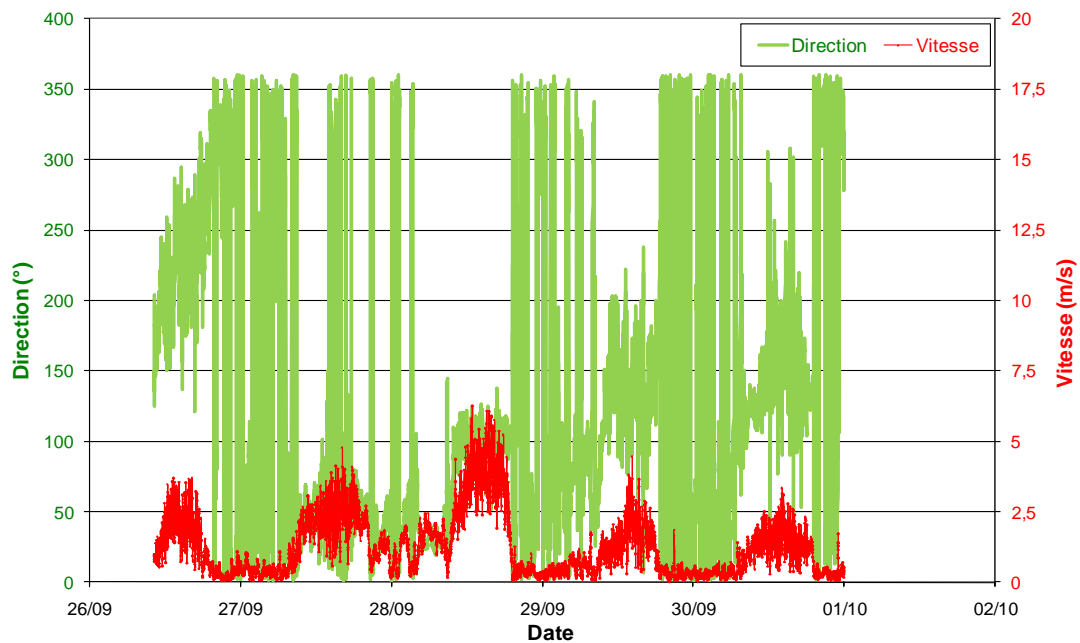


Figure 52 : Diagramme des vitesses et directions des vents, campagne de mesure du 26 au 30 septembre 2011

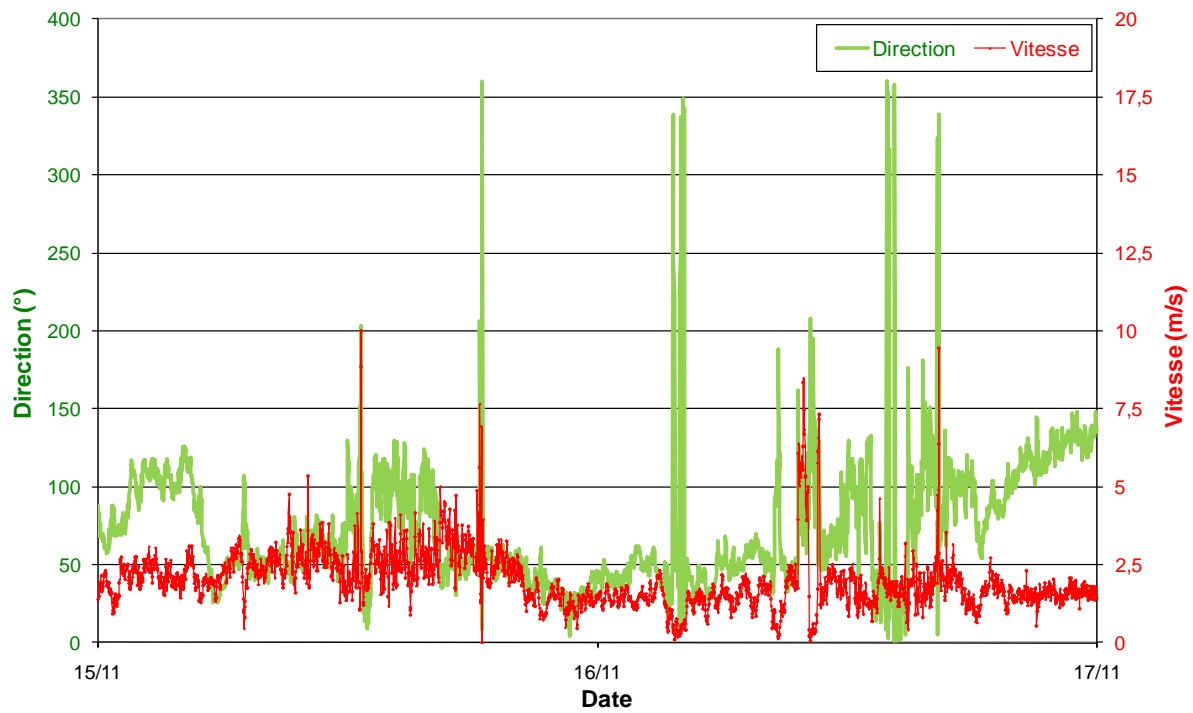


Figure 53 : Diagramme des vitesses et directions des vents, campagne de mesure du 15 et 16 novembre 2011.

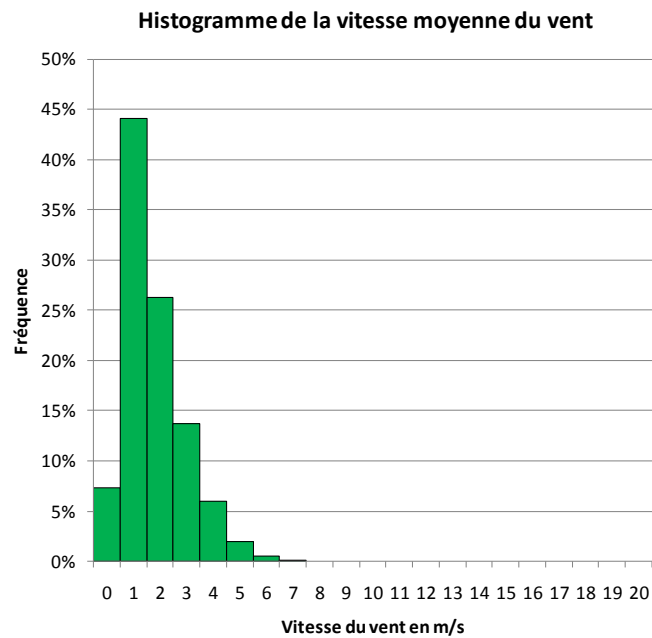


Figure 54 : Histogramme des vitesses moyennes des vents, campagne de mesure des flux de novembre 2011 du 26 au 30 septembre 2011

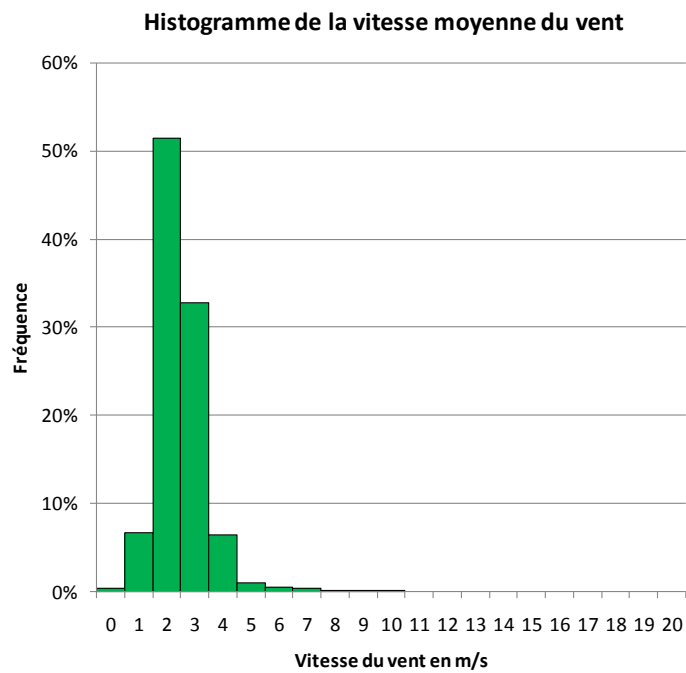


Figure 55 : Histogramme des vitesses moyennes des vents, Campagne secondaire de mesure des flux de novembre 2011 du 15 - 16 novembre 2011.

