



BIOFILTRATION DU BIOGAZ 2009/2011

Rapport de synthèse

BIOGAS BIOFILTRATION 2009/2011

Summary report

6 décembre 2012

Rapport rédigé par Laurent Riquier - **Riquier Etudes Environnement / REE** (Seythenex)

Etude réalisée pour le compte des sociétés **VEOLIA Propreté, SITA France** et **COVED**.

COORDINATION TECHNIQUE :

Dominique Presse, Anna Akerman et Laurent Galtier, DTEI - SITA France (Paris, La Défense)

Mélodie Ducrocq et Michel Guerbois, DES – VEOLIA Propreté (Nanterre)

Cyril Horlaville et Goery Vilair, COVED (ST Quentin en Yvelines)

Isabelle Hébé, Direction Consommation Durable et Déchets – ADEME (Angers)

Remerciements :

Remerciements à l'ensemble des équipes (responsables et personnels techniques) des sites ainsi qu'aux ingénieurs et techniciens des différents groupes, en charge de la réalisation des travaux d'installations, des mesures, de l'aide à l'interprétation et du suivi général du programme.

A souligner plus particulièrement, l'important et précieux travail réalisé par Mélodie Ducrocq (VEOLIA Propreté) tout au long du programme, ainsi que l'aide à la présentation des rapports apportée par Anna Akerman (SITA France) en phase finale.

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

Et un copyright

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'œuvre 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.

Résumé :

Le projet biofiltration du biogaz issu des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) s'inscrit dans le programme de recherche « Post-Exploitation » soutenu par l'ADEME. Ce document constitue le rapport final du projet de recherche et développement initié en 2007.

Le principal besoin était d'approfondir les compétences techniques et de trouver des solutions performantes dans le traitement du biogaz, au cours de la post-exploitation des ISDND. Ce sujet est fortement soutenu par l'ADEME, dans le cadre de son programme sur la post-exploitation des ISDND. Il a été identifié que la biofiltration pouvait aussi servir dans des cas spécifiques où le contexte environnemental nécessite un captage et où le système de traitement conventionnel n'est pas adapté. De manière générale, il s'agit de zones de stockage peu productrices en biogaz, mais aussi et surtout avec de faibles teneurs en méthane (< 20 % de CH₄), qui, à part sur les sites fermés, peuvent également se rencontrer sur :

- des petits sites ;
- des sites recevant des déchets peu organiques ;
- des premières phases de stockage ;
- d'autres techniques de traitement des casiers (ex aération...).

VEOLIA Propreté, SITA France et COVED ont choisi de réaliser quatre pilotes de biofiltres, dont deux à échelle industrielle, dimensionnés selon les retours d'expériences européens. Les biofiltres étaient constitués de compost comme matériau filtrant mélangé à divers structurants (copeaux de bois et refus d'affinage). Ceci a permis d'apprécier les étapes de mise en place et de suivi, d'estimer les performances du système avec l'impact des saisons, sur une période de 14 à 19 mois en fonction des sites. L'objectif final était de mieux appréhender la technique, son efficacité ainsi que ses limites d'utilisation.

Ce dernier rapport du projet présente un descriptif sommaire du contexte (site, matériels et méthodes). Il a pour principal objectif de présenter les résultats obtenus durant le suivi. En fin de document et pour conclure, des préconisations sont formulées, de la conception à l'exploitation des systèmes pour optimiser la technique.

Les résultats en termes d'efficacité ont fait apparaître des différences entre les pilotes. Mais, ils ont permis de montrer que la technique de biofiltration pouvait permettre d'abattre la teneur en méthane. Ils restent néanmoins bien inférieurs (0 % à 50 %) à ceux affichés dans la bibliographie (60 à 90 %).

Aussi, on a pu apprécier la sensibilité du traitement aux variations saisonnières de températures, notamment en période hivernale. Ainsi, il apparaît que le paramètre le plus important soit la température dans le biofiltre. Pour l'ensemble des pilotes, il n'y a plus eu d'efficacité d'oxydation lorsque les températures extérieures, suivies des températures intérieures, sont devenues trop basses. Les autres facteurs d'influences sur l'efficacité des biofiltres sont l'humidité et le structurant.

Au regard des résultats obtenus sur l'efficacité de ce type de traitement, il semble donc délicat d'affirmer que le traitement par biofiltration active, puisse parvenir aux valeurs citées dans la bibliographie situées entre 60 et 90 % et ce de manière régulière durant toutes les saisons de l'année. En effet, les efficacités les plus élevées sur l'ensemble des pilotes ont été observées principalement en périodes estivales, avec des valeurs mensuelles moyennes proches de 40 % pour 2 pilotes.

Des propositions ont été faites pour améliorer le dispositif. Elles concernent plusieurs parties du système, de la conception à son exploitation. Il s'agira en premier lieu, de garantir une température minimum dans le biofiltre quelque soit les conditions météorologiques extérieures (cf. chauffage de l'air et isolation du procédé) impliquant parallèlement, un maintien impératif de l'intégrité du média (cf. proportion en structurant et brassage régulier) et d'assurer l'appoint en humidité pour pallier à la consommation suscitée par de bonnes conditions de fonctionnement. Enfin, un protocole de suivi très strict et régulier devra être respecté, proche de celui mis en place au cours de ce programme de recherche, pour des raisons de contrôle de fonctionnement ainsi que pour des raisons sécuritaires (cf. état de surface, composition des gaz, température, humidité).

Abstract :

The project Biofiltration of landfill gas (LFG) is part of the ADEME Aftercare R&D program. This document is the final report of the R&D project that started in 2007.

The overall aim consisted in improving the technical knowledge and finding performing solutions for LFG treatment during the landfill aftercare period. This topic is strongly supported by ADEME in the framework of its Aftercare R&D program. Biofiltration may also be applied to treat the LFG on sites where the environmental context requires a gas collection and treatment and where the conventional treatment system is not adapted. This generally concerns landfill sites or zones where little LFG is produced and or where the LFG has low levels of methane (< 20 % de CH₄), conditions which, besides on closed sites, may exist on:

- small landfill sites,
- landfill sites with low organic waste,
- first landfilling phases,
- zones with other types of treatment (ex. aeration...).

VEOLIA Propreté, SITA France and COVED chose to construct and monitor four biofiltration pilotes, two of which on an industrial scale, designed according to European state-of-the-art. The filter media of the pilots consisted of compost mixed with different structural components (wood chips and non-compostable fractions). This work has enabled evaluating the construction and monitoring phases as well as assessing the performance of the systems taking into account the seasonal impacts, over a 14 to 19 months period. The final objective was being able to better understand the technology, its performance as well as its limits.

This last report of the project first briefly describes the pilot landfill sites, the materials and methods used and then presents the results obtained during the monitoring. In the end of the document, recommendations are proposed, concerning the design, operation and maintenance in order to optimise the technology and its performance.

The results have shown that the performances of the different pilots are quite different. But it has been shown that the biofiltration technology enables to treat the methane in the LFG, even though the results found in this project are way under (0 % à 50 %) those found in literature (60 à 90 %).

The sensitivity of the system to seasonal variations (winter period) has been studied. Hence the most important parameter seems to be temperature inside the biofilter. For all four pilots there is no oxydation when external temperatures, followed by the internal temperatures, become too low. The other parameters impacting on the efficiency of the biofilters have shown to be humidity and structural components.

Considering the observed treatment performance of this type of LFG treatment, it seems delicate to say that active biofiltration can, over a whole year with the different seasons, reach performance rates of 60 to 90% as published in literature. The highest performance has been observed during the summer period, with mean monthly values of about 40 % for 2 pilots.

Recommendations to improve the system have been proposed. They refer to different parts of the system, from the design to the operation. Hence it is important to maintain a minimal temperature inside the biofilter whatever the external weather conditions are (cf. heating of the incoming air and isolating the system) implying in parallel, keeping the filter media in a good state (cf. proportion of structural components and regular mixing of the filter media) as well as maintaining a certain humidity inside the biofilter. Last, a strict and regular monitoring protocol should be respected, similar to the one used within this project, for security reasons and in order to check the performances of the system (cf. state of the surface layer, gas composition, temperature, humidity...).

Sommaire :

1	INTRODUCTION	8
2	PRESENTATION DES BIOFILTRES PILOTES	8
2.1.	Implantation des pilotes	8
2.2.	Présentation des pilotes	8
2.2.1.	Pilotes de taille réduite (Pilotes A-bleu et A-gris)	8
2.2.2.	Pilotes de taille industrielle (Pilote B et Pilote C)	9
2.3.	Rappel des caractéristiques de chaque biofiltre	9
3	PROTOCOLE DE SUIVI	10
3.1.	Mesures et suivi de l'efficacité des pilotes	10
3.2.	Analyses et tests complémentaires	10
3.2.1.	Analyses laboratoires (composts et gaz)	10
3.2.2.	Analyses de l'état de surface	10
3.3.	Tests pour l'amélioration de l'efficacité du pilote (humidité et température)	10
4	PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION	11
4.1.	Chronologie de suivi des pilotes	11
4.2.	L'efficacité d'abattement du méthane	11
4.3.	Abattement du méthane versus production de dioxyde de carbone	14
4.4.	Evolution des températures extérieures et intérieures (biofiltres)	15
4.4.1.	Evolution des températures sur toute la durée du suivi des pilotes	15
4.4.2.	Evolution des températures sur une période de quelques jours	17
4.4.3.	Suivi détaillé de la température interne des pilotes A-bleu et A-gris	18
4.5.	Evolution de l'humidité dans les pilotes A-bleu et A-gris	18
4.5.1.	Mesure de l'humidité par séchage à l'étuve	18
4.5.2.	Mesure de l'humidité par sonde TDR	19
4.6.	Paramètres impactant sur l'efficacité des biofiltres	20
4.6.1.	Impact de la température sur l'efficacité	20
4.6.2.	Impact de l'humidité sur l'efficacité	22
4.6.3.	Présentation de l'impact des saisons sur l'efficacité	22
4.6.4.	Effets de l'injection d'eau	23
4.6.5.	Mise en place de la bande chauffante et brassage de surface	26
4.6.6.	Impacts d'autres paramètres	26
4.7.	Analyse de l'état de surface	26
4.7.1.	Autopsie et utilisation de fumigène	26
4.7.2.	Mesures en surface	29
4.7.2.1.	Mesures d'émissions surfaciques à la chambre de flux	30
4.7.2.2.	Mesures à la caméra infra rouge	31
4.8.	Caractéristiques du compost	33
4.9.	Mesures de gaz au laboratoire	34
5	PROPOSITIONS DE PRECONISATIONS POUR LE PROCÉDE	35
6	CONCLUSIONS GENERALES	36
7	BIBLIOGRAPHIE	38

Liste des photos :

Photo 1 : pilotes A-gris-et A-bleu (à gauche) ; pilote B (au milieu) ; pilote C (à droite).....	9
Photo 2 : état surface de A-bleu	27
Photo 3 : détail de la croûte de A-bleu	27
Photo 4 : état surface de A-gris	27
Photo 5 : détail de la croûte de A-gris	27
Photo 6 : état de surface 29/10/2009 (pilote B)	27
Photo 7 : état de surface 06/04/2011 (pilote B)	27
Photo 8 : état de surface fin février 2010 (pilote C)	27
Photo 9 : état de surface fin mai 2011 (pilote C)	27
Photo 10 : espacements et tassements côté droit (pilote B)	28
Photo 11 : espacements et tassements coté gauche (pilote C)	28
Photo 12 : mesures des tassements (pilote C)	28
Photo 13 : analyse visuelle (pilote C)	28
Photo 14 : fumigène mise en place sur l'alimentation en air (pilote B)	29
Photo 15 : n°1 infrarouge (pilote B)	31
Photo 16 : n°1 de jour (pilote B)	31
Photo 17 : n°2 infrarouge (pilote B)	32
Photo 18 : n°2 de jour (pilote B)	32

Liste des graphiques :

Graphique 1 : évolution de l'efficacité au cours du temps (Pilotes A bleu & A-gris)	11
Graphique 2 : évolution de l'efficacité du pilote au cours du temps (Pilote B)	12
Graphique 3 : évolution de l'efficacité du pilote au cours du temps (Pilote C)	13
Graphique 4 : fréquence des efficacités sur l'ensemble des pilotes	13
Graphique 5 : quantités de CH ₄ consommées et de CO ₂ produites pour le pilote A-bleu)	14
Graphique 6 : quantités de CH ₄ consommées et de CO ₂ produites (Pilote B).....	14
Graphique 7 : évolution de la température extérieure et interne des pilotes A-bleu et A-gris.....	15
Graphique 8 : évolution de la température extérieure et interne (Pilote B)	16
Graphique 9 : évolution de la température extérieure et interne (Pilote C)	16
Graphique 10 : exemple de variations journalières dans pilote A-bleu	17
Graphique 11 : évolution journalière de la température extérieure et interne (Pilote B)	17
Graphique 12 : efficacité et températures intérieures et extérieures au cours du temps dans A-bleu	20
Graphique 13 : efficacité et températures intérieures et extérieures au cours du temps dans A-gris	20
Graphique 14 : évolution des températures et de l'efficacité du biofiltre (pilote B)	21
Graphique 15 : évolution des températures et de l'efficacité (Pilote C)	22
Graphique 16 : différence d'efficacité en fonction des saisons sur l'ensemble des pilotes	23
Graphique 17 : évolution de la température après injection d'eau chaude (pilotes A-bleu et A-gris)	24
Graphique 18 : suivi de l'efficacité au cours du test d'injection d'eau réalisé sur toute la période (pilote B) ..	25
Graphique 19 : suivi de l'efficacité au cours du test d'injection d'eau réalisé dans l'intervalle des deux lignes bleues (pilote C).....	25
Graphique 20 : Evolution de la température extérieure (pilote C)	25

Liste des tableaux :

Tableau 1 : résumé des caractéristiques techniques des pilotes.....	9
Tableau 2 : évolution des taux d'humidité par séchage dans les pilotes A-bleu et A-gris.	18
Tableau 3 : profil des taux d'humidité en septembre 2010 dans A-bleu et A-gris.....	18
Tableau 4 : coefficients r ² des corrélations des efficacités et des paramètres extérieurs par saison	23
Tableau 5 : évolution de l'humidité en % vol avant et après injection d'eau (Pilotes A-gris et A-bleu).....	24

Liste des figures :

Figure 1 : chronologie des suivis de chaque pilote	11
Figure 2 : distribution des flux surfaciques de méthane (pilote B)	30
Figure 3 : distribution des flux surfaciques de CO ₂ (pilote B)	30
Figure 4 : localisation des zones les plus actives du biofiltre (pilote B)	31
Figure 5 : positionnement n°1 de la caméra avec son angle de prise de vue (pilote B)	31
Figure 6 : positionnement n°2 de la caméra avec son angle de prise de vue (pilote B)	32

Liste des équations :

Équation 1 : calcul de l'efficacité	11
Équation 2 : Equation stœchiométrique de l'oxydation de méthane	14

Liste des abréviations

ADEME :	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ATEX :	ATmosphères EXplosibles
CH ₄ :	Méthane
CO :	Monoxyde de carbone
CO ₂ :	Dioxyde de carbone ou gaz carbonique
COV :	Composés Organiques Volatils
DV :	Déchets verts
FEP :	Propylène Fluoré d'Ethylène
FID :	Détecteur à Ionisation de Flamme
FDR :	Frequency Domain Reflectometry
H ₂ S :	hydrogène sulfuré
HCNM :	Hydrocarbures non méthaniques
INERIS :	Institut national de l'environnement industriel et des risques
IR :	infra rouge
ISDND :	Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux
LIE :	Limite Inférieure d'Explosibilité
MO :	Matière Organique
MS :	Matière Sèche
OM :	Ordures Ménagères
PCI :	Pouvoir Calorifique Inférieur
PeHD :	Polyéthylène Haute Densité
Ppmv :	Parties par million par volume
PVC :	Polychlorure de Vinyle
REE :	Riquier Etudes Environnement
SDR :	Software Defined Radio
TDR :	Time Domain Reflectometry
EPDM :	Ethylène Propylène Diène Monomère

1 INTRODUCTION

Le projet biofiltration du biogaz issu des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) s'inscrit dans le programme « Post-Exploitation » soutenu par l'ADEME. Le principal besoin était d'approfondir les compétences techniques et de trouver des solutions performantes dans le traitement du biogaz, au cours de la post-exploitation des installations de stockage de déchets non-dangereux (ISDND). Il a été identifié que la biofiltration pouvait aussi servir dans des cas spécifiques où le contexte environnemental nécessite un captage du biogaz et où le système de traitement conventionnel n'est pas adapté. De manière générale, il s'agit de zones de stockage peu productrices en biogaz, mais aussi et surtout avec de faibles teneurs en méthane (env. < 20 % de CH₄).

Une étude bibliographique a été réalisée par Laurent Riquier (Riquier Etudes Environnement, REE) en 2007 sur le traitement du biogaz d'ISDND par la biofiltration. La biofiltration est une technique biologique ayant fait l'objet de nombreuses applications industrielles pour la dépollution des gaz ou de l'eau. Cette technique consiste à forcer le passage du gaz ou de l'effluent à traiter au travers d'un matériau granulaire sur lequel sont fixés les micro-organismes épurateurs. L'installation est appelée biofiltre. Dans le cas du biogaz, les micro-organismes impliqués ont la propriété d'oxyder le méthane (CH₄). Les bactéries utilisent le carbone du CH₄ comme source d'énergie en utilisant l'oxygène (O₂) présent dans leur environnement. Les produits de la réaction exothermique sont alors du gaz carbonique (CO₂) et de l'eau (H₂O).

Les résultats de cette étude bibliographique ont orienté le choix vers un système de biofiltration actif (incluant une unité de pompage du biogaz) pour des raisons : de gain de place, de rendement, mais aussi de possibilité de suivi des effluents (en amont et en aval du procédé). SITA France, COVED et VEOLIA Propreté ont souhaité se regrouper pour mener un programme de recherche appliqué en France. Il comprend la mise en place et le suivi de quatre pilotes (dont deux de taille industrielle) installés sur trois ISDND françaises. L'objectif final est de mieux appréhender la technique de biofiltration active, son efficacité ainsi que ses limites d'utilisation. Le projet a reçu une subvention de l'ADEME, avec une convention signée en avril 2009.