ANNEXES

Annexe 2 – plans des investigations et cartographie des estimations de flux du site étudié

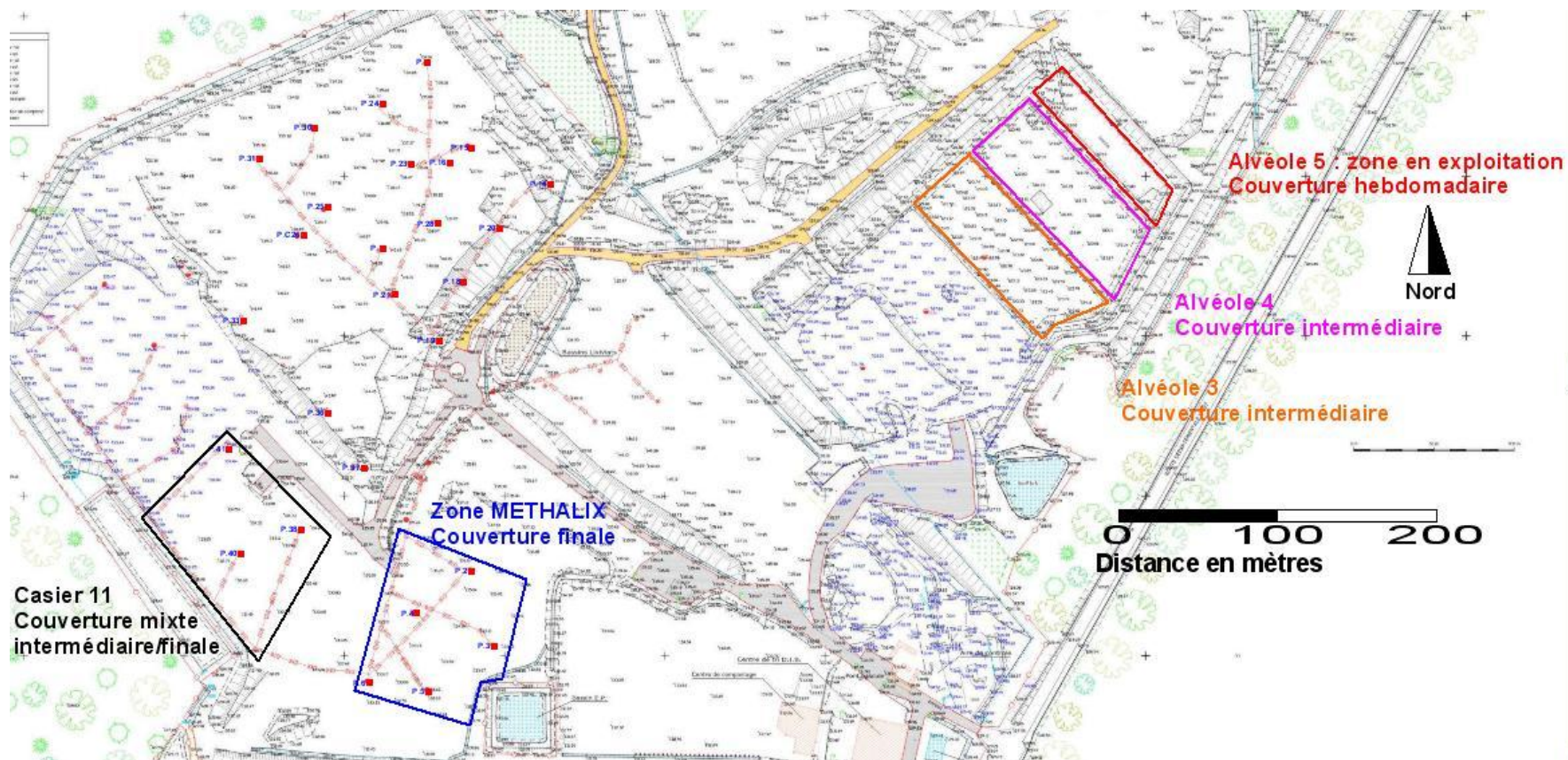


Figure 56 : zones d'étude sélectionnées sur le site pilote

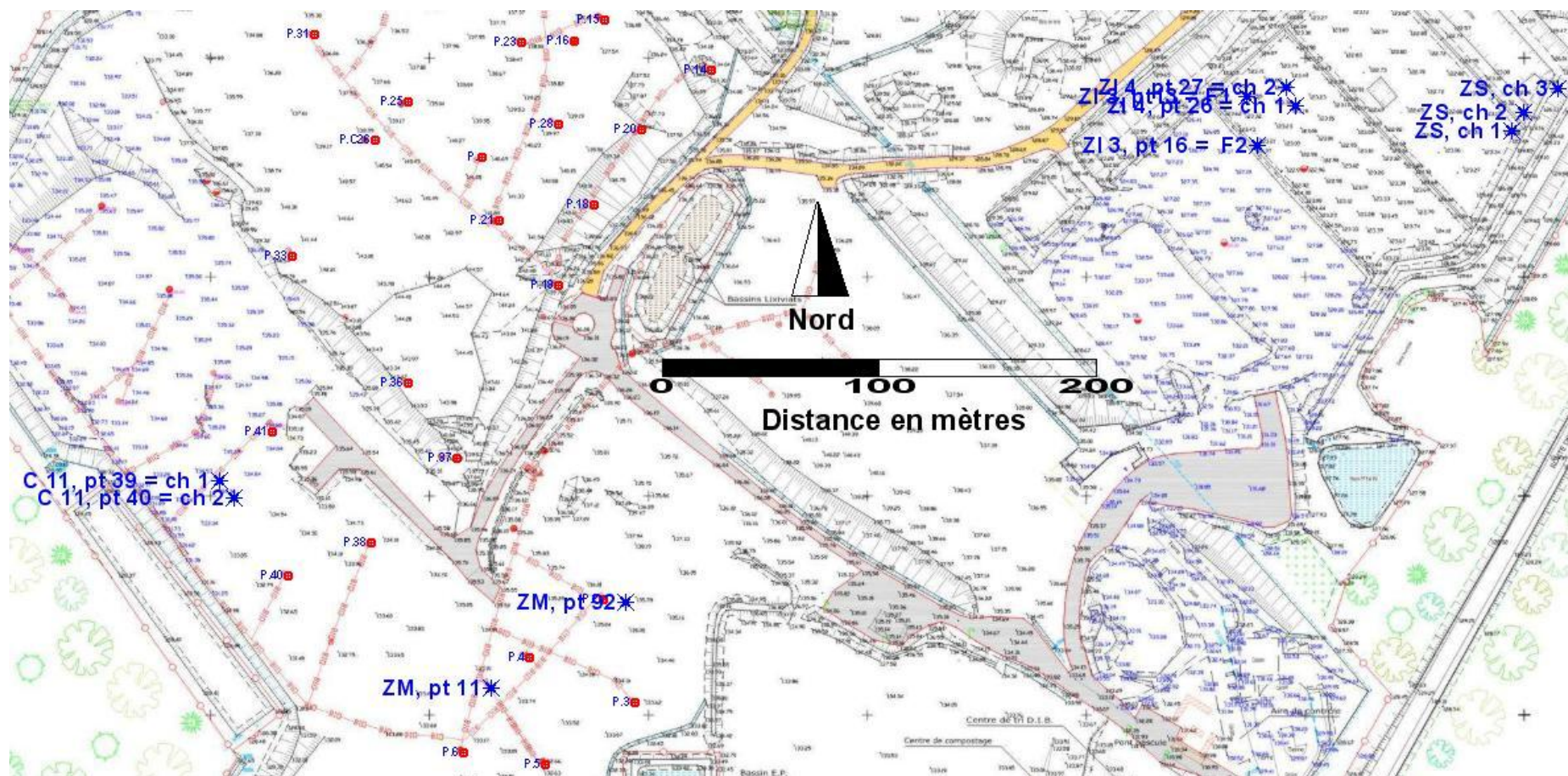


Figure 57 : Localisation des points de suivi dans le temps des couvertures (du 26/9 au 1/12/2011)

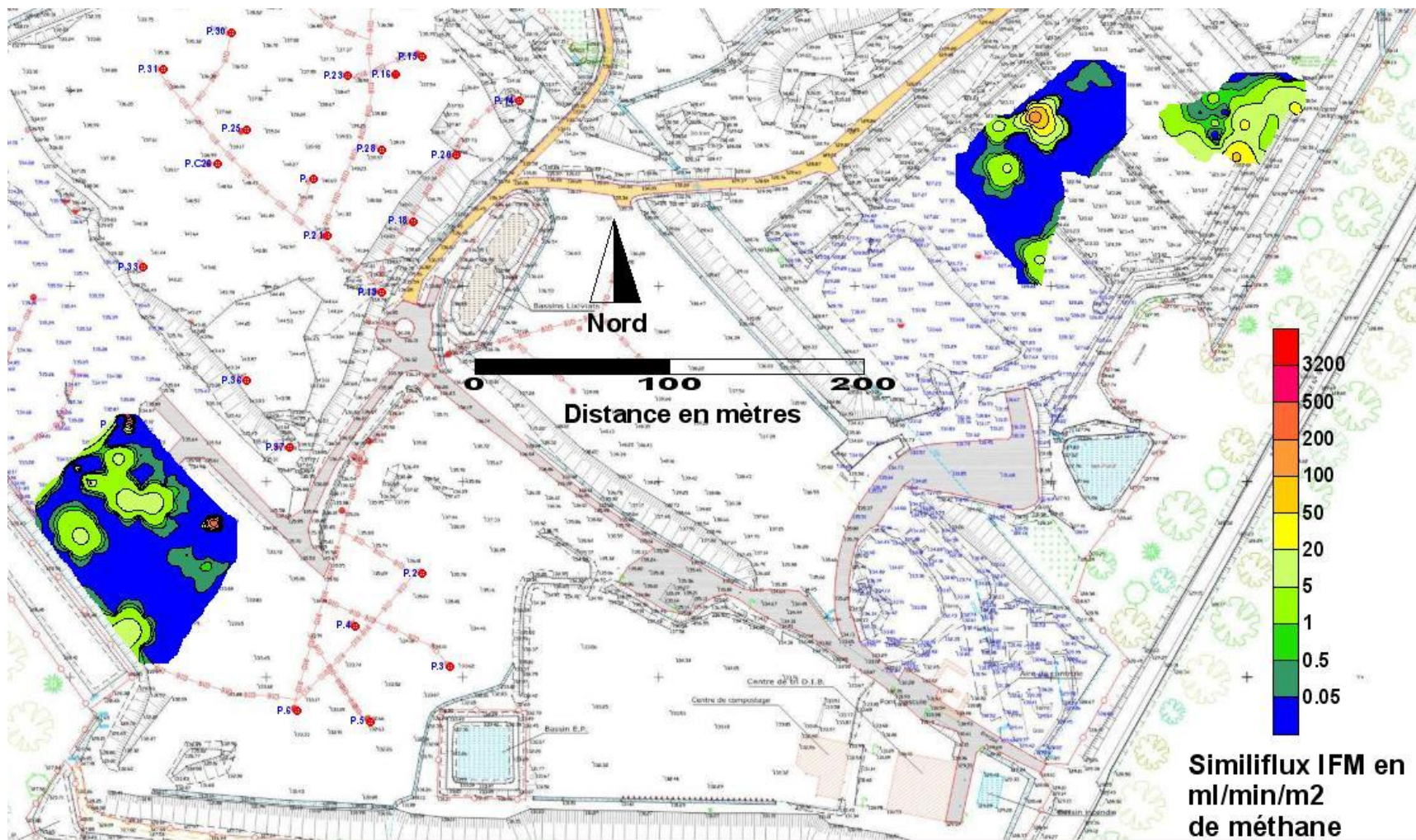


Figure 58 : Flux IFM de méthane interpolés des zones de couverture hebdomadaire et intermédiaire (septembre 2011)

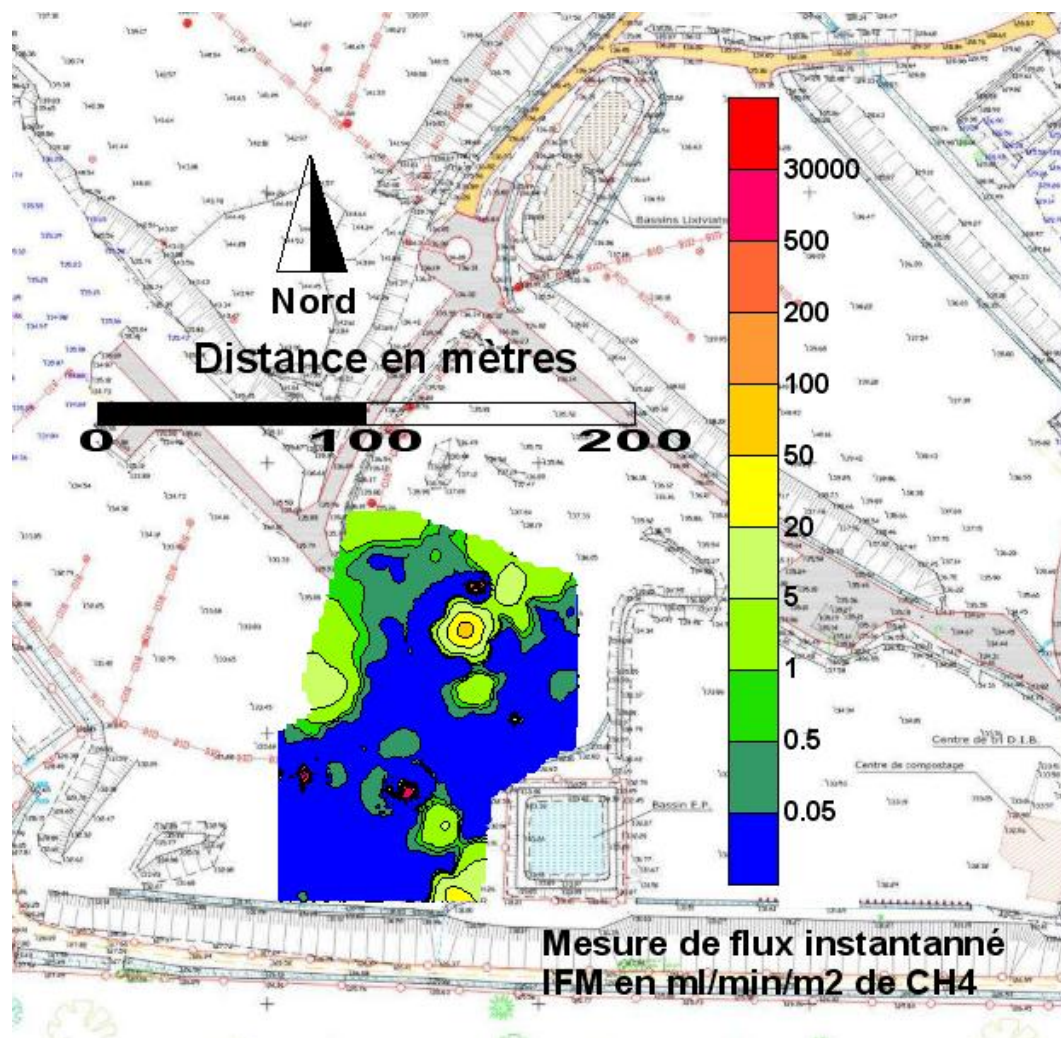


Figure 59 : Flux IFM de méthane interpolé sur la zone réaménagée avant 1997 (données de juin 2011)