2 PRESENTATION DES BIOFILTRES PILOTES

2.1. Implantation des pilotes

Quatre pilotes ont été mis en place, dont 2 de taille d'industrielle (SITA et COVED) et dont 2 de taille réduite (VEOLIA Propreté).

Les pilotes de VEOLIA Propreté ont été installés sur le site A en région Sud-Est, le pilote de SITA France sur le site B en région Centre-Est et le pilote de COVED sur le site C en région Centre-Ouest. L'implantation des pilotes correspond donc à des régions différentes de France. Ceci n'est qu'une coïncidence car cela ne faisait pas parti des critères de choix des sites à la mise en place du programme. Ces derniers étaient davantage orientés vers les moyens humains et matériels. Ainsi, bien que les saisons soient moins marquées ces dernières années, on peut considérer que les pilotes aient été testés dans des conditions climatiques quelque peu distinctes (site C : proche climat océanique, site B : proche climat continental et site A : climat méditerranéen) notamment en termes, de température et d'humidité par exemple.

Afin de faciliter la lecture pour le reste de ce rapport, les pilotes sont nommés « pilotes A-bleu & A-gris » (VEOLIA Propreté), « pilote B » (SITA France) et « pilote C » (COVED).

2.2. Présentation des pilotes

2.2.1. Pilotes de taille réduite (Pilotes A-bleu et A-gris)

Les pilotes A-bleu et A-gris sont composés de deux mini-conteneurs remplis d'environ 1,3 m³ d'un mélange composé de 2/3 de compost de déchets verts (DV) et de 1/3 refus d'affinage de DV pour l'un (pilote A-bleu), et de 2/3 compost et de 1/3 copeaux de bois (palettes broyées et autres déchets de bois) pour l'autre (pilote A-gris). Le biogaz utilisé est prélevé directement après le surpresseur de la torchère, d'une capacité de 1500 m³/h. La teneur en CH₄ du biogaz capté sur le site est comprise entre 30 et 45 %, et donc trop importante pour permettre aux populations microbiennes de l'oxyder. Il a alors été décidé de diluer le biogaz avec de l'air ambiant. L'avantage est l'apport constant d'oxygène pour la réalisation de l'oxydation. Aussi, pour des raisons de sécurité, une dilution par 10 a été réalisée afin de se placer en dessous de la Limite Inférieure d'Explosivité : 5 % CH₄ en France. Ainsi, sur la base de l'étude bibliographique (Riquier, 2007), le débit de biogaz injecté compris entre 100 et 120 l/h a nécessité un apport d'air de 0,9 et 1,1 m³/h (pompe et

dispositif d'injection séparé), pour obtenir un mélange proche de 3 à 3,5% de CH₄. La Photo 1 présente les pilotes A-gris et A-bleu.



Photo 1 : pilotes A-gris-et A-bleu (à gauche) ; pilote B (au milieu) ; pilote C (à droite)

2.2.2. Pilotes de taille industrielle (Pilote B et Pilote C)

Les pilotes B et C sont composés d'un conteneur rempli d'un volume de média filtrant d'environ 17 m³. Le mélange pour le cas du pilote C est composé de 2/3 de compost de DV et de 1/3 de refus d'affinage de DV et pour le cas du pilote B de 3/4 de compost (DV et fumier de cheval) et de 1/4 de copeaux de bois (palettes broyées). Les biogaz utilisés pour le test proviennent du réseau de collecte d'une ancienne zone du site. La connexion au réseau est réalisée avec une canalisation 90 mm, d'une longueur de plusieurs mètres, disposée et calée au sol pour la gestion des condensats. La teneur en CH₄ du biogaz capté sur le site C est comprise entre 25 et 35 % pour un débit d'environ 1,7 Nm³/h et sur le site B entre 45 et 55 % pour un débit d'environ 1,2 Nm³/h. Pour les mêmes raisons que précédemment une dilution a été nécessaire, de l'ordre de 15 et de 20 pour les sites de C et B respectivement, pour obtenir un mélange proche de 2 à 2,5 % CH₄. Un surpresseur unique permet l'aspiration du biogaz, son mélange à l'air et l'injection dans le biofiltre. Une couche de matériaux naturels a été mise en place sur une hauteur d'environ 2 mètres autour de la benne pour assurer l'étanchéité, l'isoler des conditions extérieures et permettre un accès plus aisé en partie supérieure. La Photo 1 présente les deux pilotes B et C de taille industrielle.

2.3. Rappel des caractéristiques de chaque biofiltre

Les caractéristiques générales des différents pilotes sont rappelées dans le **Tableau 1**. Les éléments de charge ont été déterminés de manière estimative sur toute la période du projet. Ils montrent globalement par rapport aux volumes qu'ils sont proportionnellement identiques sur l'ensemble des pilotes. On notera que les pilotes A-bleu et A-gris étant moins épais, en raison de leur structure, les surfaces ont du être adaptées pour respecter la charge. Le ratio charge par surface est donc légèrement plus petit pour ces derniers.

Tableau 1 : résumé des caractéristiques techniques des pilotes

Site d'étude	VEOLIA		SITA France	COVED
Echelle du pilote	2 mini-containers (bleu et gris)		Conteneur	Conteneur
Nom du pilote	Pilote A-bleu	Pilote B-bleu	Pilote B	Pilote C
Type de média filtrant	2/3 compost DV + 1/3 refus affinage DV	2/3 compost DV + 1/3 copeaux de bois	3/4compost (DV & fumier cheval) +1/4 copeaux de bois	2/3 de compost DV + 1/3 refus affinage DV
Volume de média filtrant (m ³)	1,3		16,6	17,1
Surface (m ²)	1,6		13,8	14,3
Débit mélange (Nm ³ /h)	1,2		25	25
Teneur CH ₄ (% v/v) mélange	3,5		2	2
Charge/m ³ (g CH ₄ /h/m ³)	22,7		21,6	20,9
Charge/m ² (g CH ₄ /h/m ²)	18,1		25,9	25,0

3 PROTOCOLE DE SUIVI

Le suivi des pilotes a été réalisé à l'aide d'une instrumentation en poste fixe pour des mesures en continu, ainsi qu'à l'aide du matériel portable pour des mesures ponctuelles (fréquence hebdomadaire). De plus, un contrôle régulier à raison, de deux à quatre fois par semaine en fonction des sites a été effectué, porté sur la vérification du fonctionnement et de l'état général des installations.

3.1. Mesures et suivi de l'efficacité des pilotes

Afin d'évaluer l'efficacité d'abattement du CH₄ par les biofiltres, un protocole de suivi a été développé pour obtenir un maximum d'informations :

- Relever la valeur de la pression absolue pour normaliser les débits de gaz.
- Noter les valeurs de débits et vérifier que la quantité d'air injectée est suffisante pour favoriser l'oxydation du CH₄ et pour que les conditions de sécurité soient respectées (<< LIE).
- Mesurer différents paramètres sur les gaz (températures, pressions, teneur en CH₄, CO₂, O₂ et H₂S) et les vitesses en amont et en aval des pilotes. Pour les pilotes A-bleu & A-gris des débitmètres à bille permettaient de connaître directement les quantités d'air et de biogaz. La mesure de la teneur en CH₄ en amont des pilotes devait toujours se faire en premier, pour les raisons de sécurité. déjà évoquées. Toutes modifications ont été consignées dans un cahier de terrain.
- Vérifier la présence éventuelle d'un liquide au point bas des pilotes.

Les paramètres complémentaires sont l'humidité et la température, qui sont mesurés en continu en un point de chaque biofiltre, avec en parallèle le suivi des conditions climatiques par une centrale météorologique. L'acquisition des données est réalisée toutes les heures et une fréquence de téléchargement variable entre les sites (toutes les 2 à 4 semaines). On soulignera que pour les pilotes A-bleu & A-gris, une mesure mensuelle de l'humidité a été réalisée sur toute l'épaisseur du média avec un pas de 10 cm, par une sonde TDR.

3.2. Analyses et tests complémentaires

3.2.1. Analyses laboratoires (composts et gaz)

Pour l'interprétation des résultats des rendements et le comparatif entre les pilotes du programme, des analyses détaillées des composts (type analyses agronomiques : NF-U-44-51) ont été effectuées en laboratoire. Parallèlement à ces analyses, des tests de maturation (SOLVITA) ont été réalisés.

De plus, pour mieux appréhender le rendement des biofiltres, les composés majoritaires ont été mesurés dans les gaz (CH₄, CO₂, O₂ et N₂) et l'analyse d'autres composants a paru indispensable, pour estimer leur impact sur l'environnement (cf. éléments traces).

3.2.2. Analyses de l'état de surface

En fin de programme, il a été décidé de réaliser une autopsie de tous les biofiltres pour observer leur état de surface, en ouvrant la partie supérieure. Pour les pilotes A bleu & gris, il s'agit d'une analyse purement visuelle. Sur le pilote B, des fumigènes ont été utilisés pour détecter d'éventuels passages préférentiels dans le média filtrant. Sur les pilotes B et C, l'existence des passages a été étudiée par la réalisation de mesures surfaciques de flux, en utilisant deux techniques distinctes :

- La chambre de flux pour la mesure des concentrations de CH₄ et l'estimation de la répartition des flux. Ces mesures ont été réalisées par l'INERIS.
- L'imagerie thermique par caméra infrarouge pour détecter les « points chauds » (signes de présence de gaz) sur la surface. Ces mesures ont été réalisées par REE.

3.3. Tests pour l'amélioration de l'efficacité du pilote (humidité et température)

Selon l'étude bibliographique, les deux paramètres principaux et déterminants pour l'efficacité de biofiltres sont l'humidité et la température. En fin de programme, il a été entrepris d'agir sur ces paramètres en réalisant des essais complémentaires, portant sur l'injection d'eau grâce au système d'injection initialement mis en place, et sur l'ajout d'un dispositif de maintien en température (bande chauffante) de l'air puisé à l'extérieur. Pour retrouver l'aspect homogène et initial du média, des campagnes de brassage ont également été organisées sur les pilotes pour apprécier les modifications apportées sur l'efficacité.

4 PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION

4.1. Chronologie de suivi des pilotes

La durée du suivi des pilotes a été d'environ 1,5 an, soit de 14 mois pour le plus court à 19 mois pour le plus long (cf. partie en bleu dans le Tableau suivant). Le suivi des pilotes A-bleu et A-gris a été réalisé de juillet 2009 jusqu'en novembre 2010, celui du pilote B de novembre 2009 jusqu'en mai 2011, et celui du pilote C d'avril 2010 jusqu'en mai 2011.

Années	2009												2010												2011											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pilotes A	■						■						■						■																	
pilote B	■						■						■						■																	
pilote C	■												■												■											

Figure 1 : chronologie des suivis de chaque pilote

4.2. L'efficacité d'abattement du méthane

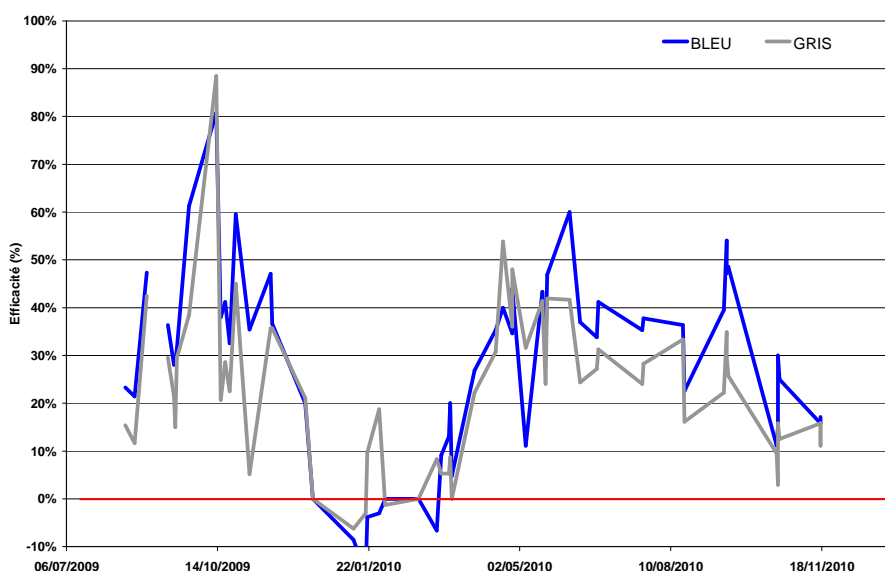
L'efficacité correspond à la proportion de CH₄ rabattue après être passée au travers de chaque biofiltre et est calculée à partir des teneurs en CH₄, mesurées en amont et en aval de l'unité de traitement (cf. Équation 1). Notons que les mesures de débits en amont et en aval de chaque pilote, n'ont pas été prises en compte dans le calcul de l'efficacité. En effet, l'étanchéité parfaite des parties supérieures des biofiltres étant difficilement atteignable, leur introduction dans la formule aurait faussé les résultats.

$$\text{Efficacité} = (\text{CH}_4 \text{ entrée} - \text{CH}_4 \text{ sortie}) / \text{CH}_4 \text{ entrée}$$

Équation 1 : calcul de l'efficacité

Les efficacités d'abattement des quatre pilotes sont représentées dans les Graphiques 1, 2 et 3 ci-dessous et montrent pour l'ensemble des pilotes que :

- Il y a eu des abattements de CH₄
- La première période (quelques jours à quelques semaines) qui a suivi l'injection de gaz semblerait correspondre à un temps de latence de mise en place de la flore bactérienne oxydante du CH₄.
- L'efficacité a évolué fortement au cours du temps
- Des efficacités nulles ou négatives (éventuellement dues aux erreurs de mesure ou à une production de CH₄ dans le système) ont été observées pendant la période hivernale.



Graphique 1 : évolution de l'efficacité au cours du temps (Pilotes A bleu & A-gris)

En qui concerne les pilotes A-bleu et A-gris, 57 mesures de biogaz ont été effectuées pour quantifier l'efficacité de l'oxydation des biofiltres (Graphique 1). En résumé, les courbes montrent que ;

- Pendant le premier mois (juillet 2009) les efficacités pour A-bleu et A-gris étaient comprises entre 21 et 62 % et entre 12 et 42 % respectivement.

- L'efficacité maximale, supérieure à 80 %, a été atteinte en octobre 2009 pour les 2 pilotes (une seule fois).
- Ensuite l'efficacité a chuté progressivement jusqu'à 0 % à la mi-décembre 2009. Ces valeurs sont globalement restées constantes tout l'hiver pour augmenter doucement au début du printemps.
- L'efficacité de A-gris a alors atteint un pic à 54 % en avril 2010 et celle de A-bleu , 60 % en juin 2010.
- **Courant de l'été 2010, les valeurs semblent se stabiliser entre 35 et 40 % d'efficacité pour A-bleu entre 24 et 33 % pour A-gris.**
- En août 2010, il a été constaté que l'efficacité pouvait varier de 10% en une journée.

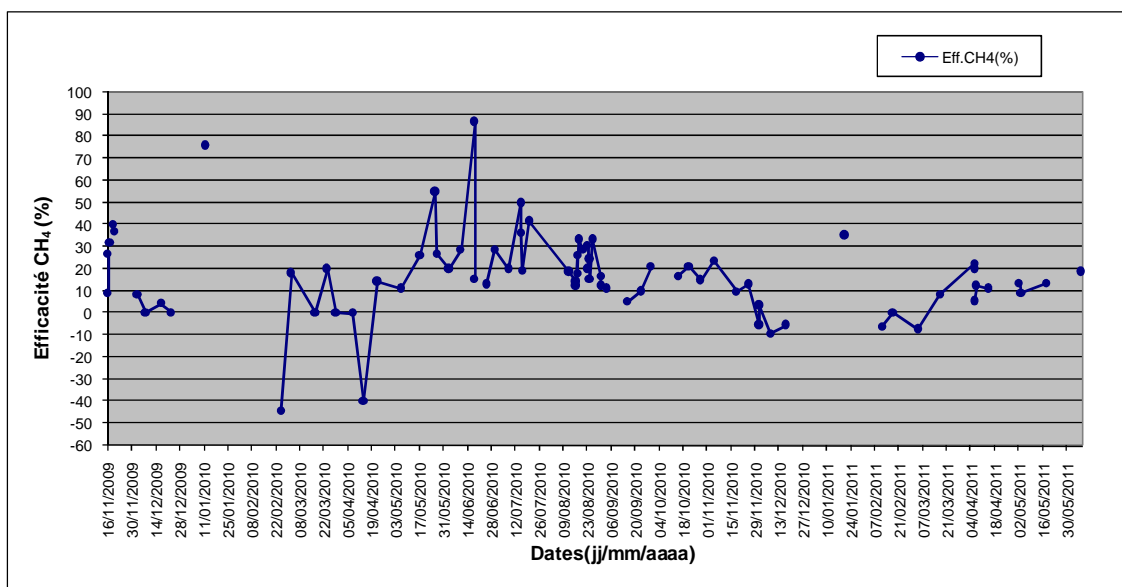
Quant au pilote B, 75 mesures de biogaz ont été effectuées pour quantifier l'efficacité de l'oxydation du biofiltre (Graphique 2). En résumé, les courbes montrent que :

- Pendant le premier mois (mi-nov. à mi-déc 2009), les valeurs d'efficacité ont évoluées de 10 % à des valeurs proches de 40 %.
- Pendant l'hiver l'efficacité du biofiltre a globalement été très faible, avec la plupart des valeurs autour de 0%.
- L'efficacité a augmenté doucement au milieu du printemps pour atteindre une valeur maximale supérieure à 80 % en juin 2010 (cas isolé).
- **Courant de l'été 2010, les valeurs semblent se maintenir entre 10 et 50% avec une moyenne d'environ 20 %.**
- Ensuite les valeurs ont de nouveau baissé pour atteindre des efficacités faibles autour de 0% pendant l'hiver 2010-2011.

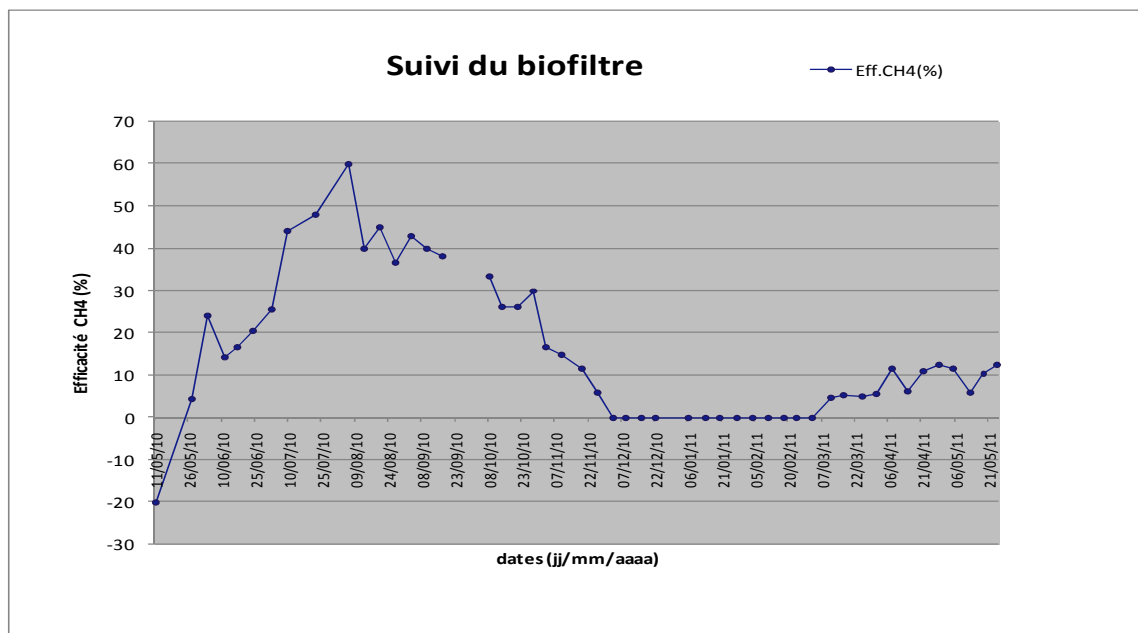
Concernant le pilote C, un total de 49 mesures de biogaz ont été effectuées pour quantifier l'efficacité de l'oxydation du biofiltre (Graphique 3). En résumé, les courbes montrent que :

- Pendant le premier mois (mi-mai à mi-juin 2010), les valeurs d'efficacité ont évoluées de - 20 % à 25 %.
- **Courant de l'été 2010, les valeurs ont pu se maintenir entre 25 et 60 %, avec une moyenne d'environ 40 %.**
- Ensuite les valeurs ont progressivement pour atteindre 0% début décembre 2010, Ces valeurs sont globalement restées constantes pendant tout l'hiver pour légèrement augmenter au début du printemps 2011.

Sur toute la période de suivi de 18 mois, l'efficacité des quatre pilotes de biofiltration n'a jamais atteint des valeurs stables et fortes, hors cas isolé, telles que celles qui étaient envisagées et citées dans la bibliographie de 60 à 90 %. Les valeurs ont fortement chuté à l'approche des périodes hivernales de 2009/2010 et 2010/2011 sur les différents pilotes et sont restées très faibles pendant tout l'hiver.



Graphique 2 : évolution de l'efficacité du pilote au cours du temps (Pilote B)



Graphique 3 : évolution de l'efficacité du pilote au cours du temps (Pilote C)

Un traitement statistique des données issues du suivi a été réalisé sur l'ensemble des pilotes : Les résultats sont présentés en Graphique 4, et sont discutés ci-dessous pour chaque pilote.

Sur les pilotes A-bleu & A-gris :

- **L'efficacité moyenne pour A-bleu est de 29 % ± 19 % et A-gris de 22 % ± 14 %.**

- La moyenne et son erreur standard montre une grande dispersion des valeurs, expliqué par un effet saisonnier (d'où des écarts types aussi importants). Mais l'intervalle de confiance reste raisonnable.

- La médiane et la fréquence des valeurs (Graphique 4) semblent indiquer que les valeurs d'efficacité se trouvent majoritairement entre 40 et 50 % pour pilote A-bleu et entre 30 et 40% pour A-gris.

- Les différences observées entre les pilotes A-gris et A-bleu ne peuvent s'expliquer que par le structurant : même exposition climatique, même composition du mélange de gaz injecté, même conception. Ainsi, le refus d'affinage de déchets verts semble améliorer sensiblement l'efficacité du biofiltre A-bleu.

Sur le pilote B une statistique est réalisée avec 71 valeurs (après avoir retiré 4 valeurs aberrantes) :

- **L'efficacité moyenne est de 16,79 % ± 13 %.**

- La valeur de l'efficacité Z est à ± 13% x Z pour un intervalle confiance de 95 %. La moyenne ne donne pas d'information à cause d'une trop grande distribution des valeurs (d'où des écarts types aussi importants).

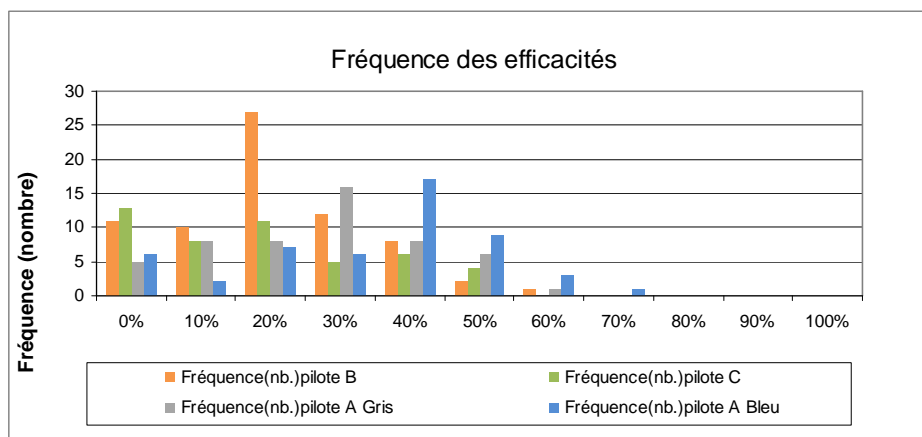
- La médiane et la fréquence des valeurs (Graphique 4) semblent indiquer que les valeurs d'efficacité se trouvent en majorité dans une large plage de 0 à 40 %, avec une dominante à 20 %.

Sur le pilote C, une statistique a été réalisée avec 47 valeurs (après avoir retiré 2 valeurs aberrantes) :

- **L'efficacité moyenne obtenue est de 15.09 % ± 15 %.**

- La valeur de l'efficacité Z est à ± 15% x Z pour un intervalle confiance de 95 %. La moyenne ne donne pas d'information à cause d'une trop grande distribution des valeurs (d'où des écarts types aussi importants).

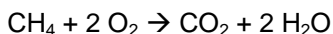
- La médiane et la fréquence des valeurs (Graphique 4) semblent indiquer que les valeurs d'efficacité se trouvent pour la plupart dans une large plage de 0 et 40 %, avec une répartition assez homogène.



Graphique 4 : fréquence des efficacités sur l'ensemble des pilotes

4.3. Abatement du méthane versus production de dioxyde de carbone

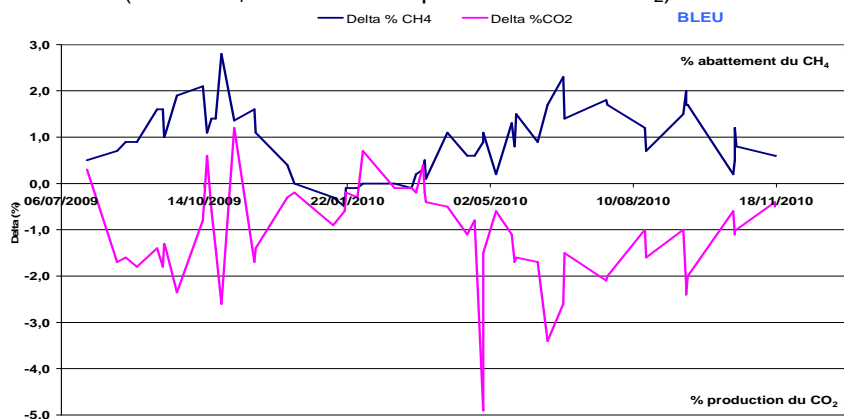
La biofiltration est le processus de rabattement du CH₄ par la production de CO₂. Selon l'équation stœchiométrique (cf. équation 2), pour une molécule de CH₄ consommée, une molécule de CO₂ est produite.



Équation 2 : Equation stœchiométrique de l'oxydation de méthane

Ainsi, la quantité de CH₄ consommée (Delta % CH₄ = CH₄ entrée – CH₄ sortie) doit être équivalente à la quantité de CO₂ produite (Delta % CO₂ = CO₂ entrée – CO₂ sortie). Ces calculs ont été réalisés pour les quatre pilotes et les résultats sont discutés ci-dessous.

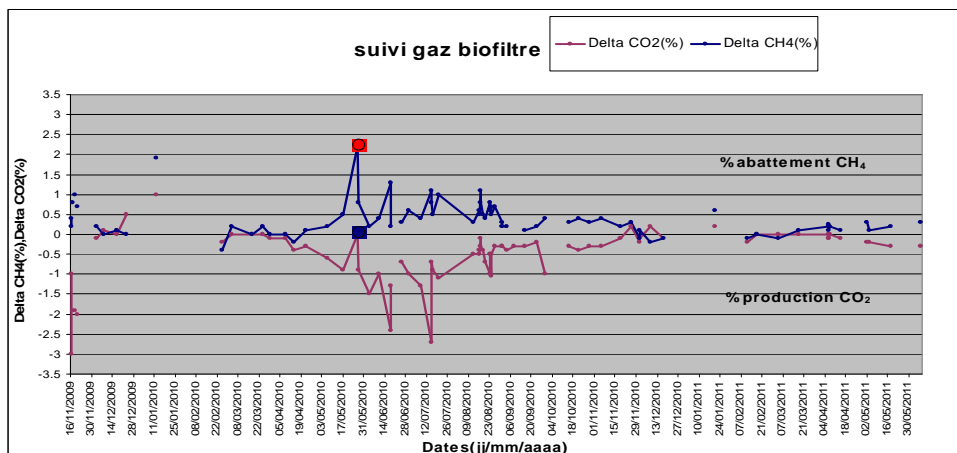
Le graphique suivant présente les résultats pour le pilote A-bleu et montre que globalement, les deux courbes ont des comportements inverses, ce qui prouve bien que lorsque que le CH₄ est oxydé, il y a alors production de CO₂. Cependant entre l'automne 2009 et le début du printemps 2010 les deux courbes ne sont pas ou peu inversées (delta CH₄ inférieur ou supérieur au delta CO₂) :



Graphique 5 : quantités de CH₄ consommées et de CO₂ produites pour le pilote A-bleu)

Si le delta CH₄ est supérieur au delta CO₂, cela signifie que l'abattement du CH₄ a été plus important que la production de CO₂. Il est alors possible de supposer que le CH₄ « disparaisse » par d'autres mécanismes chimiques ou biologiques que l'oxydation du CH₄, comme par exemple une dissolution du CO₂ dans l'eau du matériau. Si le delta CH₄ est inférieur au delta CO₂, la production de CO₂ est plus importante que prévue. Cette production peut provenir d'un effet de compostage du biofiltre (la matière organique (MO) du compost était en début de programme de 445 g/kg de matière sèche). Le refus d'affinage et le bois contiennent également de la MO, qui est cependant moins facilement mobilisable dans le bois, ce qui peut expliquer la différence de comportement entre les pilotes A-bleu (refus d'affinage) et A-gris (bois), à savoir pour A-bleu globalement un delta CH₄ inférieur au delta CO₂, et inversement pour le pilote A-gris.

Les résultats obtenus sur le pilote B, présentés ci-dessous en confirment ceux obtenus sur les pilotes A-bleu et A-gris : Globalement les formes données aux deux courbes sont bien opposées, à l'exception d'un ou deux points, notamment ceux encerclés en bleu et en rouge, qui sont anormalement dans le même sens (cf. abattement important de CH₄ et aucune de production de CO₂).



Graphique 6 : quantités de CH₄ consommées et de CO₂ produites (Pilote B)

En revanche, sur le pilote C, les résultats sont différents car il est rare de trouver un équilibre parfait entre la production de CO_2 et la consommation de CH_4 (les formes données aux deux courbes ne sont pas opposées, sauf en octobre 2010 et fin avril 2011). La vérification de l'abattement de l' O_2 a permis de s'affranchir d'un phénomène éventuel de dilution à l'air en aval. L'explication de l'absence générale de CO_2 constatée en sortie de ce biofiltre, demanderait une expertise complémentaire sur le sujet pour étudier les possibilités d'absorption de cet élément dans un tel milieu.

Sur l'ensemble de ces résultats, il semble donc probable que d'autres mécanismes soient survenus au sein des pilotes expliquant parfois la surproduction ou la sous production du CO_2 par rapport au rabattement du CH_4 .

Le suivi du CO_2 comme indicateur de l'oxydation du CH_4 ne semble pas être une procédure fiable, mais il reste un paramètre important à relever pour la compréhension du fonctionnement du système (phénomène de compostage, adsorption...). Le suivi de la teneur en O_2 apportera de la même manière un complément d'information pour permettre de s'affranchir d'éventuel phénomène intempestif (notamment celui d'une dilution).

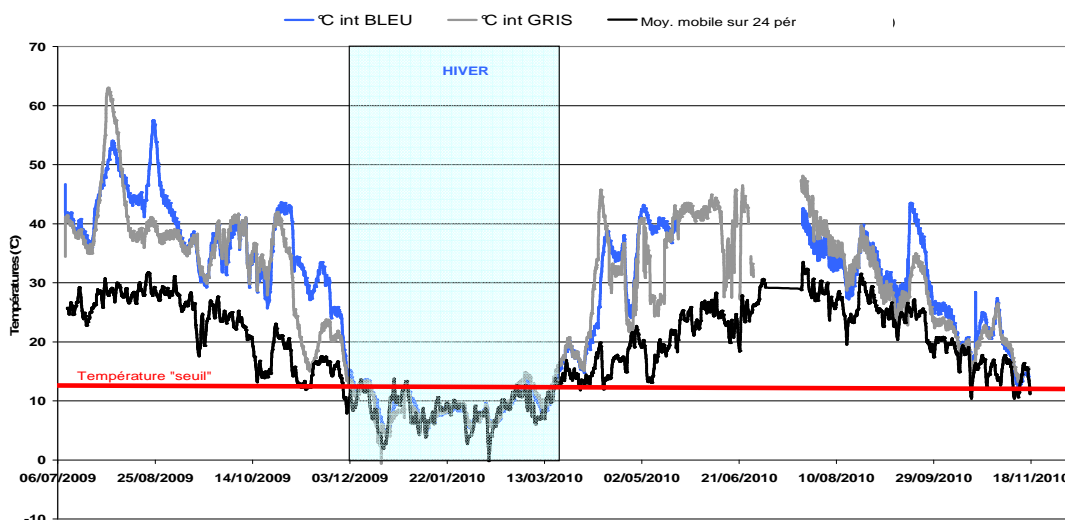
4.4. Evolution des températures extérieures et intérieures (biofiltres)

Au cours du programme, les températures externes et les températures internes des biofiltres ont été suivies sur l'ensemble des pilotes, afin d'étudier l'impact des conditions extérieures sur le biofiltre. Les résultats sont présentés en discutés ci-dessous, d'abord en prenant en compte toute la période de suivi, et ensuite en se focalisant sur une période de quelques jours.

4.4.1. Evolution des températures sur toute la durée du suivi des pilotes

Concernant les pilotes A-bleu et A-gris, la Graphique 7 montrent l'évolution de la température extérieure (courbe de moyenne mobile sur 24 périodes pour lisser les variations journalières) et les températures dans les deux biofiltres. En comparant les données de température extérieure des deux biofiltres, il a été constaté que globalement les deux pilotes ont été exposés aux conditions climatiques de manière identique. Globalement, les deux courbes de températures dans les biofiltres suivent l'évolution saisonnière des températures extérieures exceptées pour certaines périodes ponctuelles.

Au cours de la période estivale, les températures dans les biofiltres étaient généralement comprises entre 30 et 45 °C. L'écart entre la température intérieure et extérieure était alors important et pouvait aller de 15 à 20 °C. Ceci peut éventuellement s'expliquer par l'oxydation du CH_4 qui est une réaction exothermique. En revanche, l'écart marque une chute drastique dès l'approche de la période hivernale, avec des températures extérieures inférieures à 20 °C. Il devient quasiment nul lorsque les températures extérieures passent sous les 10-13 °C (appelé température « seuil »). Cette situation a été observée pendant environ 4 mois. On note durant cette période que les régimes transitoires, marqués par une température interne entre 30 et 20 °C puis entre 20 et 30 °C, sont très brefs (environ 1 mois). Ainsi, malgré le fait que les pilotes soient implantés dans une région de France assez privilégiée pour ses conditions climatiques (cf. climat méditerranéen), on constate qu'il n'a pas été possible de maintenir une température dans le biofiltre supérieure à 30 °C.