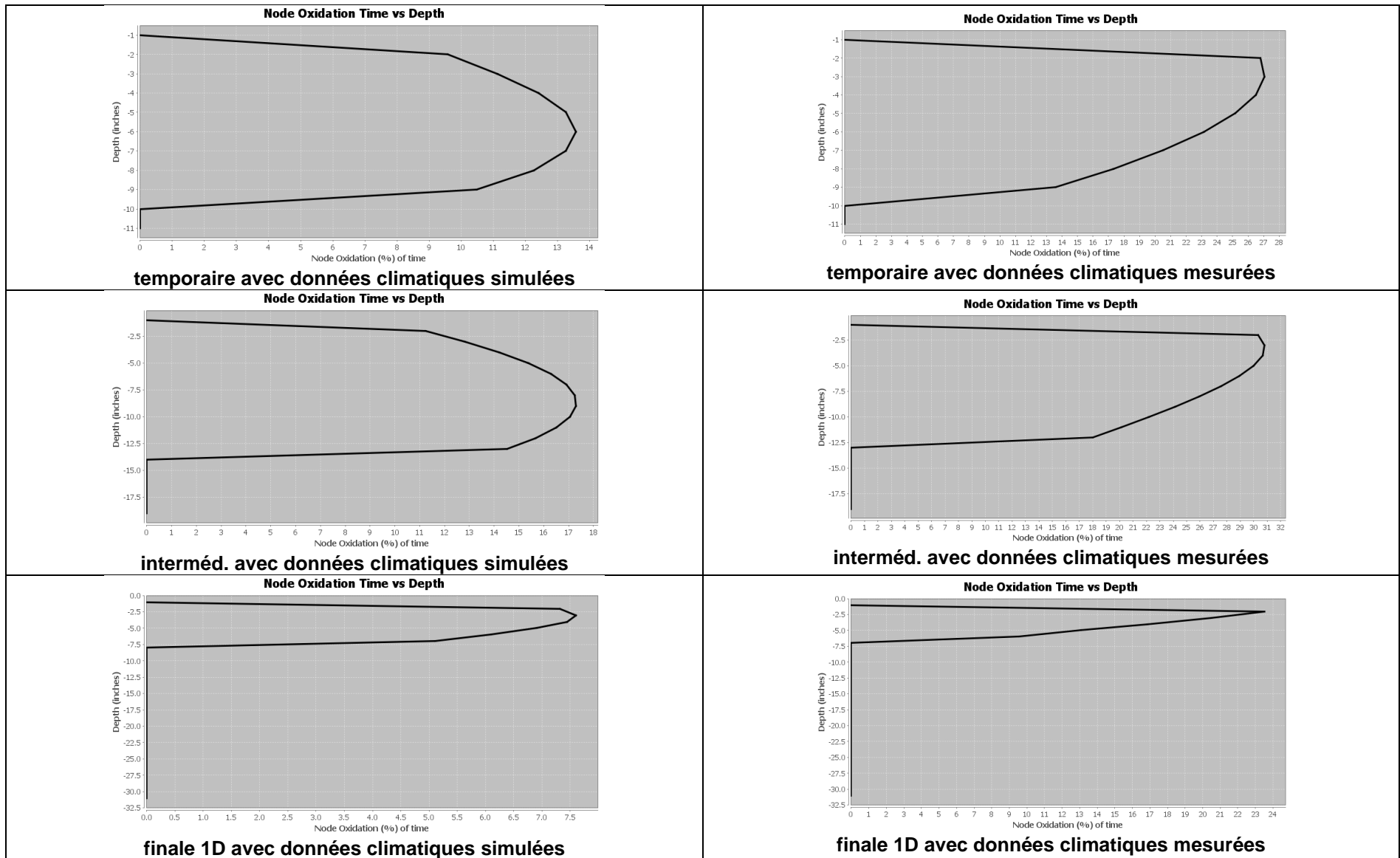


Figure 60 : Mesures de flux instantanés de méthane (IFM) réalisées sur le site en septembre 2011

ANNEXES

Annexe 3 – Calibration de CALMIM (zone d'oxydation, flux de méthane estimé/mesurés, influence des changements de texture, prise en compte d'une colonne de déchets)

Pourcentage d'oxydation de chaque nœud de calcul pour les zones temporaires, intermédiaires et zone 1D (de haut en bas), pour les données climatiques simulées (colonne de gauche) et les données simulées intégrant les 185 jours de mesures (colonne de droite) CALMIM V5.1



Comparaison des flux de méthane mesurés et estimés par CALMIM sur la zone temporaire (sable)

26-29/10				15-16/11				29/11-1/12			
Flux IFM moyen de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux IFM de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux CALMIM en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux CALMIM, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux IFM moyen de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux IFM de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux CALMIM en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux CALMIM, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux IFM moyen de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux IFM de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux CALMIM en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux CALMIM, en ml CH ₄ /min/m ²
7,98	13,03	4,11	1,22	9,95	16,84	2,86	2,34	5,12	7,33	3,23	2,25
% oxyd. moy. de CALMIM = 4,1% sur la période				% oxyd. moy. de CALMIM = 40,5% sur la période				% oxyd. moy. de CALMIM = 33,4% sur la période			

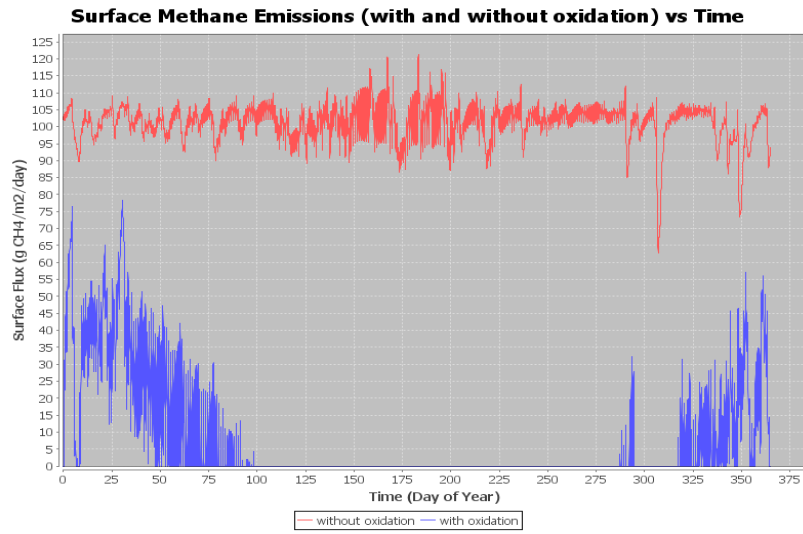
Comparaison des flux de méthane mesurés et estimés par CALMIM sur la zone intermédiaire (argile sableuse)

26-29/10				15-16/11				29/11-1/12			
Flux IFM moyen de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux IFM de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux CALMIM en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux CALMIM, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux IFM moyen de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux IFM de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux CALMIM en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux CALMIM, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux IFM moyen de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux IFM de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux CALMIM en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux CALMIM, en ml CH ₄ /min/m ²
7,87	34,87	0,00	0,00	3,17	7,21	7,09	10,21	1,27	5,12	9,04	10,16
% oxyd. moy. de CALMIM = 100% sur la période				% oxyd. moy. de CALMIM = 93,32% sur la période				% oxyd. moy. de CALMIM = 91,44% sur la période			

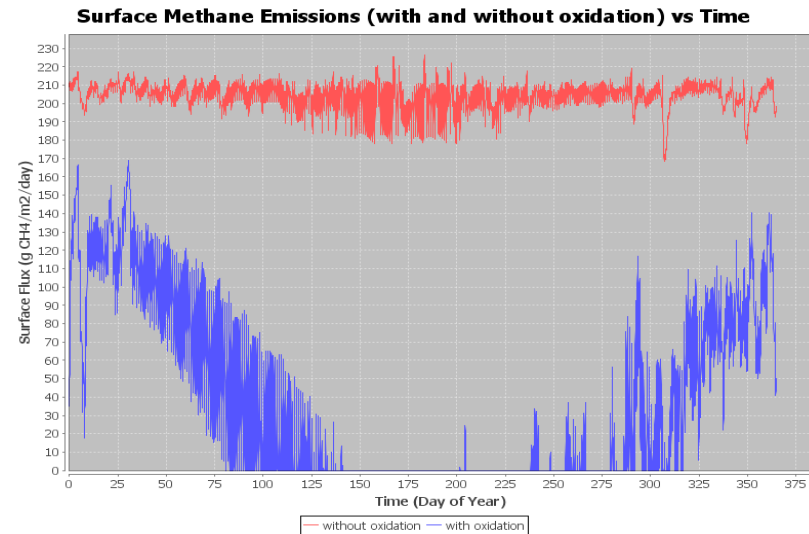
Comparaison des flux de méthane mesurés et estimés par CALMIM sur la zone finale 1D (argile silteuse)

26-29/10				15-16/11				29/11 - 01/12			
Flux IFM moyen de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux IFM de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux CALMIM en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux CALMIM, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux IFM moyen de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux IFM de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux CALMIM en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux CALMIM, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux IFM moyen de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux IFM de la zone, en ml CH ₄ /min/m ²	Flux CALMIM en ml CH ₄ /min/m ²	Ecart type du flux CALMIM, en ml CH ₄ /min/m ²
1,63	5,08	0,00	0,00	0,09	0,13	20,57	9,44	0,29	0,90	26,76	8,69
% oxyd. moy. de CALMIM = 100 % sur la période				% oxyd. moy. de CALMIM = 65 % sur la période				% oxyd. moy. de CALMIM = 62 % sur la période			

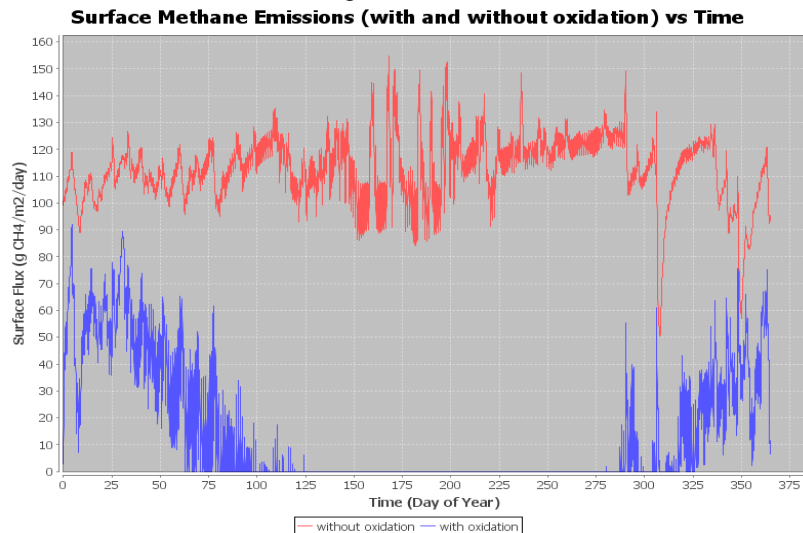
Influence des changements de texture sur les émissions de méthane avec (bleu) et sans oxydation (rouge) de la couverture intermédiaire (CALMIM v5.1) ½