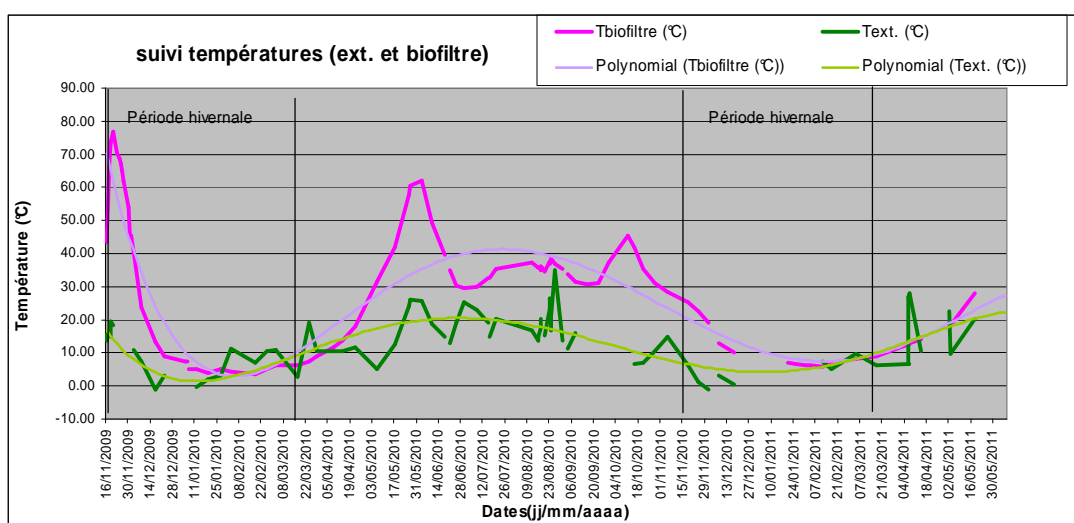


Graphique 7 : évolution de la température extérieure et interne des pilotes A-bleu et A-gris

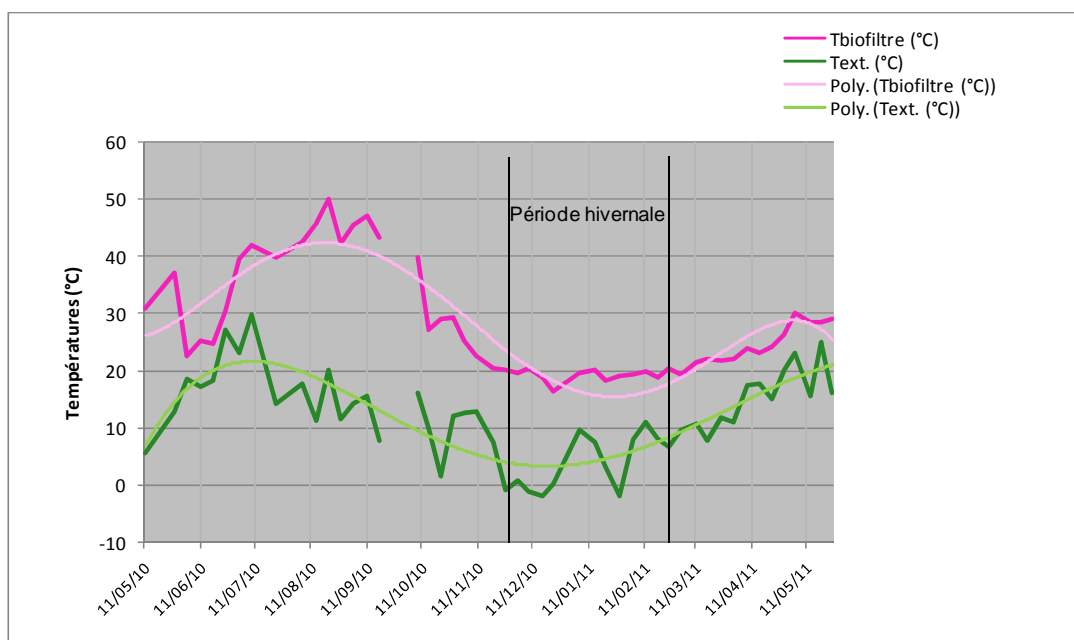
Le Graphique 8 et le Graphique 9 représentent les courbes du suivi de température des biofiltres et de la température extérieure pour les pilotes B et C respectivement et montrent que pour les deux pilotes la température des biofiltres suit étroitement l'évolution de la température extérieure durant la phase de montée de la température extérieure. En revanche, durant la phase décroissante, la température du biofiltre semble marquer une inertie. En se basant sur les courbes de tendance (polynomiales d'ordre 5), le déphasage au sommet serait d'environ un mois pour le pilote B et 2 mois pour le pilote C. Ce maintien en température dans le biofiltre peut être attribué à l'apport calorifique lié à la réaction exothermique d'oxydation.

On observe pour le pilote B, que l'amplitude est quasiment identique pendant les périodes froides alors qu'elle est nettement plus élevée pour le biofiltre pendant les périodes chaudes. Les températures du biofiltre semblent suivre principalement les conditions internes marquées par les différentes réactions biologiques exothermiques qui peuvent être envisagées (oxydation et compostage). La différence de déphasage entre le réchauffement et le refroidissement des températures internes et externes, montrent que les propriétés isolantes (cf. structure et média) interviennent dans une moindre mesure.

Enfin, pour le pilote C, on remarque que les températures dans le biofiltre sont toujours supérieures aux températures extérieures. L'apport calorifique lié à la réaction d'oxydation semble plus important que sur les autres pilotes. Ainsi, le minimum rencontré dans ce biofiltre est de 17 °C pour des températures extérieures négatives contre 0°C pour les pilotes A-bleu et A- gris (petite taille) et 10 °C pour le pilote B.



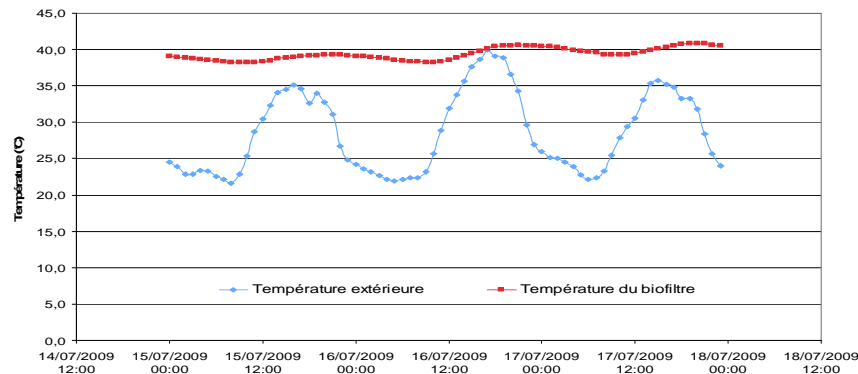
Graphique 8 : évolution de la température extérieure et interne (Pilote B)



Graphique 9 : évolution de la température extérieure et interne (Pilote C)

4.4.2. Evolution des températures sur une période de quelques jours

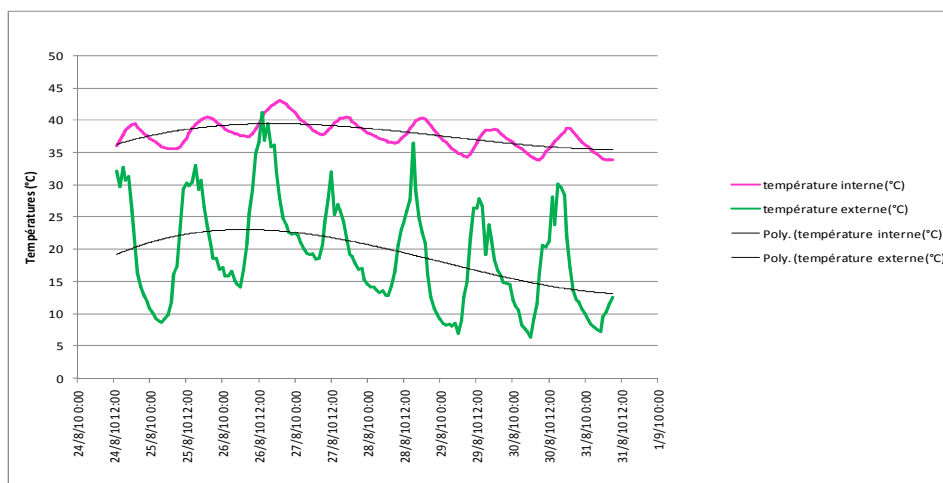
Le graphe suivant retrace le suivi des températures pour le pilote A-bleu (refus d'affinage) sur une de quelques jours.



Graphique 10 : exemple de variations journalières dans pilote A-bleu

Ceci permet de montrer que sur 24h, les variations de températures extérieures sont très importantes (15 à 20 °C) alors qu'elles le sont moins au sein même de s biofiltres (quelques °C). Les variations sont cycliques et journalières avec un décalage de quelques heures (environ 4h) pour les températures dans les biofiltres. Ainsi, il est possible de dire que la température extérieure impacte la température dans le biofiltre au quotidien. Cependant, cette variation reste faible et laisse penser que les matériaux sont isolants.

En ce qui concerne le pilote B, un rapprochement a été établi sur les variations journalières de la température extérieure (liée au jour et à la nuit) et celle interne au biofiltre (cf. graphique 11) sur une période de quelques jours. On peut aussi remarquer que sur la période choisie, les variations de températures extérieures sont très importantes (20 à 25 °C) et à l'identique que pour les pilotes A-bleu et A-gris, les variations internes sont moindres (3 à 5 °C). Les variations sont cycliques et journalières avec un décalage de plusieurs heures (environ 6 h). Ainsi il est possible de dire que la température extérieure impacte la température du biofiltre régulièrement, sur une fréquence quotidienne. Les variations restent a priori assez faibles, probablement liées à l'isolation substantielle du dispositif (média + matériaux terreux en bordure). Toutefois, elles viennent se rajouter aux variations saisonnières de la température, discutées précédemment ainsi qu'aux intermédiaires qui peuvent être hebdomadaires ou mensuelles. En effet, sur le graphique on peut apercevoir une tendance à la baisse sur les plusieurs jours de la semaine prise pour exemple.



Graphique 11 : évolution journalière de la température extérieure et interne (Pilote B)

4.4.3. Suivi détaillé de la température interne des pilotes A-bleu et A-gris

Pour compléter, une analyse détaillée de l'évolution des températures internes a été menée sur les deux pilotes A-bleu et A-gris et a permis d'observer, suite à différents travaux menés sur les dispositifs l'évolution des températures. Avec par exemple :

- le refroidissement des biofiltres après une ouverture des parties supérieures et le réchauffement après leur fermeture avec mise en place de l'étanchéité au niveau supérieur,
- le refroidissement des biofiltres lors de l'introduction d'air extérieur froid (< 15 °C),
- le refroidissement des biofiltres lors de l'arrêt de l'introduction en air extérieur chaud et le réchauffement après son redémarrage, et
- le refroidissement des biofiltres lors de l'arrêt de l'injection en méthane et le réchauffement à sa réintroduction.

A noter qu'un défaut d'étanchéité uniquement apparu sur le pilote A-bleu, a entraîné en début de programme quelques différences sur l'évolution des températures entre les deux pilotes.

4.5. Evolution de l'humidité dans les pilotes A-bleu et A-gris

Cette partie fait l'objet du suivi plus soutenu organisé uniquement sur les pilotes A-bleu et A-gris de plus petites tailles.

4.5.1. Mesure de l'humidité par séchage à l'étuve

Le séchage à l'étuve est basé sur la norme NF ISO 11465. Il permet de connaître le taux d'humidité d'un échantillon. Les valeurs obtenues sont exprimées en % massique. Au début du programme, des échantillons des matériaux des biofiltres ont été prélevés (un échantillon par pilote juste avant le début de l'injection des gaz en juillet 2009 et un autre au cours de l'opération de l'amélioration de l'étanchéité du couvercle en septembre 2009). Les taux d'humidité obtenus ont servi de référence pour la suite du projet. Enfin, un autre prélèvement a été réalisé en fin de programme. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : évolution des taux d'humidité par séchage dans les pilotes A-bleu et A-gris.

	A-bleu	A-gris
08 juillet 2009	39 %	28 %
20 août 2009	34 %	28 %
14 septembre 2010	35 %	39 %

NB : aucun triplicat n'a été fait pour ces manipulations.

On considérera qu'au début du programme l'humidité était homogène dans chacun des biofiltres. Les valeurs du 14 septembre sont en réalité des moyennes de 3 échantillons prélevés en haut, au milieu et en bas de chaque pilote. Les résultats des profils sont présentés dans le Tableau 3. La comparaison entre les taux d'humidité au début et en fin de programme semble montrer deux comportements différents. Ainsi, le taux d'humidité du pilote A-bleu n'a pas évolué au cours du temps, tandis qu'elle a augmenté de plus de 10 % pour le pilote A-gris. Le Tableau 3 montre un gradient du taux d'humidité en fonction de la profondeur. Le biofiltre est plus sec en fond qu'en surface. Ce gradient est le plus important pour le pilote A-bleu, tandis que pour A-gris, le taux d'humidité reste homogène sur toute la hauteur.

Tableau 3 : profil des taux d'humidité en septembre 2010 dans A-bleu et A-gris

	A-bleu	A-gris
0-25 cm	41 %	42 %
25-50 cm	34 %	39 %
50-75 cm	29 %	38 %

NB : aucun triplicat n'a été fait pour ces manipulations.

4.5.2. Mesure de l'humidité par sonde TDR

Une sonde TDR a été utilisée pour suivre l'évolution de l'humidité (% vol.) dans la profondeur de chaque biofiltre. En début de programme on remarque que la distribution de l'humidité dans les biofiltres est assez homogène, notamment pour A-bleu. Puis, en août 2009 pour A-gris et en octobre 2009 pour A-bleu, la distribution change en laissant apparaître 3 zones différentes, jusqu'à l'été suivant : la surface, le milieu et le fond. En juin 2010 pour A-bleu et en juillet 2010 pour A-gris, l'humidité chute dans les 2 pilotes et la distribution redevient plus homogène. Enfin, de programme (septembre 2010), l'humidité des deux pilotes semble à nouveau augmenter.

Les valeurs maximales mesurées se trouvent à chaque fois en haut des pilotes, ce qui comme la bibliographie le stipule, pourrait s'apparenter à la zone où l'oxydation est la plus importante (Roncato -2009). Toutefois, A-gris est plus humide que A-bleu.

- A-gris : l'humidité est généralement autour de 20 % volumique ;
- A-bleu : l'humidité est généralement autour de 16-17 % volumique.

Les 40 cm du fond semblent être une couche des biofiltres qui subissent le moins de variation de l'humidité au cours de l'année. Par contre dans les 50 cm du haut, il semble y avoir des échanges hydriques dépendant des périodes estivales et hivernales. En été, les biofiltres semblent s'assécher et s'humidifier en hiver. Ceci peut sûrement s'expliquer par les variations hygrométriques saisonnières : injection d'air sec en été et humidification et probablement condensation sous le couvercle en hiver.

En poursuivant le comparatif des résultats, il semblerait que A-gris s'humidifie plus rapidement et s'assèche moins rapidement que A-bleu. Ce phénomène est probablement lié à la différence de structurant utilisé. Les copeaux de bois mis en place dans A-gris semblent avoir une capacité d'absorption moins importante que le refus d'affinage, qui lui par contre semble mieux piéger l'humidité.

La moyenne des humidités équivaut au suivi des humidités pour la profondeur de 60 cm, ce qui correspond environ au cœur du massif biofiltrant. Malgré des valeurs maximales plus importantes sur A-gris en période hivernale, la moyenne est plus forte sur A-bleu (7 % vol. contre 5 %). Ceci s'explique par le fait que les écarts entre le fond et le haut de A-gris sont beaucoup plus importants que pour A-bleu. Dans une certaine mesure, l'humidité est donc plus homogène avec du refus d'affinage de déchets verts qu'avec des copeaux de bois. Cependant, A-gris (copeaux) subit moins facilement de variations au sein d'une même couche au cours du temps (valeurs plus stables).

Ainsi, il est important de noter que les variations climatologiques saisonnières (température extérieure et humidité de l'air) influent assez fortement sur l'humidité des matériaux des biofiltres. En effet, on a constaté un dessèchement interne pendant les périodes estivales et une sur-humidification de la surface des biofiltres, probablement due au phénomène de condensation sous le couvercle en hiver. Cette évolution est bien visible sur les profils d'humidité effectués régulièrement avec la sonde TDR. Cependant, les mesures effectuées avec la méthode de l'étuve montrent que les 2 biofiltres A-bleu et A-gris sont restés en de bonnes conditions d'humidité pour l'activité bactérienne. INRS, dans sa fiche oxydation biologique conseille des humidités comprises entre 40 et 60 %. Mais Czepeil et al (1995) ont prouvé qu'il pouvait y avoir une oxydation pour des humidités comprises entre 18 et 51 %.

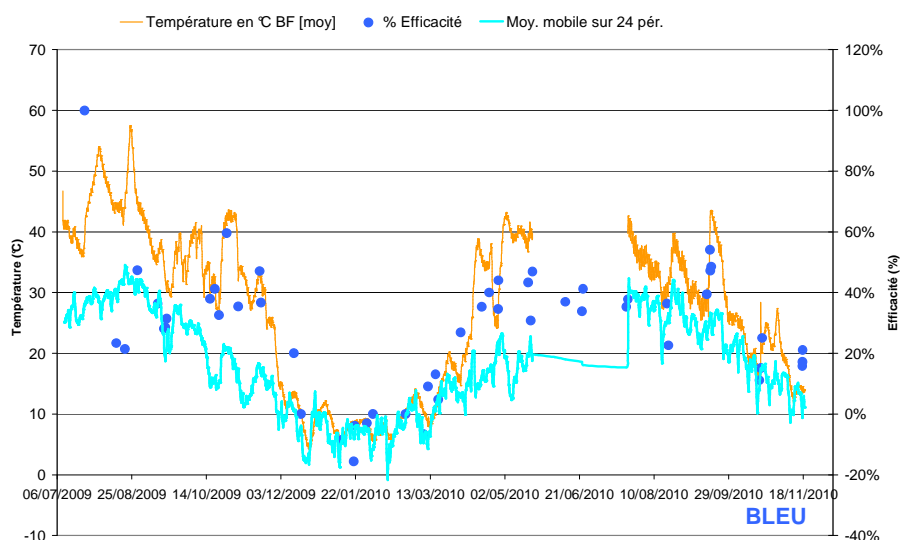
Les variations observées sur ce paramètre confirment l'observation de Straka et al, (2009) qui conseille de réajuster les quantités d'eau dans les biofiltres, surtout en été. Par contre, le pilote A-gris, qui est resté toujours plus humide que A-bleu a montré un rendement moins efficace sur l'abattement du CH₄. Le structurant utilisé joue donc un rôle important car outre les conditions d'humidité, l'efficacité du biofiltre dépend à la fois de la texture et de la densité du matériau, qui conditionne le passage des flux de gaz, stipulé par SCS ENGINEERS, (2008).