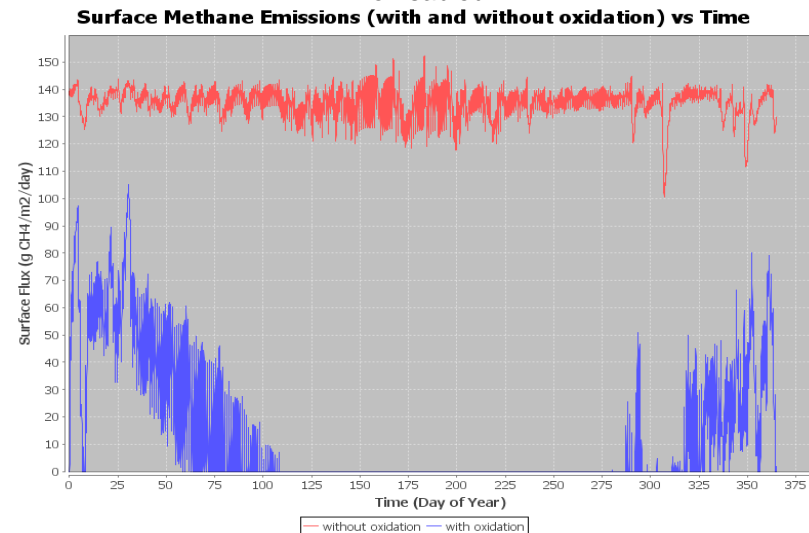
Argile sableuse



Limon sableux

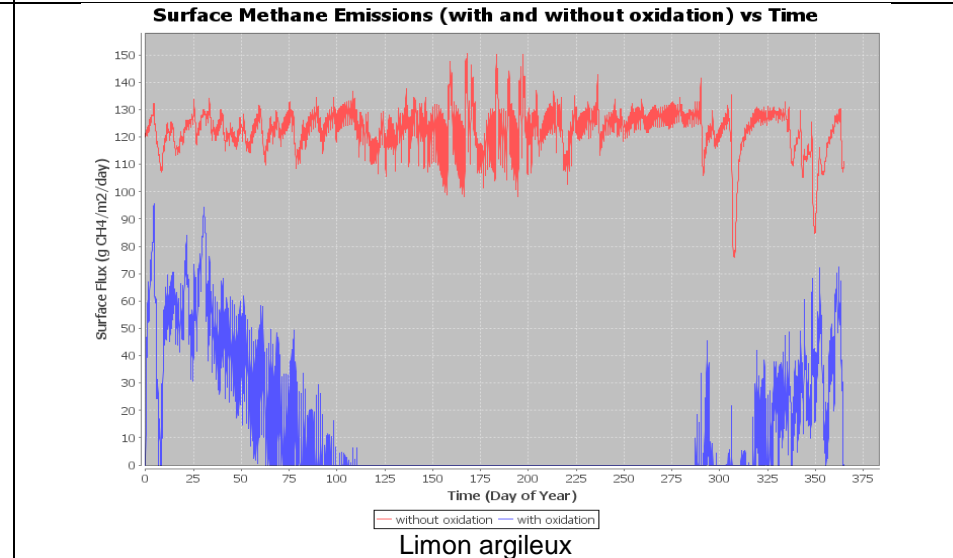
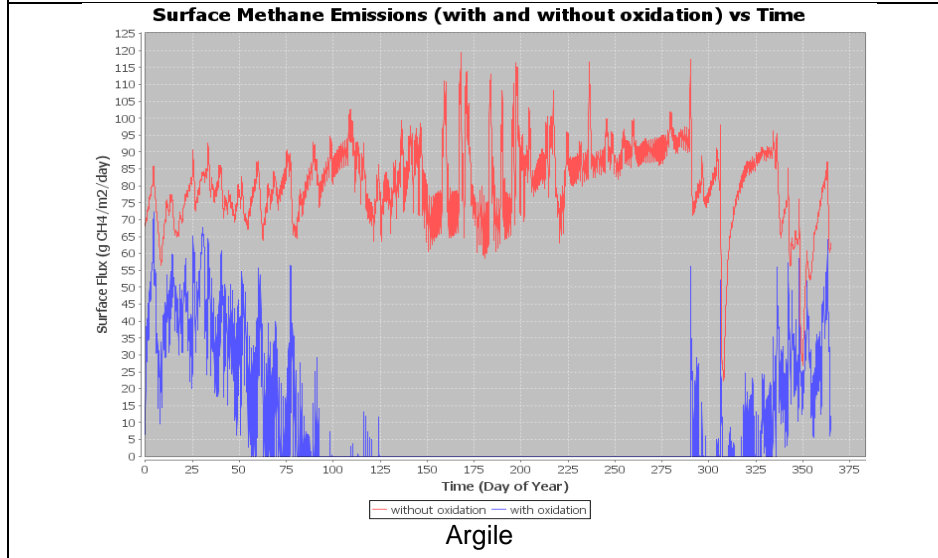
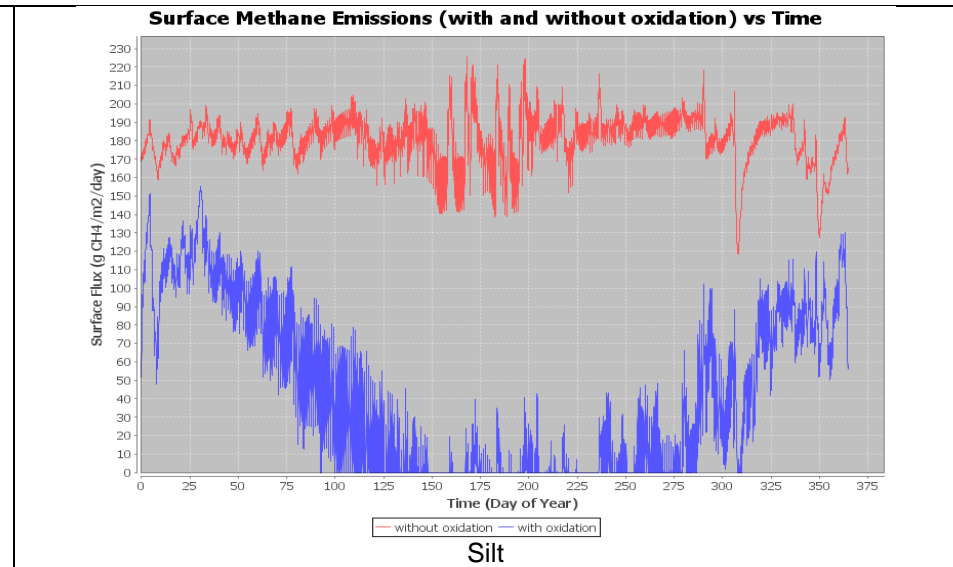
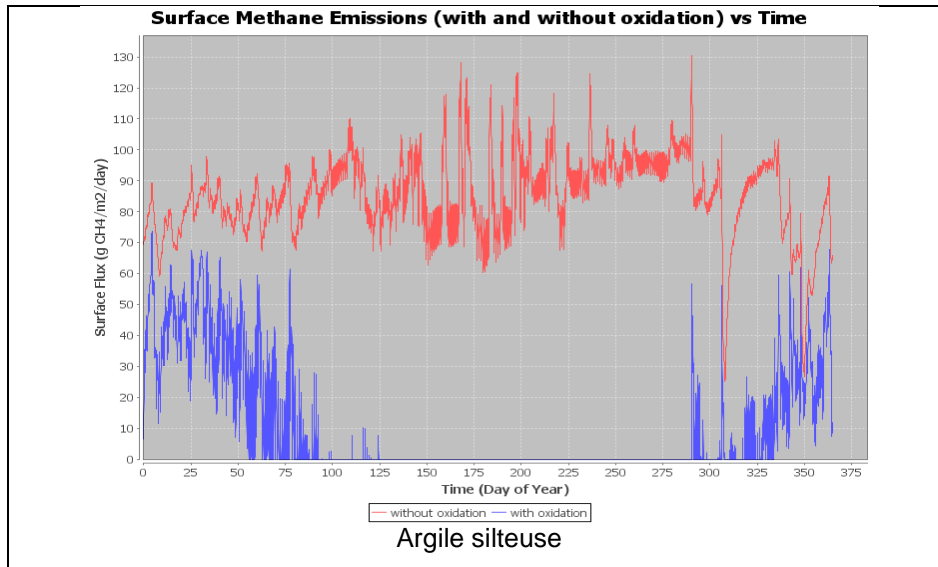


Limon silto-argileux

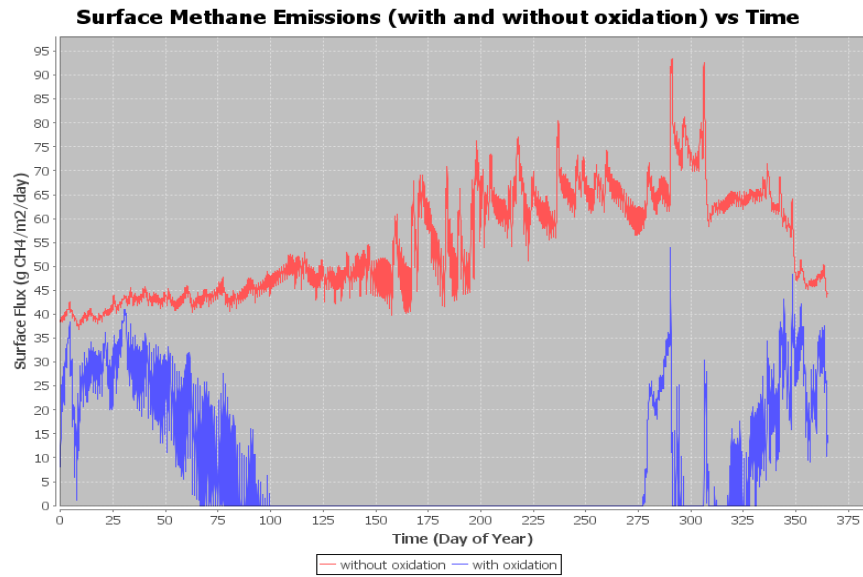


Limon sablo-argileux

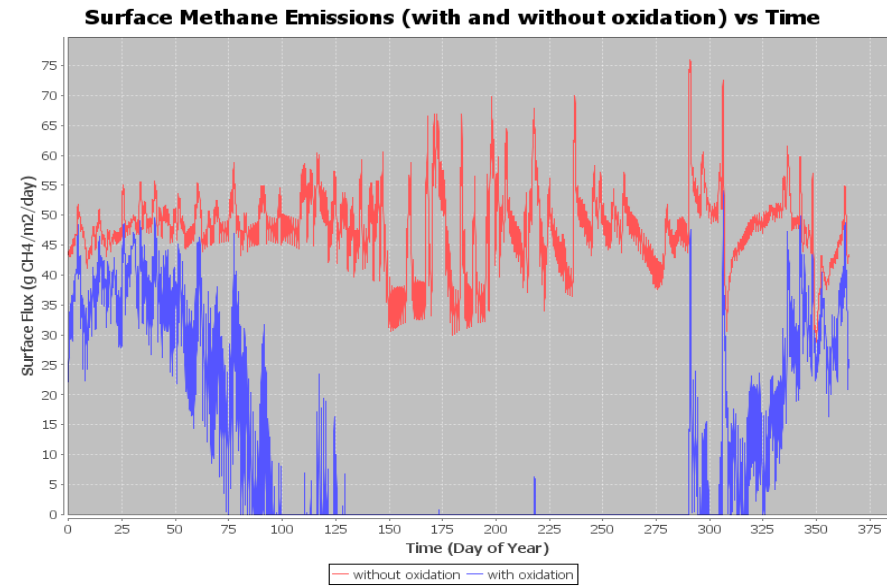
Influence des changements de texture sur les émissions de méthane avec (bleu) et sans oxydation (rouge) de la couverture intermédiaire (CALMIM v5.1) 2/2