4.6. Paramètres impactant sur l'efficacité des biofiltres

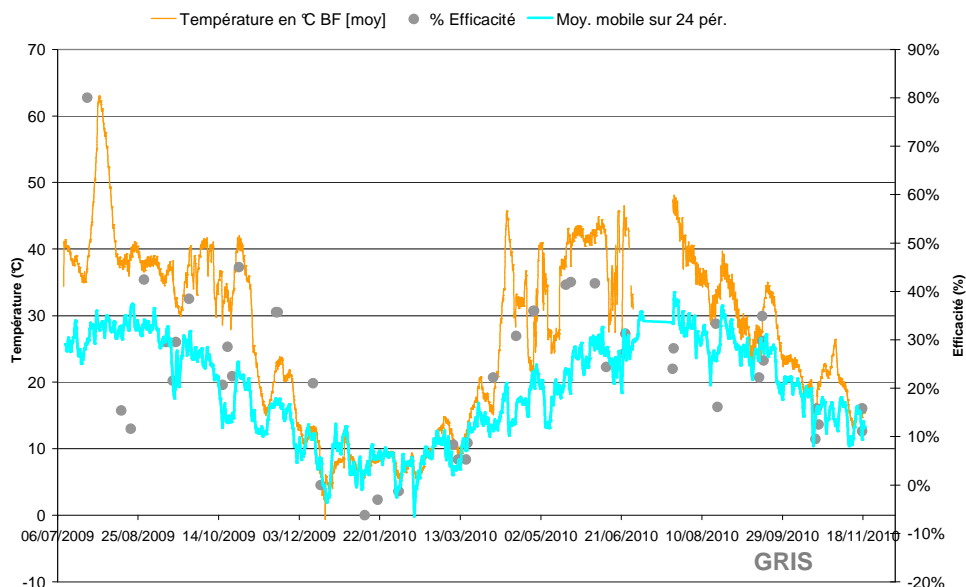
La température est généralement le paramètre le plus cité en littérature suivi du pH, l'humidité, le taux de CH₄ et le taux d'O₂. Dans le cadre de ce programme, il a été vérifié l'influence de ces paramètres sur les pilotes, à l'exception du pH pour des raisons de technicité (ouverture nécessaire des biofiltres).

4.6.1. Impact de la température sur l'efficacité

La température semble être un paramètre important dans l'efficacité et le suivi de l'oxydation (cf. paragraphe précédent). En effet, la réaction produit de la chaleur et les bactéries méthanotrophes ont besoin d'être en conditions optimales pour être actives. Les deux graphiques suivants mettent en parallèle les efficacités des pilotes A-bleu et A-gris respectivement avec les valeurs de températures extérieures et dans les biofiltres.



Graphique 12 : efficacité et températures intérieures et extérieures au cours du temps dans A-bleu



Graphique 13 : efficacité et températures intérieures et extérieures au cours du temps dans A-gris

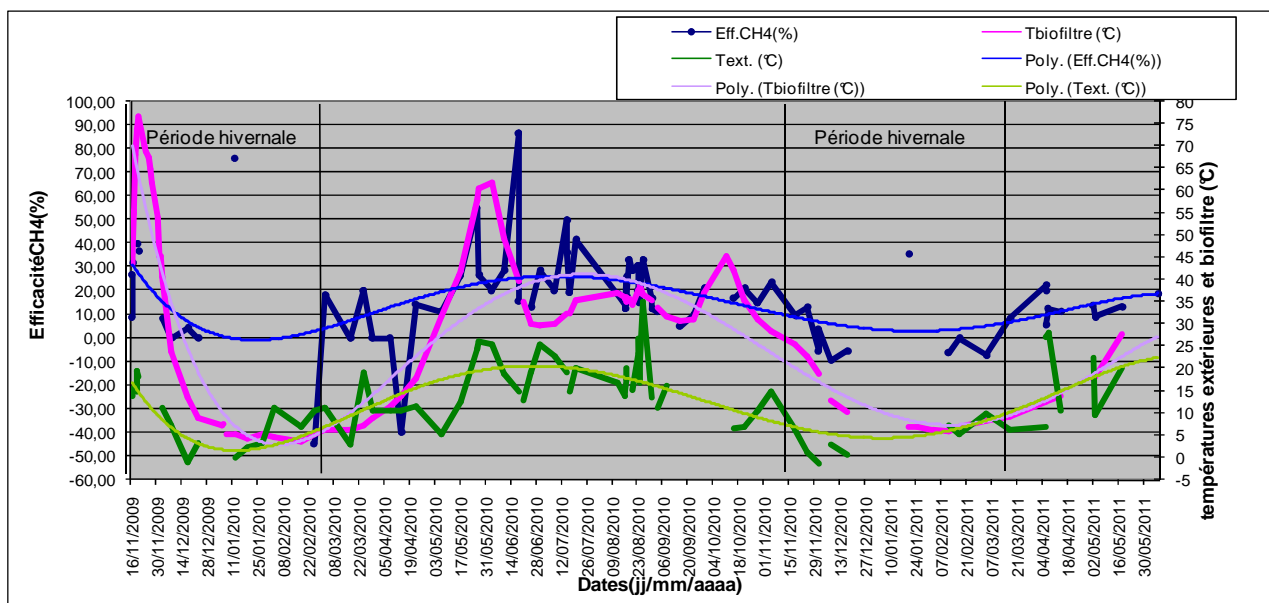
Ces graphiques montrent que les efficacités calculées suivent à la fois les courbes de températures dans le biofiltre et les températures ambiantes. L'efficacité est nulle en hiver quand les températures extérieures sont passées sous 13-15 °C. Il semble que les populations bactériennes n'aient pas pu s'adapter à ces faibles températures quel que soit le pilote (problème d'isolation thermique). L'oxydation se remet en place au printemps. Ensuite, l'écart se creuse entre les températures dans les biofiltres et la température extérieure. C'est lorsque cet écart est le plus important que l'efficacité est apparue à son maximum. **Les efficacités les plus élevées sont observées pour des températures internes voisines de 30 °C à 40 °C.**

Cependant, il apparaît aussi que pendant les périodes de très fortes températures extérieures, associées à des températures internes supérieures à 45 °C, le rendement des biofiltres n'est pas optimum, car comme il a été vu précédemment les matériaux des biofiltres ont été « asséchés » en été.

Afin de vérifier l'influence de la température intérieure sur l'efficacité d'oxydation des pilotes les droites de corrélation ont été réalisées. En supprimant les 4 points aberrants, les coefficients de corrélation montrent que 80 % de l'efficacité de A-bleu est explicable par la température contre 51 % pour A-gris. Ces résultats semblent démontrer l'existence d'autres facteurs influençant l'efficacité d'oxydation des pilotes. L'écart entre les 2 pilotes peut être expliqué par l'utilisation de structurant différent. De plus, certains phénomènes tels que l'ouverture du pilote relançait aussi la production de chaleur (phénomène de compostage), favorisant ainsi l'oxydation du CH₄, (meilleure efficacité).

De la même manière, le coefficient de corrélation a été recherché entre l'efficacité et la température extérieure. En retirant les 4 points aberrants, la température extérieure explique à 52 % et à 49 % l'efficacité respectivement de A-bleu et de A-gris.

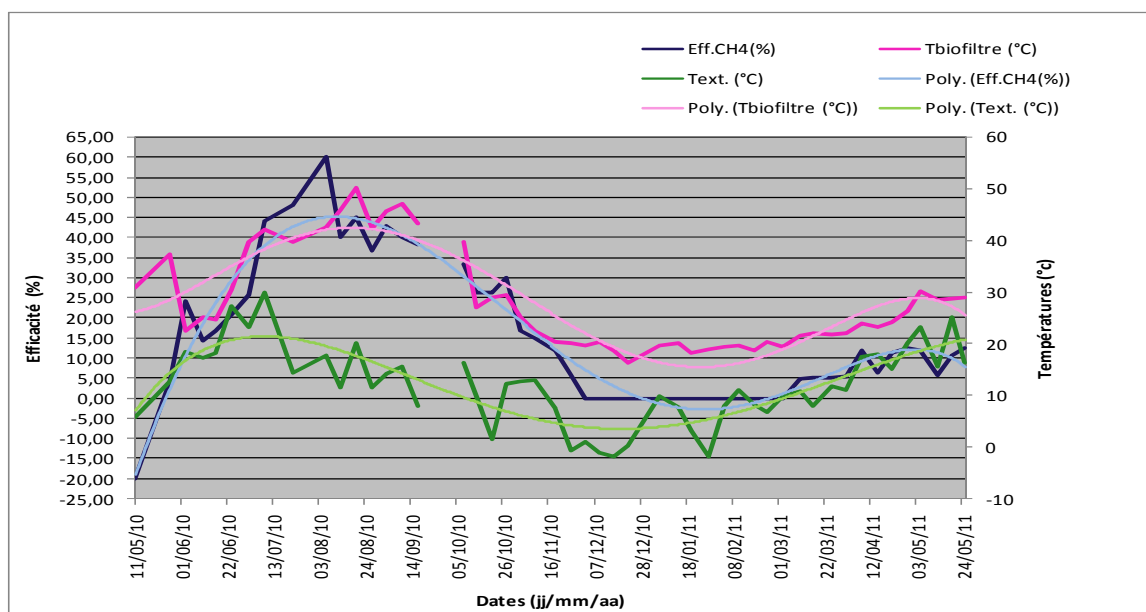
Les Graphique 14 et le Graphique 15 représentent des courbes qui mettent en parallèle les efficacités avec les températures internes et externes, respectivement pour les pilotes B et C. Les températures ont été relevées avec du matériel portable durant les campagnes de mesures.



Graphique 14 : évolution des températures et de l'efficacité du biofiltre (pilote B)

Ainsi, il a été observé une chute systématique des valeurs d'efficacité durant les périodes hivernales et une remontée (moins marquée pour pilote C) durant les saisons intermédiaires (printemps et automne pour pilote B et printemps pour pilote C). On note que durant les périodes d'oxydation, la température des biofiltres peut atteindre un écart de 20 °C avec la température extérieure. L'efficacité, à l'identique de la température interne, suit étroitement l'évolution de la température extérieure durant la phase de montée. Durant la phase décroissante de la température extérieure, l'efficacité et la température interne marquent une certaine inertie. La température extérieure doit être supérieure à 15 °C pour le pilote B contre 10 °C pour le pilote C. pour commencer à observer le phénomène d'oxydation. **Et les efficacités les plus élevées ont été mesurées pour des températures internes comprises entre 30 et 45 °C pour le pilote B et 40 °C pour le pilote C.**

Pour le cas du pilote B, la droite de corrélation a été réalisée en supprimant 4 points aberrants et montre que L'efficacité du biofiltre B n'est expliquée qu'à 39 %. Il y a donc d'autres facteurs influençant l'efficacité d'oxydation de ce système. En ce qui concerne le pilote C, la droite de corrélation a été établie en supprimant 2 points aberrants, et montre que l'efficacité de ce biofiltre peut s'expliquer à 84 % par les conditions de température intérieure.



Graphique 15 : évolution des températures et de l'efficacité (Pilote C)

En conclusion, La température au sein du biofiltre reste un paramètre fondamental. L'absence d'isolement thermique sur les pilotes A-bleu et A-gris mais aussi et surtout l'alimentation directe en air extérieur sur l'ensemble des pilotes du programme a montré qu'en hiver une trop faible température (<10/15 °C) inhibe l'activité bactérienne et que l'efficacité est directement liée aux variations de températures saisonnières. **Au-delà de ces valeurs (>10/15 °C), on constate un phénomène de production de chaleur qui est vraisemblablement liée à la réaction d'oxydation.**

Ainsi, le suivi en continu de la température permettra de fournir une indication concernant l'activité bactérienne et donc indirectement, de l'efficacité du dispositif. L'efficacité sera optimale (30 à 50 %) dans ce programme pour une fourchette de température interne comprise entre 30 °C à 45 °C. Au-delà de cette fourchette, l'efficacité semble redescendre. Le paramètre de la température reste primordial, mais n'est probablement pas le seul à impacter l'efficacité.

4.6.2. Impact de l'humidité sur l'efficacité

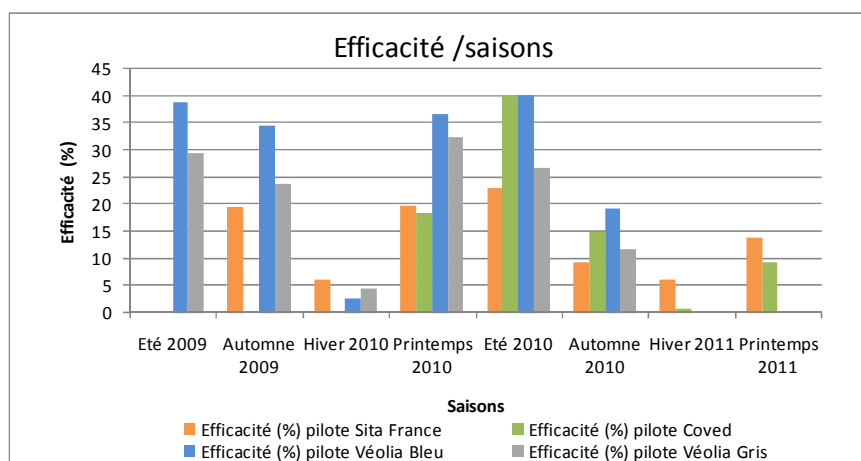
Dans le biofiltre, il existe différentes sources d'apports d'eau :

- une alimentation par le mélange gazeux : biogaz et air ambiant dont l'hygrométrie varie quotidiennement ;
- l'oxydation du méthane est une réaction chimique qui produit des molécules d'eau ;
- l'eau intrinsèque du matériau.

Pour le cas des pilotes A-bleu et A-gris, il a tout d'abord été regardé l'influence de l'hygrométrie de l'air injecté (suivi en continu avec une sonde résistive) sur l'efficacité. Les coefficients de corrélation pour A-gris et A-bleu sont très faibles (< 0,1). Selon la bibliographie, l'humidité des matériaux est l'autre paramètre important dans l'efficacité du biofiltre. Le coefficient de corrélation entre l'efficacité d'oxydation en fonction de l'humidité moyenne relevée par la TDR est pratiquement nul. **Il ne semble donc pas y avoir de lien direct entre l'humidité (dans la gamme de valeurs mesurées dans les biofiltres) et l'efficacité de l'oxydation.**

4.6.3. Présentation de l'impact des saisons sur l'efficacité

Un rapprochement de l'ensemble des résultats de l'efficacité d'abattement du CH₄ a été réalisé avec les saisons (cf. graphique 16). Pour l'ensemble des pilotes, la période estivale, notamment en 2010, semble être la plus propice et les périodes hivernales les plus défavorables. Pour les pilotes B et pour les pilotes A-bleu et A-gris, l'automne 2009 et le printemps 2010 sont aussi des périodes où les efficacités ont été plus élevées.



Graphique 16 : différence d'efficacité en fonction des saisons sur l'ensemble des pilotes

Pour compléter, la comparaison des coefficients r^2 des corrélations des efficacités en fonction des paramètres suivis (humidité, température interne et externe) par saison a été établie pour les pilotes A-bleu et A-gris. Elle permet de constater que les coefficients élevés, observés sur A-bleu (entre 0,8 et 0,9), concernant la température interne et externe, ne sont pas retrouvés l'année suivante. Ceci pourrait s'expliquer par la mise en place des passages préférentiels au sein du média, d'ailleurs peut être plus vite présents dans le biofiltre A-gris. Les résultats sont globalement meilleurs pour le biofiltre A-bleu que pour le biofiltre A-gris à l'exception de l'hiver 2010. On remarque que d'une manière générale, la corrélation avec le facteur d'humidité est beaucoup moins forte que celle obtenue avec la température.

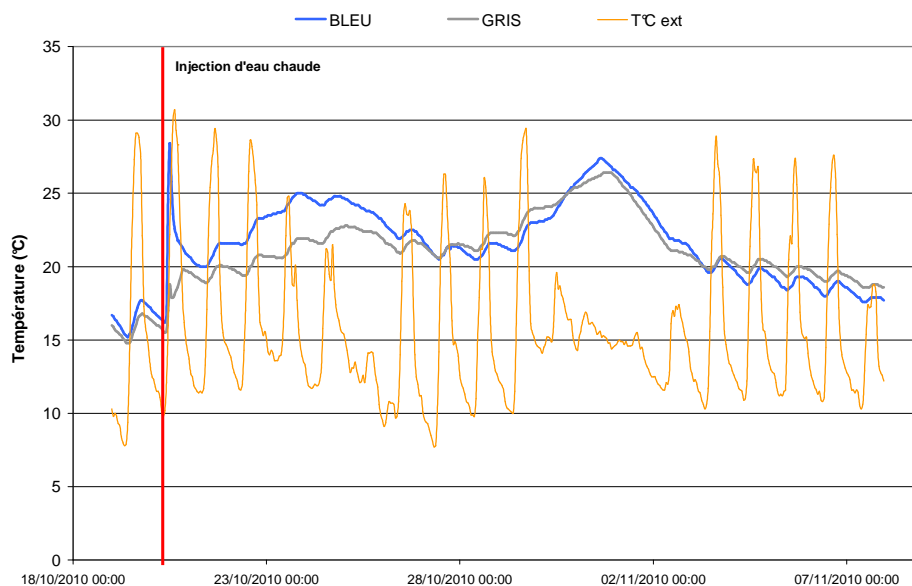
Tableau 4 : coefficients r^2 des corrélations des efficacités et des paramètres extérieurs par saison

	Humidité extérieure		Température interne		Température extérieure	
	A-bleu	A-gris	A-bleu	A-gris	A-bleu	A-gris
été 2009	0,22	0,52	0,799	0,19	0,91	0,91
automne 2009	0,52	0,08	0,9	0,44	0,93	0,56
hiver 2009	0,07	0,05	0,35	0	0,19	0,1
printemps 2010	0,07	0,0048	0,26	0,01	0,28	0,003
été 2010	0,34	0,09	0,48	0,03	0,14	0,023
automne 2010	0,07	0,17	0,4	0,02	0,08	0,005

4.6.4. Effets de l'injection d'eau

Pour vérifier l'impact de l'humidité sur l'efficacité, il a été décidé d'injecter de l'eau dans les pilotes. Pour le cas des pilotes A-bleu et A-gris, la quantité d'eau à utiliser a été calculée à partir des taux d'humidité déterminés par séchage à l'étuve, dans les biofiltres avant injection. Les humidités ayant augmenté par rapport au début du programme, il a donc été décidé d'ajouter environ 2-3 % d'eau (en volume) dans chacun des massifs (A-bleu 2,6 % et 2,3 % pour A-gris), ce qui correspond à un volume de 20 litres par pilote. Ce dosage est préconisé par Straka et al (2009), à raison de 2-3 fois par an et a été repris pour l'ensemble des pilotes.

A l'approche de l'automne, il a été décidé d'injecter de l'eau chaude à 40-50 °C dans les pilotes A-bleu et A-gris pour ne pas refroidir les biofiltres. Les sondes de suivi de température ont permis de constater que l'impact était immédiat. Cet essai d'injection s'est déroulé pendant la phase saisonnière ou la température dans les biofiltres à tendance à s'équilibrer avec les températures extérieures (15-17 °C). Suite à cette phase d'injection, les enregistrements de températures montrent deux pics d'augmentation de températures et ceci malgré une baisse des températures extérieures, le 23 et 31 octobre 2010.



Graphique 17 : évolution de la température après injection d'eau chaude (pilotes A-bleu et A-gris)

Bien que le second pic de chaleur ait été probablement stoppé par un arrêt électrique du 1 novembre 2010 (arrêt d'injection des gaz pendant 2 semaines), il est raisonnable d'attribuer cette montée en température par une reprise de l'activité bactérienne. L'injection semble donc avoir eu rapidement un effet positif sur l'oxydation, puisque les températures ont augmenté dans les biofiltres. Cependant, il n'est pas possible de vérifier cet effet, sur le long terme. L'impact de l'injection sur l'humidité du matériau à l'intérieur du biofiltre a pu être mesuré avec les profils TDR.

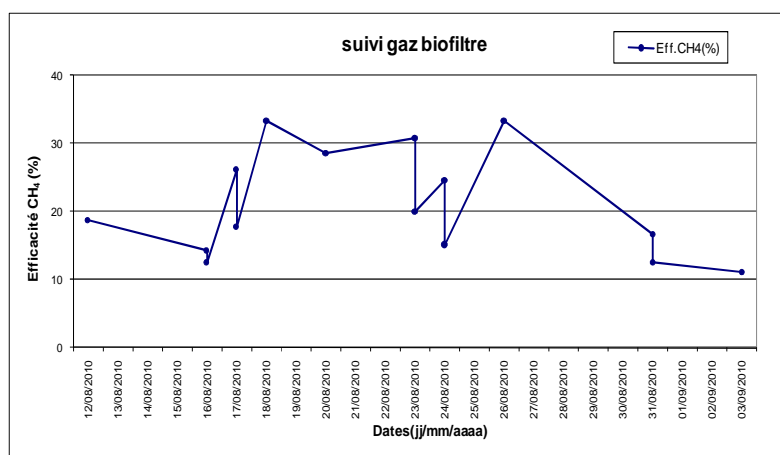
Tableau 5 : évolution de l'humidité en % vol avant et après injection d'eau (Pilotes A-gris et A-bleu)

	A-gris		A-bleu	
	19/10/2010	20/10/2010	19/10/2010	20/10/2010
40 cm	8,1% ± 1,5%	8,1% ± 0,9%	3,6% ± 0,2%	6,5% ± 1,0%
50 cm	6,3% ± 2,5%	5,7% ± 1,4%	8,2% ± 0,7%	10,4% ± 1,0%
60 cm	0,0% ± 0%	2,5% ± 0,7%	6,5% ± 1,2%	10,4% ± 2,1%
70 cm	0,0% ± 0%	1,9% ± 0,9%	0,5% ± 0,3%	5,9% ± 0,6%
80 cm	0,1% ± 0,2%	4,0% ± 0,6%	0,0% ± 0%	3,6% ± 0,4%
90 cm	1,7% ± 0,1%	4,9% ± 0,4%	0,0% ± 0%	4,6% ± 0,5%

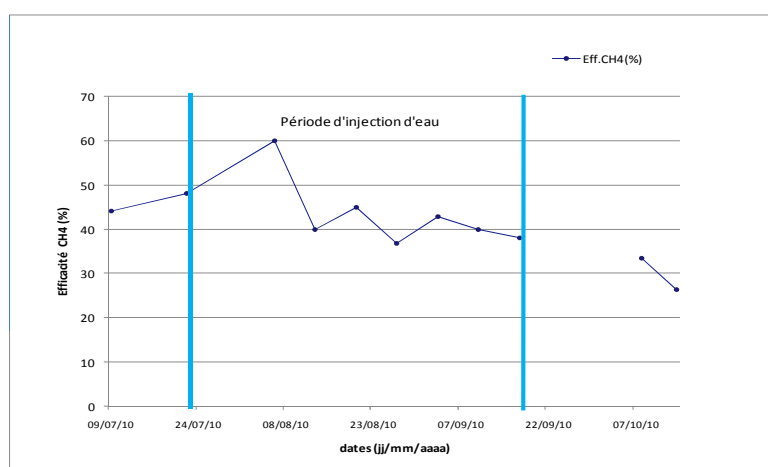
En comparant les deux profils d'humidité avant et après injection, il est possible de voir qu'il y a eu une évolution positive et surtout une meilleure homogénéisation sur toute la hauteur des deux biofiltres.

L'injection d'eau chaude a donc eu un impact sur les conditions d'humidité et de température sur les matériaux. En revanche, les pannes électriques ont empêché d'effectuer les mesures permettant de calculer l'efficacité d'oxydation.

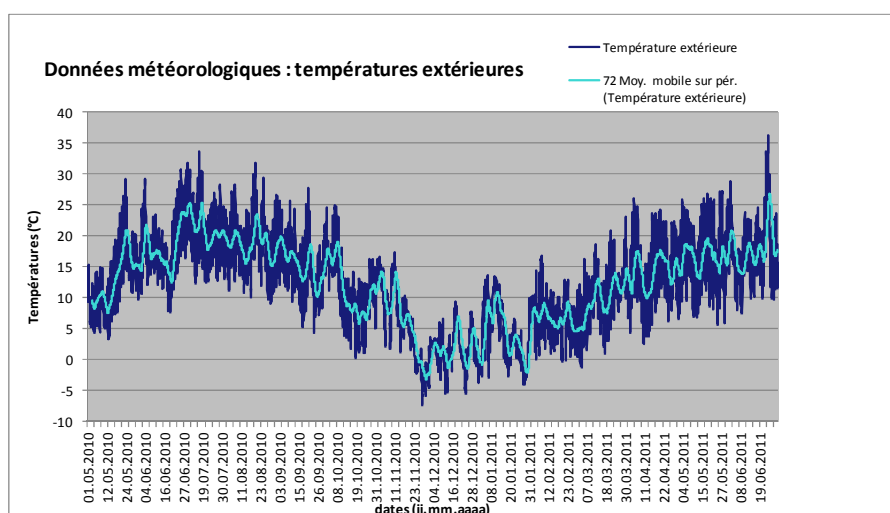
Pour les pilotes B et C, l'ensemble des injections ont été effectuées en milieu de journée en période estivale (respectivement août 2010 et juillet 2010), avec de l'eau tempérée mais non chauffée pour éviter les chocs thermiques. On note sur la courbe du Graphique 18, que peu de temps après les premiers tests d'injection d'eau effectués sur le pilote B, l'efficacité est remontée d'environ 15 % (de 15 à 30 %). Cette augmentation remarquée est donc restée très modeste, malgré l'injection d'eau organisée régulièrement jusqu'au mois de septembre 2010. Des chutes des efficacités d'abattement du CH₄ ont même été observées durant cette même période. A noter que lors de l'autopsie du biofiltre, des détériorations du système d'injection et des signes d'une répartition hétérogène de l'eau sur la surface ont été observés. Pour le pilote C, l'efficacité est de la même manière remontée d'environ 12% (de 48 à 60 %) pour se maintenir ensuite autour de 40 % et chutée drastiquement en fin de période de test (cf. Graphique 19). Cette baisse pourrait être liée à la chute de la température extérieure apparue en fin de période estivale (cf. Graphique 20).



Graphique 18 : suivi de l'efficacité au cours du test d'injection d'eau réalisé sur toute la période (pilote B)



Graphique 19 : suivi de l'efficacité au cours du test d'injection d'eau réalisé dans l'intervalle des deux lignes bleues (pilote C)



Graphique 20 : Evolution de la température extérieure (pilote C)

Ces différents essais menés sur les quatre pilotes montrent que l'injection d'eau a eu un impact positif sur l'efficacité. Il reste malgré tout modéré, avec une augmentation d'environ + 15 % (cf. essais pilotes B et C). D'autre part, aucun impact n'a été constaté quand les conditions extérieures étaient au même moment défavorables (cf. baisse de la température extérieure).

4.6.5. Mise en place de la bande chauffante et brassage de surface

Un système de chauffage a été installé et mis en service les pilotes A-bleu et A-gris (septembre 2010) et pour le pilote B (06/04/2011) Mais pour les premiers, l'impact du chauffage de l'air n'a pas pu être vérifié à cause des coupures fréquentes d'électricité. Par ailleurs un brassage manuel de surface a été effectué en septembre 2010 pour ces mêmes trois pilotes lors des l'autopsies. Ce brassage a consisté à casser et broyer la strate observée de matériaux, et de mélanger et redistribuer de manière homogène les 20 premiers centimètres à la surface des biofiltres. Après cette opération, il a été constaté sur les pilotes A-bleu et A-gris une montée en température (immédiat pour A-bleu et après quelques jours pour A-gris), comme cela avait été le cas lors de la première ouverture des pilotes. Il est possible d'attribuer cette augmentation de température soit à un phénomène de compostage, soit au phénomène d'oxydation du CH₄. L'ensemble des travaux réalisés (maintien température et brassage) n'a d'après le suivi pas apporté d'amélioration significative sur l'efficacité. Au contraire, on note même une chute de 22 % à 5 % le 6/04/2011 pour pilote B. On souligne que le matériel utilisé (bande chauffante) a malheureusement été testé durant le printemps 2011, exceptionnellement chaud (cf. pointe de température 32 °C la journée durant l'essai) et n'a par conséquent pas permis de montrer son intérêt pour l'oxydation, qui était de maintenir la température durant les conditions météorologiques froides.

Pour le pilote C, la mise en place d'une bande chauffante sans protection isolante, n'a pas permis d'élever suffisamment la température du gaz, pour provoquer un changement significatif sur les caractéristiques de fonctionnement (cf. température interne, efficacité..).

4.6.6. Impacts d'autres paramètres

Il a aussi été recherché l'impact d'autres paramètres suivis sur l'efficacité du système ; les variations de pression atmosphérique, les débits injectés, les concentrations d'oxygène et de méthane en entrée du procédé. Aucune corrélation n'a pu être mise en évidence.

4.7. Analyse de l'état de surface

4.7.1. Autopsie et utilisation de fumigène

A l'ouverture des deux biofiltres A-bleu et A-gris, une autopsie de l'état de surface a été réalisée. D'importants tassements ont pu être observés. Ainsi, pour A-bleu le matériau biofiltrant se serait tassé d'environ 25 % (21,5 cm sur les 85 cm initial) et pour A-gris, le tassement était de 18 % (15 cm sur les 85 cm initial). Un large retrait en périphérie du container a été mesuré (2 à 3 cm), induisant d'importants passages préférentiels du gaz le long de la paroi et peut expliquer pourquoi les taux d'oxydation ne sont pas très bons. Ce retrait n'a pas pu être vérifié sur la hauteur totale du média.

Il a été aussi observé une croûte en surface, par endroit fissurée (Photo 3). Il a donc été décidé d'autopsier la surface des pilotes afin de mieux observer cette croûte. Il s'agissait d'une croûte minéralisée de 5 à 10 cm d'épaisseur sur toute la surface des pilotes, fortement indurée (difficilement cassable à la main) et stratifiée (Photo 2, Photo 3, Photo 4 et Photo 5). Cette stratification plus visible pour le pilote A-bleu avait un dégradé de couleur de bas en haut : du ocre-rouge vers le gris. C. Roncato (2009) a observé cette même stratification « avec la présence des contours rouges autour des grains de sol localisés aussi à la profondeur de 10 cm ». Il s'agirait d'un marqueur de flux de CH₄ élevé et de taux d'oxydation aussi élevés. Humer et Lechner (2001b) ont eux aussi observé « la formation d'une bande rouge-orange avec une intense vaporisation à la profondeur de 15 cm après 3 semaines d'essai ». Ils ont identifié cette bande comme un horizon d'oxydation de méthane. La couleur rouge des 10 premiers centimètres serait due à l'oxydation des métaux, comme par exemple des résidus ferreux présents dans le sol, et montre que cette zone a eu une riche activité d'oxydation ». Cependant, l'analyse du compost ne montre pas la présence de fer. Cette strate rouge a été visualisée uniquement sur le pilote A-bleu ce qui corrobore les résultats d'efficacité, à savoir A-bleu est plus performant que A-gris. Dans le cadre de notre programme, le phénomène de stratification de la surface des pilotes au cours du temps peut aussi expliquer la différence de rendement de l'efficacité sur une même période pour l'année suivante. Straka et al (2009) ont observé des « clogs » bactériens de coloration gris, en été, sur des pilotes non humidifiés, en République Tchèque. Ce développement bactérien est généralement surfacique (10-30 cm). Présent en hiver sous une forme gélatineuse, il n'influe pas sur l'efficacité des biofiltres. En revanche, en été avec la perte en eau, il s'assèche et se solidifie dans les pores, ce qui limite le passage d'un flux de gaz régulier. Il est donc conseillé d'ajouter de l'eau 2-3 fois par an et de renouveler la couche oxydante une fois tous les 3 ans. Il est aussi possible d'envisager qu'il ait eu une cristallisation de certains minéraux en surface par le phénomène de condensation. D'importantes condensations d'eau ont été en effet observées en sortie des cheminées des pilotes.



Photo 2 : état surface de A-bleu



Photo 3 : détail de la croûte de A-bleu



Photo 4 : état surface de A-gris



Photo 5 : détail de la croûte de A-gris

Sur les pilotes B et C, les autopsies ont été effectuées réciproquement le 6/04/2011 et le 31/05/2011 en début d'après midi après le démontage de la partie supérieure ; débâchage et évacuation des deux couches de palettes sur le premier pilote. D'importants tassements ont été remarqués grâce aux écarts mesurés entre les marques prévues à cet effet lors du remplissage et la surface du biofiltre relevée lors de l'autopsie. Ils sont compris **entre 15 et 30 centimètres soit 22,5 centimètres en moyenne pour les 2 pilotes.**



Photo 6 : état de surface 29/10/2009 (pilote B)



Photo 7 : état de surface 06/04/2011 (pilote B)



Photo 8 : état de surface fin février 2010 (pilote C)



Photo 9 : état de surface fin mai 2011 (pilote C)

Aussi, pour le pilote B, des espacements ont été observés sur les bordures intérieures du conteneur ; entre le media filtrant et la paroi intérieure du conteneur. Ils sont compris **entre 1 et 4 centimètres, soit 2,5 centimètres** en moyenne. **Les plus importants ont été mesurés sur les deux bordures longues du conteneur.** Tandis que pour le pilote C, très peu d'espacements ont été observés entre les bordures intérieures du conteneur et le media. La matière semble relativement bien en contact avec les parois métalliques du conteneur.



Photo 10 : espacements et tassements côté droit (pilote B)



Photo 11 : espacements et tassements côté gauche (pilote C)



Photo 12 : mesures des tassements (pilote C)



Photo 13 : analyse visuelle (pilote C)

La surface du pilote B reste dans l'ensemble assez compacte, marquée par endroit par les structures en bois des palettes, contrairement au pilote C où la surface reste dans l'ensemble homogène et très semblable à celle de son origine. Des dépôts blanchâtres pour le pilote B (parfois jaunâtres sur les palettes) sont observés un peu partout sur les premiers millimètres, à la surface du media, alors qu'ils sont absents pour le pilote C. Ils semblent correspondre à un développement de champignons (rejoint la qualité de surface des pilotes A-bleu et A-gris). Pour le pilote B, on notera en surface des zones plus sombres et plus humides probablement liées à l'injection non homogène (en bout de lignes du réseau d'injection eau) et aussi au point de retour des eaux de condensation (à l'aplomb de la cheminée située au centre du conteneur). Sur l'ensemble des biofiltres, le média marqué par des teintes plus claires en surface, semble sec. Mais, la couche d'éléments qui lui donne cet aspect reste assez fine. En effet, après le grattage de quelques centimètres, le media redevient rapidement foncé et plutôt humide pour les pilote B et C (apparence terreuse avec la présence de quelques lombrics pour ce dernier). Lors du brassage, après les premiers coups de pioche, on note sur les biofiltres, la présence d'une strate d'environ 20 centimètres (soit environ 20 % de la hauteur totale du media après tassements) homogène, lourde, sans être durcie (contrairement aux deux pilotes A) et qui se détache facilement du reste de l'épaisseur du media. Cette strate est toutefois moins

marquée pour le pilote C. En plus des espacements observés entre la paroi lisse du conteneur et le média, ce phénomène de couche peut lui aussi favoriser les passages préférentiels sur les côtés (coins et bordures). Par ailleurs, cette couche réduit la hauteur effective du média filtrant. Cette description rejoint celle faite pour les pilotes A-bleu et A-gris. Enfin pour les 4 pilotes, il a été observé qu'en surface les structurants étaient davantage présents. On suppose que les eaux de condensations présentent en surface, notamment durant les premières périodes ont favorisé lors de leur infiltration, le déplacement des particules fines vers le bas pour former cette couche en partie supérieure. Elles provoqueraient ainsi le phénomène de stratification en partie haute du média.