Essais de prises en compte de la colonne de déchets sous la couverture intermédiaire, émissions de méthane avec (bleu) et sans oxydation (rouge)



50 cm d'argile sableuse, 1 m de compost, oxy = 200 µg/g/jour
Emissions surfaciques :
56 g CH₄ /m²/jour (sans ox) ; 9 g CH₄/m²/jour (avec ox)



50 cm d'argile silteuse, 1 m de compost, oxy = 200 µg/g/jour
Emissions surfaciques :
48 g CH₄ /m²/jour (sans ox) ; 12 g CH₄/m²/jour (avec ox), (75% oxyd.).

ANNEXES

Annexe 4 – Paramètres de GasSim et des 3 sites choisis pour l'application des modèles de production

Composition des déchets selon le flux Anglais « 1980-2010 », d'après Gassim v2 et le rapport HELGA (Gregory & al, 1999)

Teneur en %	type	OM en %	DIB en %	Boues	Compost	Eau	Cellulose	Hémi cellulose	Décomposition
Papier/carton	Journaux	11,38	10			30	48,5	9	35
	Magazine	4,87				30	42,3	9,4	46
	Autre papier	10,07	50,1			30	87,4	8,4	98
	Cartons liquides	0,51				30	57,3	9,9	64
	Emballage	3,84				30	57,3	9,9	64
	Autre cartons	2,83				30	57,3	9,9	64
Textiles	Textile	2,36				25	20	20	50
Combustibles	Couches jetables	4,35				20	25	25	50
	Autres	3,6				20	25	25	50
Putrescibles	Déchets verts	2,41				65	25,7	13	62
	Autres	18,38	15			65	55,4	7,2	76
Fines	10 mm fines	7,11				40	25	25	50
Boues	Boues			100		70	14	14	75
Compost	Compost				100	30	Tri 0,5, 0,7, 1,5	Tri 0,5, 0,7, 1,5	57
Non dégradable	Total	28,86	24,6	0	0	-	-	-	-

Caractéristiques des déchets et du site 1

Zone fermée

Début d'exploitation	juil-99
Réaménagement	nov. 2007 - mai 2008
Surface	85518 m ²
Nature de la couverture	1 m min. de matériaux naturels argileux remaniés et compactés Couche drainante d'une perméabilité supérieure à 10 ⁻⁴ m/s 0,30 m min. de terre végétale Engazonnement + déchets verts broyés

Tonnages & nature des déchets enfouis :

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007 (au 09/11/07)
OM	30 627	42 451	46 747	61 150	63 390	46 124	45 191	45 815	28 310
DIB et assimilés	39 092	45 556	52 655	30 409	28 996	33 101	43 368	58 381	37 792
Démolition et inertes	70	1 305	2 396	4 265	1 877	1 196	1 237	864	14 785
Déchets verts / compost	3 305	4 152	3 933	3 756	3 744	4 002	3 747	4 298	4 772
RBA	1 331	11 805	13 081	17 925	19 223	28 442	25 568	16 694	15 719
Mâchefers	244	0	0	0	0	0	0	0	0
Rebuts de l'industrie alimentaire	0	958	3 749	3 479	3 462	3 492	2 887	397	35
Sables de fonderie	117	135	77	61	53	56	34	158	105
Boues de station d'épuration / D. Grenailage K2			0	0	0	0	5	46	161
TOTAL	74 786	106 362	122 638	121 045	120 745	116 413	122 037	126 653	81 048

Système de captage	42 puits verticaux
--------------------	--------------------

Caractéristiques des déchets et du site 2

Zone ouverte

Début d'exploitation 2008

Réaménagement

Surface 39034 m²

Couvertures	2008	2009	2010	2011			2012	
Surface (m ²)		10604	26000	14300	1083	10917	5600	17373
Nature		Zone en exploitation non reliée à une unité de combustion	Zone en exploitation non reliée à une unité de combustion	Zone en exploitation non reliée à une unité de combustion	Zone en exploitation reliée à une unité de combustion	Zone avec couverture semi-perméable (constituée de matériaux naturels de faible imperméabilité, mis en œuvre sans précaution particulières pour limiter les infiltrations d'eau)	Zone en exploitation non reliée à une unité de combustion	Zone avec couverture semi-perméable (constituée de matériaux naturels de faible imperméabilité, mis en œuvre sans précaution particulières pour limiter les infiltrations d'eau)

Tonnages & nature des déchets enfouis :

	DIB	RBA	Refus de tri DIB	Déchets inertes	Terres polluées	TOTAL
2008	29 425	0	0	37	0	29 462
2009	48 012	77	0	27	0	48 116
2010	61834,63	69	0	21	0	61 925
2011	56 394	0	0	0	0	56 394
2012	29 268	1 585	29 354	0	79	60 286

Système de captage 8 tranchées drainantes de 50 m chacune

1 puits mixte

11 puits forés

Caractéristiques des déchets et du site pilote

Site pilote

site pilote comprenant une zone fermée et une zone ouverte

Début d'exploitation	1997
Réaménagement	partiel sur le site et concerne une zone de 5,2 ha (dôme) ainsi qu'une zone complémentaire de reprise potentielle de la couverture (2,5 ha)
Surface	114612 m ²
Nature de la couverture	zone du dôme réaménagée: 7m en moyenne d'argile + 30 cm de terre végétale zone complémentaire (casier 11) : 0,80 cm d'argile zone nouvelle en couverture renforcée (géomembrane sur argile) zone nouvelle en couverture intermédiaire : 50 cm de matériaux argileux zone en exploitation : couverture sableuse (30cm)

Tonnages & nature des déchets enfouis :

Années	OM		Boues		DIBi		Encombrants/Inertes		Refus de Compostage		TOTAL (tonnes)
	t	%	t	%	t	%	t	%	t	%	t
1997	12 126	21%		0%	44 370	79%		0%		0%	56496
1998	1 927	4%		0%	43 696	96%		0%		0%	45623
1999	873	2%		0%	56 788	98%		0%		0%	57661
2000	160	0%		0%	56 473	100%		0%		0%	56633
2001	416	1%	901	2%	47 008	97%		0%		0%	48325
2002	8 026	15%	770	1%	46 262	84%		0%		0%	55058
2003	0	0%	2 825	5%	51 160	95%		0%		0%	53985
2004	361	1%	290	1%	46 624	93%	2 853	6%	23	0%	50151
2005	1 754	3%	129	0%	49 511	91%	2 724	5%	63	0%	54181
2006	1 481	3%	2 766	5%	47 890	89%	1 551	3%	73	0%	53761
2007	524	1%	3 069	5%	53 626	91%	1 522	3%	15	0%	58756
2008	439	1%	2 539	4%	56 711	91%	2 611	4%	84	0%	62384
2009	4	0%	1 915	3%	65 269	88%	7 077	10%	155	0%	74420
2010	7 346	13%	202	0%	40 643	74%	6 023	11%	1 079	2%	55293
2011	22 046	31%	202	0%	40 643	58%	6 023	9%	1 079	2%	69993
2012	22 046	31%	202	0%	40 643	58%	6 023	9%	1 079	2%	69993
2013	22 046	31%	202	0%	40 643	58%	6 023	9%	1 079	2%	69993