Sur le pilote B, il a été testé la détection des passages préférentiels par l'utilisation de fumigènes. Le 6/04/2011 à 15 h 00, des fumigènes de couleur bleue ont été placés et déclenchés en amont de la canalisation d'alimentation en air. Le but de cette manipulation était de détecter de manière simple et rapide, les passages préférentiels dans le média filtrant. Après environ une minute suite au déclenchement, des sorties de fumées sont apparues sur des points localisés, principalement à proximité des coins du conteneur. La couleur était malheureusement trop claire et le temps de fonctionnement trop court, pour être parfaitement sûr d'une visualisation d'ensemble de ces sorties et de leur localisation précise. De ce fait, l'intervention montre l'existence de passages préférentiels, qui n'étaient toutefois pas forcément en correspondance avec les espacements les plus importants précédemment observés en surface. Aussi, l'apparition relativement brève des fumées bleues en surface, n'a malheureusement pas pu apporter une représentation exhaustive des zones de passage préférentiel existantes dans le média.



Photo 14 : fumigène mise en place sur l'alimentation en air (pilote B)

Cette première campagne d'investigations menée sur les quatre pilotes après leur ouverture a donc permis de montrer que d'une manière générale un phénomène de tassement important était survenu durant la période du programme. Le tassement observé correspond à environ 20 % de la hauteur du média. Par ailleurs, on remarque aussi sur l'ensemble des pilotes à l'exception du pilote C, l'apparition d'une zone d'espacement entre le média et les bordures des conteneurs (ou mini conteneurs) suffisamment grande à notre avis, pour susciter des passages préférentiels (observés lors de l'utilisation des fumigènes sur le pilote B). Sur les deux biofiltres A-bleu et A-gris, on relève une croûte minéralisée en surface de 5 à 10 cm, parfois dans des teintes orangées, qui n'a pas été retrouvée sur les pilotes de grande taille. Elle pourrait être liée au phénomène d'oxydation plus forte, voir aussi à la condensation de l'eau dans cette partie supérieure des biofiltres. Sur les pilotes de grande taille, on note (principalement sur le pilote B) l'existence d'une couche supérieure homogène et lourde d'environ 20 cm. Cette stratification remarquée de manière différente sur les biofiltres rajoute probablement un facteur de formation des passages préférentiels, cités précédemment.

4.7.2. Mesures en surface

Au vue des faibles résultats de l'efficacité, obtenus plus particulièrement sur les deux pilotes de taille industrielle, une des causes envisagée serait la présence significative de passages préférentiels dans le média filtrant (soulevé dans le chapitre précédent). Ainsi des mesures de surface ont été organisées et mises en place spécifiquement sur les pilotes B et C. Elles correspondent à deux techniques différentes et complémentaires que sont la mesure d'émission surfacique de gaz (par chambre à flux) et l'imagerie thermique de surface (par caméra infrarouge).

4.7.2.1. Mesures d'émissions surfaciques à la chambre de flux

40 mesures de flux ont été réalisées sur chacun des biofiltres. Sur le pilote B, les mesures ont été réalisées début mai 2011 avec des températures extérieures variant de 13 °C à 22 °C entre le matin et le milieu de journée. Les flux de CH₄ sont compris dans l'intervalle 125 – 2 157 ml/min/m², avec une moyenne et médiane proche de **410 – 420 ml/min/m²**. Les flux de CO₂ sont compris dans l'intervalle 174 – 1 683 ml/min/m², avec une moyenne et médiane proche de **480 – 490 ml/min/m²**. A ce stade, la faible variation entre les paramètres des distributions des valeurs de flux de CH₄ et de CO₂ laisse supposer une oxydation relativement faible du substrat. On observe sur le krigeage des 40 valeurs de flux surfacique de CH₄ une répartition très hétérogène des flux, avec une forte prédominance des flux à la périphérie du biofiltre. Les valeurs centrales de flux sont ainsi plus de 3 fois plus faibles que les valeurs estimées à 50 cm de la bordure du biofiltre.

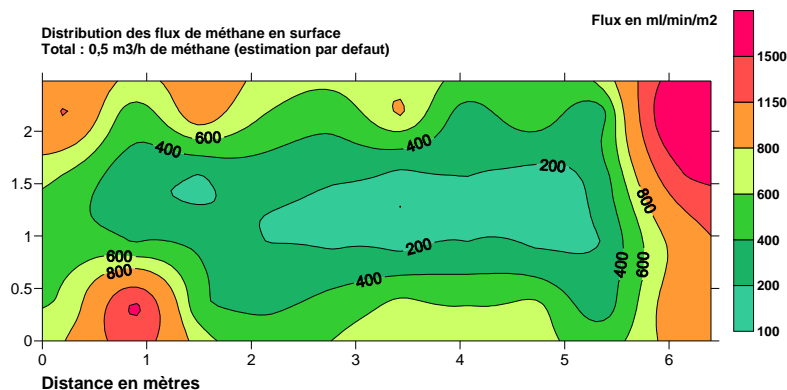


Figure 2 : distribution des flux surfaciques de méthane (pilote B)

Cette distribution très hétérogène des flux est retrouvée de manière atténuée sur la distribution des flux de CO₂, ce qui est généralement observé¹. L'affaiblissement des valeurs de flux centrales et médianes n'est ici pas observé.

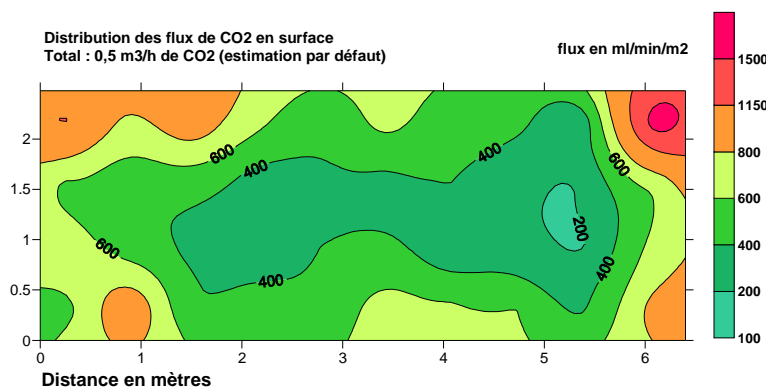


Figure 3 : distribution des flux surfaciques de CO₂ (pilote B)

Les flux totaux peuvent être évalués de manière qualitative à partir des valeurs mesurées, sachant que ces flux sont minorés d'un facteur, celui-ci étant lié à la forte contre pression générée dans la chambre de mesure du fait de l'insufflation forcée de biogaz dilué dans le biofiltre. Ce facteur a été estimé à l'aide de la chambre à cheminée. Le flux de biogaz non corrigé de ce facteur atteint 1 m³/h, de biogaz à 50 % de méthane. Les valeurs de flux de CO₂ et de méthane permettent également d'évaluer les zones les plus actives en termes d'oxydation du méthane. Si l'on considère ponctuellement le ratio flux de CO₂/ flux de CH₄, on peut obtenir une valeur ponctuelle proportionnelle à l'importance de l'oxydation.

¹ Les distributions de flux de CO₂ observée à la surface du sol et des biofiltres sont moins contrastées du fait des origines multiples de la production de CO₂.

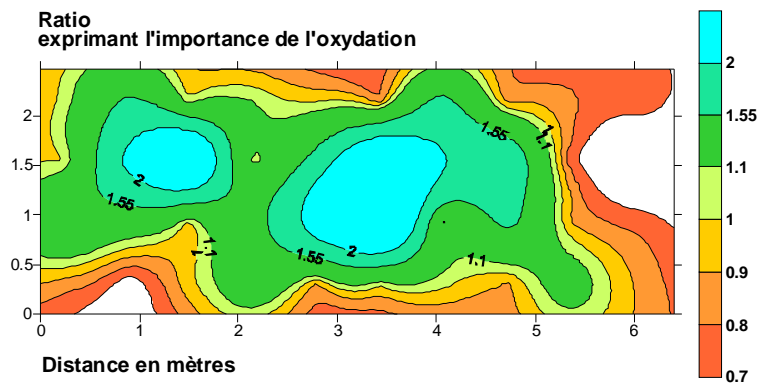


Figure 4 : localisation des zones les plus actives du biofiltre (pilote B)

Les teneurs en CH_4 et en CO_2 ont été mesurées sur la canalisation d'alimentation du biofiltre : on atteint respectivement 0,75 % en méthane et 0,56 % en CO_2 , soit un biogaz contenant 57 % de méthane et 43 % de CO_2 . Dans ce cadre, le ratio flux de CO_2 /flux de CH_4 croît faiblement de 0,77 (pas d'oxydation) à 2 (40 % d'oxydation environ) sur la surface du biofiltre, les zones les plus actives étant situées sur la partie médiane et centrale du biofiltre. On peut remarquer que l'oxydation est principalement présente dans la partie centrale, ainsi que dans la partie la plus proche de l'arrivée du biogaz dilué. Si l'on considère le ratio des flux totaux (minorés) de CH_4 et de CO_2 , proche de 1 ici, ce ratio correspond à une oxydation d'environ 12 - 13 % du méthane en faisant l'hypothèse d'une oxydation stabilisée et d'une transformation d'une mole de CH_4 . Sur le pilote C, la technique de mesures gaz mène à un ratio d'oxydation moyen de 40 %. Ce dernier étant à notre avis surestimé, du fait d'un régime instable du biofiltre, survenu durant la manipulation.

4.7.2.2. Mesures à la caméra infra rouge

Pour limiter les interférences, liées au rayonnement du soleil et à celui de la lune, les interventions ont été réalisées à différents moments de la nuit sur une période choisie avec un ciel légèrement voilé, des températures extérieures suffisamment fraîches par un temps sec. Plusieurs panoramas infrarouges ont été effectués. Ils correspondent à deux positionnements différents de la caméra, réalisés pour visualiser la surface des biofiltres.

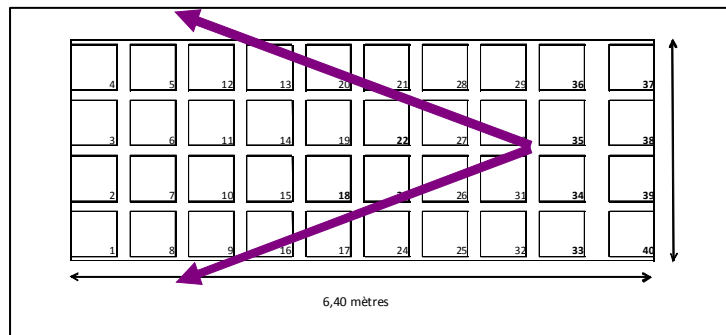


Figure 5 : positionnement n°1 de la caméra avec son angle de prise de vue (pilote B)

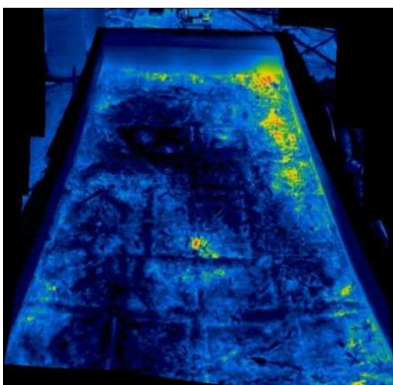


Photo 15 : n°1 infrarouge (pilote B)



Photo 16 : n°1 de jour (pilote B)

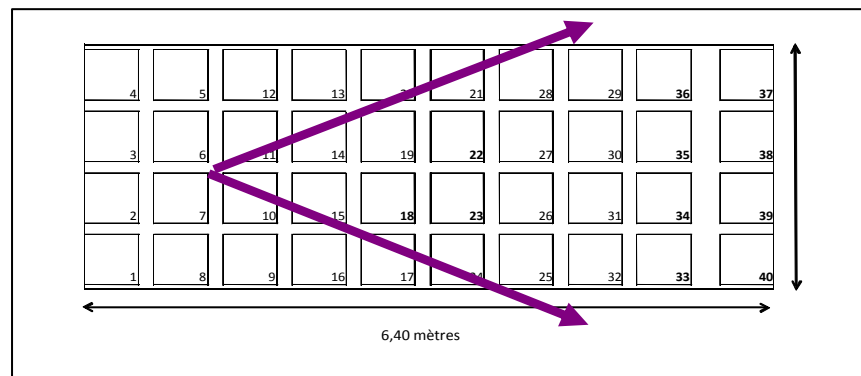


Figure 6 : positionnement n°2 de la caméra avec son angle de prise de vue (pilote B)

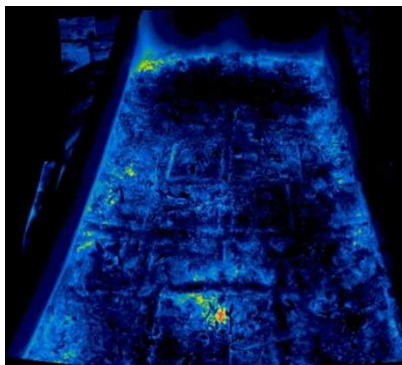


Photo 17 : n°2 infrarouge (pilote B)



Photo 18 : n°2 de jour (pilote B)

Cette technique mise en place a permis de confirmer l'existence de passages préférentiels dans le biofiltre B. Les zones à anomalies détectées restent globalement similaires, en terme de localisation et situées principalement sur la bordure entre la case 4 et la case n° 37. Pour la plupart des cas, les anomalies thermiques correspondent aux passages préférentiels du gaz. On note toutefois une exception sur un point situé au centre du biofiltre. En effet sur ce point, l'anomalie thermique détectée, n'est pas en relation avec une sortie de biogaz brut décelée par la chambre de flux. Elle semble donc, au vue des résultats des mesures de chambre flux (cf. rapport élevé entre flux de CO_2 / flux de CH_4), être liée à la réaction d'oxydation (exothermique). On notera enfin que l'anomalie détectée en chambre de flux à proximité de la case 8, n'a pas été relevée de manière significative avec la technique infra rouge.

Sur le pilote C, les images infra rouge (non représentées dans le document) sont peu contrastées et montrent que les températures sont assez homogènes sur l'ensemble de surface. On constate seulement une zone centrale, avec des températures de surface plus élevées et un rapport méthane sur gaz carbonique plus faible. Elle pourrait là encore s'apparenter à une zone de plus forte activité bactérienne, de type oxydation.

Pour finir, il est donc important de relever l'avantage du couplage entre ces techniques. En effet, les anomalies détectées par la technique infrarouge n'ont pas pu être assimilées uniquement à des passages préférentiels sans les analyses de gaz avec la chambre (cf. apport de chaleur possible avec la réaction d'oxydation). En revanche, grâce à la vision globale du sujet qu'apporte l'imagerie infrarouge, il est possible d'apprécier la représentativité des mesures obtenues par la technique à chambre.

Ainsi, la mise en place de ces deux techniques complémentaires a permis de mettre en évidence des différences sur les deux pilotes de grande taille. On constate une présence très marquée de zones de passages préférentiels sur le pilote B. Elles sont principalement localisées sur l'ensemble des bordures du conteneur. Elles correspondent à des zones à forte présence de CH_4 avec des rapports CH_4 sur CO_2 les plus importants et des températures de surface élevées.

Sur le pilote C, la présence de passage préférentiel n'a pas été aussi nettement relevée, la surface semble plus homogène que ce soit avec les résultats apportés par la technique à chambre ou ceux par la caméra infrarouge.

4.8. Caractéristiques du compost

Pour l'interprétation des résultats des rendements et le comparatif entre les pilotes du programme, des analyses détaillées du compost (type analyses agronomiques : NF U 44-51) ont été effectuées en laboratoire. On souligne que les analyses effectuées en début de programme ont été réalisées sur le compost seul, puis sur le mélange, compost et son structurant, en fin de programme.

Pour les pilotes A-bleu et A-gris, l'humidité mesurée semble importante, mais c'est celle effectuée sur le compost de la plate-forme en fin de chaîne. Des mesures effectuées avant la fermeture des pilotes montrent une humidité de l'ordre de 37 %. Le rapport C/N du compost utilisé est de 13,5, un peu faible pour une utilisation en biofiltre, car il est conseillé d'avoir un rapport C/N proche de 15 par Riquier (2007). De plus, au début et en fin de programme, des tests (type SOLVITA) ont été effectués in situ sur l'ensemble des quatre pilotes, pour s'assurer du degré de maturité du compost utilisé. Il s'agit d'un test colorimétrique évaluant la teneur en CO₂ et NH₃. La couleur obtenue pour chaque paramètre permet de déterminer le degré de maturation du compost. Un échantillon est placé et tassé dans un bocal spécifique pour le test. Les ongles CO₂ et NH₃ sont plantés dans le compost avant la fermeture du bocal. Ils sont ensuite conservés à température ambiante (20-25 °C) pendant quatre heures. Les résultats de ces tests ont montré que le compost était mature, pour les pilotes A-bleu et A-gris. Le compost utilisé avait une concentration en MO non négligeable de 445 g/kg de MS. L'association de la MO avec l'O₂ a peut être déclenché le phénomène de compostage :

- à l'augmentation des températures et notamment lors des ouvertures des pilotes
- surproduction de CO₂.

Pour vérifier l'utilisation de la MO par compostage, il aurait fallu refaire une analyse du compost de chacun des pilotes en le dissociant des structurants par tamisage.

Pour le pilote B, l'évolution positive de la teneur en matière sèche (MS) dans le média (556 à 610 g. kg⁻¹), témoigne en contre partie de la réduction de l'humidité, qui avait pu être appréciée au travers des résultats des mesures effectuées sur site. Le rapport C/N du compost utilisé était initialement assez élevé avec 19,4 en comparaison à celui qui était conseillé dans la bibliographie de 15. A la fin du programme il est nettement redescendu pour atteindre 12,3. Parallèlement on note l'augmentation de l'azote total de 5,7 à 8,7 g. kg⁻¹. On remarque, sur les deux analyses que la concentration en MO n'a pas beaucoup évolué durant la période du programme, sachant que dans le deuxième prélèvement le structurant (copeau de bois) était présent. Cette valeur était assez élevée au départ (402 g. kg⁻¹) et peut expliquer les températures assez élevées observés à la mise en route jusqu'à 80 °C, qui pouvaient correspondre au déclenchement d'un phénomène de compostage avec l'apport de l'air extérieure. L'ensemble des résultats des tests de maturation (SOLVITA), a montré que le compost était mature. L'évolution dans le temps confirme une légère augmentation du coefficient de maturation de 5 à 5,5 pour le pilote B.

Pour le pilote C, l'interprétation des résultats des rendements et le comparatif entre les pilotes du programme, il a été réalisé une caractérisation du compost utilisé. Ainsi, des analyses détaillées des composts (type analyses agronomiques : NF U 44-51) ont été effectuées en laboratoire, avant la fermeture du pilote (2010). Le rapport C/N du compost utilisé est très proche de celui préconisé avec 12,9. Par ailleurs, on note une présence moins importante d'humidité dans le compost (sans structurant) de ce pilote. L'ensemble des résultats des tests de maturation (SOLVITA), a montré que le compost était mature. Ils montrent une stabilisation avec un coefficient de maturation entre 5 pour le NH₃ et 6 pour le CO₂, pour le pilote C.

Pour résumer, sur l'ensemble des analyses de compost effectuées sur les quatre pilotes, les principales différences remarquées ont été :

- La teneur en humidité nettement plus faible pour le pilote C en début de programme,
- Le rapport C/N élevé pour le pilote B, au début, avec 19 (au lieu de 13 pour les autres pilotes) et une chute en fin de programme.
- Un degré de maturation (cf. test SOLVITA) atteint pour l'ensemble des composts utilisés, généralement proche de la valeur 5 pour le NH₃ et variable entre 5 à 7,5 pour le CO₂.

4.9. Mesures de gaz au laboratoire

Pour les pilotes A-bleu, A-gris et B, ces analyses ont été réalisées dans le but de vérifier la qualité des valeurs des gaz majeurs, obtenues avec le matériel portable (Type trigaz), et de quantifier certains éléments traces. Des prélèvements de gaz en entrée et en sortie des biofiltres ont été effectués dans des poches Tedlar et envoyés à des laboratoires.

L'utilisation de poches Tedlar implique une dilution possible des gaz majeurs (CH_4 et CO_2) et de l' H_2S , avec de l'air. Pour réaliser la correction, il a été établi que les teneurs en O_2 initiales sont connues grâce aux analyseurs de gaz utilisés. Pour les pilotes A-bleu et A-gris, les prélèvements ont été envoyés au laboratoire CAE (Centre d'Analyses Environnementales), le 14 septembre 2010. Les écarts obtenus pour le CO_2 et le CH_4 sont assez faibles et reste dans les gammes de précision de l'appareil ($\pm 0,5\%$). Il apparaît donc que les efficacités d'oxydation du méthane calculées (gamme située entre 20 à 40%) pour le 14 septembre 2010 soient majorées de 6 points lorsqu'on effectue les mesures au trigaz. Elles restent malgré ceci dans le même ordre de grandeur.

Pour le pilote B, les prélèvements ont été envoyés au laboratoire Europoll, le 6 avril 2011. Les valeurs obtenues par le trigaz sont là encore assez proches de celles du laboratoire, de 0,1 % à 0,2 %, et ainsi les écarts obtenus restent bien dans la précision communiquée par le fabricant de l'appareil portable (0,5 % volume). Parallèlement à ceci, les efficacités ont été calculées en reprenant les résultats respectifs obtenus par le matériel portable et par le laboratoire. Il permet d'observer que le résultat issu du suivi effectué le 6/04/2011 minore de 3,3 points le taux d'efficacité. Dans la gamme d'efficacité concernée (0 à 10%), l'écart est donc important, avec environ - 37 % de la valeur obtenue par les résultats du laboratoire, ce qui permet de souligner, l'erreur élevée liée au matériel de mesure. En revanche, pour les gammes d'efficacité qui étaient normalement attendues (50 à 90 %) l'erreur serait réduite, de l'ordre de 5 % et donc tout à fait acceptable. Ainsi, les résultats obtenus par le matériel portable donnent une valeur indicative de l'efficacité qui restera très imprécise dans les plages basses situées entre 0 à 30 %.

Outre, le fait d'apprécier la qualité des mesures obtenues par le matériel portable durant le programme (erreur de l'ordre de 5 % à 6 % pour les efficacités de traitement les plus hautes), ces analyses ont permis de confirmer la capacité de la technologie à abattre le CH_4 . Elles ont par ailleurs permis de montrer que ce procédé (déjà utilisé dans le domaine industriel) pouvait traiter d'autres éléments, tels que l' H_2S mais aussi des COV non méthaniques : 83 % d'efficacité sur le pilote A-bleu (refus d'affinage) et 47 % pour A-gris (bois broyé). En revanche, il y aurait une production de N_2O : + 33 % pour BLEU et + 86 % pour GRIS.

5 PROPOSITIONS DE PRECONISATIONS POUR LE PROCÉDE

Les résultats du suivi et des différents tests réalisés durant la période du programme ont permis de mettre en évidence de nombreuses anomalies qui sont intervenues et expliquent les faibles efficacités d'oxydation du méthane obtenues par le traitement biologique. Elles sont apparues malgré l'étude approfondie initialement menée pour la réalisation et la mise en place des pilotes. Elles correspondent à la présence de passages préférentiels au sein du média filtrant, aux refroidissements engendrés par les conditions météorologiques et une teneur en humidité non optimisée. **Ainsi, bien que très rustique à la base, cette technique, nécessite semble-t-il, un travail de conception et de réalisation encore plus fin, de manière à répondre aux différentes contraintes, notamment :**

Pour éviter le refroidissement :

- **Privilégier l'utilisation d'un biogaz plus pauvre en méthane, et malgré tout riche en O₂, pour limiter l'utilisation de l'air extérieur (sauf période estivale),**
- **Mettre en place une ligne chauffante et un dispositif d'isolation renforcé, sur les canalisations aériennes et réseaux l'alimentation du biofiltre,**
- **Prévoir une isolation de l'ensemble des parois du biofiltre (éventuellement aussi en partie supérieure),**

Pour éviter les passages préférentiels :

- **Prendre une proportion élevée d'éléments structurant dans le mélange avec le compost ($\geq 1/3$), en privilégiant un structurant grossier se rapprochant du refus d'affinage,**
- **Garder une épaisseur significative pour le média ($\geq 1,2$ ml), avec rajout éventuel sur les bordures,**
- **Prévoir un brassage régulier du média en fonction de l'évolution de l'état de surface (privilégier l'exécution en période chaude), nécessitant un accès au média,**
- **Maintenir une distance entre les bordures et le dispositif de drainage servant à l'injection des gaz**

Pour éviter le déficit en eau

- **Prévoir un dispositif pour l'humidification du média, en assurant une dispersion homogène et non destructrice de la structure du média**

Un protocole de suivi soutenu restera donc à maintenir, composé des points principaux suivants :

- **Contrôle régulier de l'état de surface (cf. efficacité), nécessitant un ou des orifices de visualisation en partie haute,**
- **Mesure et enregistrement en continu de la température interne et externe (cf. sécurité et efficacité),**
- **Mesure en continu de la teneur en méthane dans le mélange gazeux (cf. sécurité et efficacité)**
- **Mesure régulière du gaz en amont et en aval ; température, pression, débit CH₄, CO₂, O₂ (cf. sécurité et efficacité) avec du matériel portable étalonné, et**
- **Contrôle périodique de la teneur en humidité dans le média (cf. efficacité)**

Divers

- **Faire réaliser le Zonage Atex sur l'installation et veiller à l'adaptabilité du matériel utilisé (cf. sécurité)**

6 CONCLUSIONS GENERALES

Le programme « biofiltration » avait pour objectif d'évaluer l'efficacité d'oxydation du méthane dans un système de biofiltration active. VEOLIA Propreté, SITA France et COVED ont mis en place et suivi plusieurs unités pilotes. Ces unités pilotes étaient composées de biofiltres de plusieurs tailles allant de 1,3 m³ (pour les deux biofiltres A-gris et A-bleu de VEOLIA Propreté) à 30 m³ (pour chaque biofiltre B et C de SITA France et de COVED respectivement). Le média filtrant était composé d'un mélange entre compost et structurant (copeaux de bois ou refus de compost), le plus souvent préconisé dans la bibliographie et dont l'approvisionnement reste aisé dans le domaine. Ainsi, chaque mélange a pu être testé sur les deux tailles différentes. La période de suivi initialement prévue sur 12 mois a été prolongée pour les besoins du programme, de 4 mois à 7 mois en fonction des pilotes, soit de l'été 2009 au printemps 2011.

Globalement, les résultats du suivi **montrent qu'il a efficacité du traitement sur l'abatement du méthane, mais elle est nettement plus faible que celle annoncée dans la bibliographie.** Elle était comprise majoritairement entre 0 et 50 %, avec une moyenne située à environ 20 % pour les pilotes B et C et de 40 % pour les pilotes A-bleu et A-gris, composé des deux biofiltres de petite taille.

Ainsi, l'oxydation du méthane a quand même pu être observée dans le procédé, puisque certains indicateurs ont été constatés. Notamment, le suivi des températures dans les biofiltres ont permis de mettre en **évidence une production de chaleur,** et démontrerait que l'oxydation du méthane est bien une réaction exothermique. Les températures dans le biofiltre est supérieure aux températures extérieures plus de 80 % du temps. Selon l'équation stœchiométrique d'oxydation du méthane, la consommation de méthane doit correspondre à la production de CO₂. Cependant, il est rare de trouver un équilibre parfait dans les analyses de gaz effectuées. D'autres mécanismes pourraient être expliqués dans la production de CO₂ ou la surconsommation du méthane, comme un phénomène de compostage ou l'adsorption de méthane dans les matériaux. **Le suivi du CO₂ comme indicateur de l'oxydation du méthane ne semble pas être une procédure fiable, mais il reste un paramètre important à mesurer pour la compréhension du fonctionnement du système. Et, de la même manière, le suivi de l'oxygène rajoute un autre paramètre de contrôle dans la composition des gaz (utilisé dans notre cas pour le pilote C). Pour compléter, et comme stipulé dans la bibliographie, il a été observé sur les biofiltres A-bleu et A-gris, une couche de surface indurée dans des teintes ocre-rouges. Cette dernière a été davantage remarquée sur le pilote A-bleu, qui a obtenu les meilleurs résultats en termes d'oxydation du méthane.**

Dans le but d'expliquer ces résultats très faibles de l'oxydation du méthane, les paramètres d'influence ont donc été recherchés. **Il semblerait que le paramètre le plus important soit la température dans le biofiltre.** Mais cette dernière est très dépendante des températures extérieures mais aussi de l'injection de l'air en forte quantité, surtout pour ce type de procédé de « biofiltration active ». Lorsque les températures extérieures sont supérieures à un seuil compris entre 10 et 15 °C (cas des pilotes A-bleu et A-gris et du pilote B), il a été constaté une production de chaleur, tandis que l'injection de l'air seul a tendance à refroidir le biofiltre, jusqu'à obtenir les mêmes températures que l'extérieur. A l'exception du cas du pilote C, où les températures du biofiltre, sont toujours restées supérieures aux températures extérieures, même en périodes hivernales. **Pour l'ensemble des pilotes, il n'y a plus eu d'efficacité d'oxydation lorsque les températures extérieures, suivies des températures intérieures, sont devenues trop basses.**

Malgré ceci, pour des conditions idéales, qui correspondaient à des températures extérieures clémentes situées entre 20 °C et 35 °C et des températures internes de 30 °C à 45 °C, on constate que les résultats de l'efficacité sont restés en dessous de ceux attendus. **La température n'explique donc pas la totalité des rendements d'oxydation observés.**

Le deuxième paramètre concerné serait la teneur en humidité. Ce paramètre a été suivi en un point dans le média, complété par des analyses en laboratoire. Il semble y avoir de nouveau un effet saisonnier à l'intérieure des pilotes, constaté lors du suivi plus soutenu des deux biofiltres A-bleu et A-gris. En période estivale, un phénomène d'assèchement a été remarqué, lié d'une part à une légère baisse de l'activité d'oxydation, mais aussi et surtout **au maintien naturel, à une température plus chaude du biofiltre et à l'apport d'air extérieur plus sec** (cf. hygrométrie de l'air proche de 40 %). En revanche en hiver, la présence d'humidité peut s'expliquer par le refroidissement très net de la température du biofiltre et l'alimentation en air plus humide (cf. hygrométrie de l'air proche de 90 %). Ainsi, sur l'ensemble des pilotes la présence d'humidité reste constatée (cf. oxydation modérée, température haute non maintenue, apport

extérieur) **avec néanmoins une teneur assez basse de 35 à 40 %, bien en dessous de la teneur optimum qui est en théorie proche de 60 %.**

Après les différentes campagnes d'essais d'injection d'eau contrôlée, menées sur l'ensemble des pilotes, une amélioration très substantielle a été constatée sur l'efficacité (de l'ordre de + 15 %), pour des périodes très brèves, pouvant s'expliquer par les refroidissements occasionnés parallèlement.

Aucun autre paramètre ayant été suivi ne paraît avoir eu de l'influence sur l'efficacité.

Ainsi, le dernier élément investigué au cours du programme, a été de pouvoir qualifier la répartition des gaz au sein des biofiltres. Les observations effectuées au cours de l'autopsie de l'ensemble des pilotes et les différentes manipulations de contrôle réalisées (fumigène, chambre de flux et infra rouge) sur les deux biofiltres de grande taille, **ont concrètement mis en évidence l'existence de passages préférentiels.** De manière générale, ils sont localisés sur les bordures et angles formés par les dispositifs. On note cependant une légère différence sur le pilote C, où le média a semble-t-il gardé une certaine homogénéité, avec une meilleure répartition du gaz. **Ceci pourrait expliquer le fait, que la température interne de ce dernier soit toujours restée supérieure à la température extérieure.**

Au regard des résultats obtenus sur l'efficacité de ce type de traitement, il semble donc délicat d'affirmer que le traitement par biofiltration active, puisse parvenir aux valeurs citées dans la bibliographie situées entre 60 et 90 % et ce de manière régulière durant toutes les saisons de l'année. En effet, les efficacités les plus élevées sur l'ensemble des pilotes ont été observés principalement en périodes estivales avec des valeurs mensuelles moyennes proches de 40 % pour les pilotes A-bleu et A-gris et le pilote C. Toutefois, en prenant en compte les différentes anomalies détectées sur le système, précédemment évoquées, des propositions ont été faites pour améliorer le dispositif. Elles concernent plusieurs parties du système, **de la conception à son exploitation.** Il s'agira en premier lieu, **de garantir une température minimum dans le biofiltre** quelque soit les conditions météorologiques extérieures (cf. chauffage de l'air et isolation du procédé) impliquant parallèlement, **un maintien impératif de l'intégrité du média** (cf. proportion en structurant et brassage régulier) et **d'assurer l'appoint en humidité** pour pallier à la consommation suscitée par de bonnes conditions de fonctionnement. Enfin, **un protocole de suivi très stricte et régulier devra être respecté**, proche de celui mis en place au cours de ce programme de recherche, pour des raisons de contrôle de fonctionnement ainsi que pour des raisons sécuritaires (cf. état de surface, composition des gaz, température humidité).

7 BIBLIOGRAPHIE

Czepeil, P.M., Crill, P.M., Harris, R.C., (1995). Environmental factors influencing the variability of methane oxidation in temperate zone soils, *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, NO. D5, PP. 9359-9364

Hanson, R., Hanson T., (1996). "Methanotrophic Bacteria", *Microbiological Reviews*, Vol. 60, No. p. 439–471

Humer, M. et Lechner, P. (2001b). "Microorganisms against the Greenhouse Effect as Suitable Cover Layers for the Elimination of Methane Emissions from Landfills," 6' Annual Landfill Symposium. San Diego, CA Solid Waste Association of North America (SWANA), pp 305-318

Marsteau S., (2006). « Traitement des gaz dangereux captés sur les lieux de travail », Fiche « oxydation biologique », INRS

Riquier, L., (2007). « La bio filtration du biogaz de décharge », rapport bibliographique, ADEME, convention 0606C0052

Riquier, L., Ducrocq, M., (2010). « Biofiltration du biogaz », rapport intermédiaire pilote VEOLIA Propreté , ADEME, convention 0606C0052

Riquier, L., (2010). « Biofiltration du biogaz », rapport intermédiaire pilote SITA, ADEME, convention 0606C0052

Roncato, C. (2009). « Etude des taux d'oxydation du méthane dans des colonnes expérimentales simulant un biorecouvrement de site d'enfouissement », Thèse, Université de Sherbrooke, Canada

SCS ENGINEERS, (2008). « Current MSW Industry Position and State of the Practice on LFG Collection Efficiency, Methane Oxidation, and Carbon Sequestration in Landfills ». Prepared for Solid Waste Industry for Climate Solutions (SWICS), Californie

Stebelsky, T. (2010) « Biofiltration du biogaz », rapport intermédiaire pilote COVED, ADEME, convention 0606C0052

Straka, F., Lacek, P., Kuncarova, M., (2009). "Landfill Gas Mitigation using Biofilters", *Proceedings Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 5 - 9 October 2009

Streese J., Stegmann R.(2005). "Potentials and limitations of biofilter for methane oxidation" *Proceedings Sardinia 2009, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3 - 7 October 2005