Système de captage : 42 puits verticaux

ANNEXES

Annexe 5 – Paramètres de CALMIM

Flux de diffusion avec et sans oxydation pour une argile sableuse, en fonction du taux de couverture du système de captage

*	sandy clay recov 0 %	sandy clay 10% recov	sandy clay 20% recov	sandy clay 30% recov	sandy clay 40%	sandy clay 50% recov
Methane Concentration Base of Cover	45.0%	43.65%	42.3%	40.95%	39.6%	38.25%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	132.22	128.97	124.29	120.32	116.36	112.39
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	22.88	21.03	19.33	17.62	15.96	14.36
% Oxidation	82.64	83.65	84.4	85.31	86.24	87.18
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	85216.45	78316.78	71975.05	65618.32	59443.67	53474.33
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	492387.42	480278.14	462844.03	448072.33	433300.64	418528.95
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	36.88	39.39	41.26	43.52	45.83	48.19
*	sandy clay recov 50 %	sandy clay 60% recov	sandy clay 70% recov	sandy clay 80% recov	sandy clay 90%	sandy clay 100% recov
Methane Concentration Base of Cover	38.25%	36.9%	35.55%	34.2%	32.85%	31.5%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	112.39	109.03	104.46	100.49	96.52	92.56
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	14.36	12.73	11.33	9.91	8.55	7.25
% Oxidation	87.18	88.29	89.12	90.11	91.12	92.14
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	53474.33	47422.27	42186.41	36896.52	31831.79	27005.9
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	418528.95	406007.95	388985.56	374213.87	359442.17	344670.48
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	48.19	51.04	53.09	55.64	58.25	60.92

Flux de diffusion avec et sans oxydation en fonction des 12 textures de sol de l'USDA

*	sand recov 0 %	sandy clay 0% recov	loamy sand 0% recov	sandy loam 0% recov	silty loam 0%	loam 0% recov
Methane Concentration Base of Cover	45.0%	45.0%	45.0%	45.0%	45.0%	45.0%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	389.48	132.19	340.08	266.26	213.88	216.48
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	200.96	22.89	150.72	85.15	65.54	59.35
% Oxidation	48.86	82.64	56.26	68.37	69.51	72.76
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	748361.11	85226.77	561268.91	317076.46	244081.91	221030.14
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	1450380.96	492257.53	1266426.88	991517.76	796471.31	806154.99
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	0.0	36.87	0.0	3.73	3.88	8.68
*	sandy clay loam 0% recov	silty clay loam 0% recov	clay loam 0% recov	silty clay 0% recov	clay 0%	silt 0% recov
Methane Concentration Base of Cover	45.0%	45.0%	45.0%	45.0%	45.0%	45.0%
Methane Emission without Oxidation (g/m ² /day)	176.41	145.39	159.7	109.15	103.38	235.05
Methane Emission with Oxidation (g/m ² /day)	36.2	34.42	33.94	25.25	24.23	95.42
% Oxidation	79.65	75.88	78.67	75.76	75.52	59.63
Total Cover Emissions with Oxidation (kg/year)	134809.42	128188.39	126379.16	94019.46	90242.55	355340.21
Total Cover Emissions without Oxidation (kg/year)	656935.82	541415.28	594728.02	406461.72	384978.55	875295.46
Remaining Oxidation Capacity(g/m ² /day)	26.16	20.16	24.06	31.71	30.95	0.01

Paramètres des couvertures selon la description des textures (CALMIM v4.2)

Default Material Properties in Model

	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil ?	Bulk Density (g/cm3)	SatConductivity (kg/m3)	Voluneric Moisture (33 kPa)	Volumetric Moisture (1500 kPa)	Beta (Campbell)	Total Porosity (33 kPa)
Soil Materials										
SAND	93.6	3.06	3.34	true	1.63	0.002703	0.091	0.039	2.01	0.386
SANDY CLAY	93.6	3.06	3.34	true	1.44	0.000176	0.231	0.113	10.21	0.455
LOAMY SAND	82.74	9.66	7.6	true	1.58	0.001760	0.116	0.051	2.86	0.402
SANDY LOAM	65.6	22.5	11.9	true	1.53	0.000763	0.139	0.062	4.29	0.422
SILTY LOAM	21.8	62.7	15.5	true	1.28	0.000137	0.276	0.125	6.86	0.518
LOAM	42.9	39.5	17.6	true	1.40	0.000292	0.223	0.102	6.26	0.474
SANDY CLAY LOAM	60.1	11.3	28.6	true	1.47	0.000356	0.2	0.095	7.42	0.445
SILTY CLAY LOAM	9	55	36	true	1.24	0.000052	0.321	0.151	10.36	0.532
CLAY LOAM	34.7	30.3	35	true	1.35	0.000125	0.264	0.125	8.94	0.489
SILTY CLAY	9.3	43.89	46.81	true	1.28	0.000031	0.312	0.15	13.00	0.517
CLAY	10	25	65	true	1.26	0.000034	0.351	0.172	14.20	0.524
SILT	7.96	63.62	5.41	true	1.16	0.000106	0.332	0.149	6.72	0.564
Rocks - Pebbles	93.6	3.06	3.34	true	1.63	0.002703	0.091	0.039	2.01	0.386
Rocks - Boulders (large)	95.6	2.06	2.34	true	2.01	0.003100	0.071	0.019	2.01	0.245
ADC Foundry Sands	90	5	5	true	1.63	0.003703	0.1	0.04	3.00	0.39
ADC Dredged Materials	7.96	63.62	5.41	true	1.16	0.000106	0.332	0.149	6.72	0.564
ADC Ash	21.8	62.7	15.5	true	1.28	0.000137	0.276	0.125	6.86	0.518
ADC Contaminated Soils (clay)	10	25	65	true	1.26	0.000034	0.351	0.172	14.20	0.524
ADC Contaminated Soils (sand)	90	5	5	true	1.63	0.003703	0.1	0.04	3.00	0.39
ADC Contaminated Soils (general - loam)	42.9	39.5	17.6	true	1.40	0.000292	0.223	0.102	6.26	0.474
ADC Tire Shreds [small <2 in (50 mm)]	90	5	5	true	1.08	0.051300	0.19	0.06	2.00	0.51
ADC Tire Shreds [large >2 in (50 mm)]	90	5	5	true	1.63	0.003703	0.1	0.04	3.00	0.39
ADC Wood Chips (all)	90	5	5	true	1.08	0.081300	0.22	0.06	2.00	0.33
ADC sludge	10	80	10	true	1.20	0.001060	0.452	0.15	8.70	0.564
ADC Energy Resource Exploration and Production Wastes	42.9	39.5	17.6	true	1.40	0.000292	0.223	0.102	6.26	0.474
ADC Composted Organic Materials	42.9	39.5	17.6	true	1.40	0.000292	0.223	0.102	6.26	0.474
Non-Soil Materials										
Geomembrane (HDPE)	10	25	65	false	1.26	0.000034	0.351	0.172	14.20	0.524
Geomembrane (LDPE)	10	25	65	false	1.26	0.000034	0.351	0.172	14.20	0.524
Geomembrane (EDPM)	10	25	65	false	1.26	0.000034	0.351	0.172	14.20	0.524
Geotextile (woven)	10	25	65	false	1.26	0.000034	0.351	0.172	14.20	0.524
ADC Spray Applied Cement Products	10	25	65	false	1.26	0.000034	0.351	0.172	14.20	0.524
ADC Spray Applied Foams	10	25	65	false	1.26	0.000034	0.351	0.172	14.20	0.524
ADC Temporary Tarp	10	25	65	false	1.26	0.000034	0.351	0.172	14.20	0.524

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche. www.ademe.fr



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Higher Education and Research. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr