

Caractérisation du biogaz de la décharge d'Akouédo (Abidjan, Côte d'Ivoire) : influence des saisons sur le potentiel d'émanation naturelle

Biogas characterization of Akouédo landfill (Abidjan, Ivory Coast): influence of seasons on the potential of natural emanation

Adjiri Oi Adjiri¹, Goné Droh Laciné², Soro Nagnin³, Victor Kouamé Kouamé⁴, Jean Biémi⁵

Résumé

Cette étude vise à mieux connaître l'influence des saisons sur la production du biogaz émis par la décharge d'Akouédo. La composition du gaz qui émane naturellement de la décharge a été analysée en continu, au cours de deux saisons successives, à partir de différents puits forés dans des dépôts récents et anciens de déchets. En saison pluvieuse, les productions moyennes de méthane, dioxyde de carbone, dioxygène et diazote s'élèvent respectivement à 69 %, 27 %, 0,1 % et 0,2 %, alors qu'en saison sèche, ces teneurs sont respectivement de 70 %, 23 %, 3,3 % et 2,7 %. Pour les deux saisons, le méthane et le dioxyde de carbone contribuent en moyenne à 94,5 % de l'émanation totale de gaz des dépôts anciens, et à 73 % des gaz émanant des dépôts récents. Le méthane, composé largement majoritaire du biogaz obtenu, est produit à des teneurs moyennes de 69,5 % et 50,4 % au niveau des dépôts anciens et récents, respectivement. Concernant le dioxyde de carbone, les teneurs moyennes sont respectivement de 25 % et 22,5 %. Ainsi, le biogaz produit par la décharge d'Akouédo constitue une parfaite alternative pour la Côte d'Ivoire, face à une hausse constante de la démographie et à une consommation croissante de ressources énergétiques limitées. En l'absence d'exploitation, elle représente une source importante de gaz à effet de serre. L'analyse comparée des résultats des différentes saisons et l'application du test de Fisher entre les émanations des deux saisons indiquent qu'à Akouédo, la production de biogaz est indépendante des saisons.

Mots-clés

décharge, biogaz, énergie renouvelable, gaz à effet de serre.

(1) Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement (DSTEGE), UFR SRTM, université Félix Houphouët Boigny, 22 B.P. 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire),
UFR de l'Environnement, université Jean LOROUGNON GUEDE, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire) 25 B.P 97 Cidex 1 Abidjan 25,
Tél/Cél : (225) 22 49 53 80/ 07 60 29 06, courriel : oiadjiri@gmail.com

(2) Laboratoire de Géosciences et Environnement, UFR SGE, université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02 (Côte d'Ivoire)
(3) Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement (DSTEGE), UFR SRTM, université Félix Houphouët Boigny, 22 B.P. 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire)

(4) Laboratoire des Sciences de l'Environnement, UFR SGE, université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02 (Côte d'Ivoire)

(5) Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement (DSTEGE), UFR SRTM, université Félix Houphouët Boigny, 22 B.P. 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire)

Abstract

The present study was undertaken to know the influence of the seasons on the production of methane released by the landfill Akouédo. Thus, from the wells drilled on the site and of analyzer of biogas in continuous, the proportions of gas which naturally emanate from the waste layers were measured in two successive seasons. The average productions of CH₄, CO₂, O₂ and N₂ are respectively 69%, 27%, 0.1% and 0.2% for the rainy season and respectively 70%, 23%, 3.3% and 2.7% in the dry season. For the two seasons, CH₄ and CO₂ represent on average 94.5% of the total emission of gas deposits in the old deposits and 73% in the recent deposits. Methane, compound widely majority of biogas obtained, is produced at average grades of 69.5% and 50.4% at the old and new deposits respectively. Regarding carbon dioxide, average grades are 25% and 22.5%. Thus, the biogas produced by the landfill Akouédo is a perfect alternative for Ivory Coast, facing a steady increase in population and growing consumption of limited energy resources. In the absence of exploitation, it is a major source of greenhouse gas emissions. Comparative analysis of results of the different seasons and the application of Fisher test between the emanations of the two seasons, indicate that biogas production is independent of the seasons to the Akouédo landfill.

Keywords

landfill, biogas, renewable energy, greenhouse gas emissions.

Introduction

Les changements climatiques ont été reconnus pour la première fois comme un problème majeur, d'envergure mondiale en 1979, au cours de la première conférence climatique organisée à Genève par l'organisation météorologique mondiale.

Par ailleurs, l'énergie a toujours constitué un enjeu vital pour l'homme et les sociétés humaines. La prise de conscience de l'homme de l'importance de nouveaux enjeux, en particulier concernant l'environnement (réchauffement climatique, épuisement des ressources, augmentation de l'effet de serre), devrait nous rapprocher non seulement d'une utilisation plus rationnelle de l'énergie mais aussi d'une optimisation des procédés énergétiques vers les énergies renouvelables (Jeanneret, 2006). En outre, on parle aujourd'hui de crise d'approvisionnement énergétique de nos sociétés. Une crise énergétique qui est inévitable face à une hausse constante de la démographie et à une consommation croissante de ressources limitées. En réponse à cette crise énergétique et aux problèmes de pollution, il est impératif et urgent d'adopter de nouvelles sources d'énergie efficaces et inoffensives pour l'environnement. Les énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée. Leur exploitation est un moyen de répondre aux besoins en énergie tout en préservant l'environnement. Ces formes d'énergie n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes (Ortega, 2009). Une des principales formes d'énergie renouvelable est l'énergie issue de la biomasse, dont notamment le biogaz. Le biogaz provient de la fermentation de matières organiques animales ou végétales en l'absence d'oxygène, il est composé dans sa plus grande partie par du méthane et du dioxyde de carbone (Poulleau, 2002).

Par ailleurs, en Côte d'Ivoire, pour faire face au défi d'élimination sécuritaire des déchets dans la capitale économique, Abidjan s'est dotée, depuis 1965, d'une décharge contrôlée à ciel ouvert. Des études antérieures réalisées par Adjiri *et al.* (2008) ont révélé que cette décharge est une importante source de production de biogaz, et que ce biogaz est constitué essentiellement de CO₂ (26,8 %) et de CH₄ (62 %). Ces deux gaz sont des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement global de la planète. D'autre part, le méthane participe à l'effet de serre à un niveau 21 fois plus grand que celui du CO₂ (Dessus *et al.*, 2008). Le captage et la consommation de ce dernier réduirait donc son rejet dans l'atmosphère en le transformant en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau. Cette consommation aura alors des effets favorables sur la Terre (*Notre planète*, 2006).

La composition du biogaz dépend certes de la nature du substrat (Servais, 2001 ; Afsset, 2008), mais aussi des conditions anaérobies du milieu (Erses *et al.*, 2005). Les études de Adjiri (2010) ont indiqué que la masse de déchets est très poreuse. En conséquence, en temps de pluie, l'humidité pourrait-elle influencer la production de biogaz en rendant le milieu anaérobie ? En d'autres termes, le potentiel de production de biogaz pourrait-il être influencé par les saisons ?

Pour répondre à ces deux questions, nous avons réalisé deux campagnes de mesures de l'émanation naturelle de biogaz sur deux saisons consécutives de la même année. La première a eu lieu pendant la grande saison sèche, c'est-à-dire de mi-décembre à mi-janvier, et la seconde pendant la grande saison des pluies, c'est-à-dire de début mai à mi-juin. L'objectif principal de cette étude est de connaître l'influence réelle des saisons sur le potentiel d'émanation naturelle du biogaz de la décharge d'Akouédo, afin d'apprécier le potentiel réel de production de biogaz

et sa contribution dans le réchauffement climatique. Il s'agit en particulier (1) de caractériser la composition du biogaz selon les deux saisons, et (2) de déterminer et de signifier les différences de fluctuations entre les deux saisons pour chaque type de dépôt.

1. Description de la zone d'étude

La zone d'étude est la décharge d'Akouédo qui est l'unique décharge du district d'Abidjan. Elle est située au nord-est du district, dans la commune de Cocody (quartier résidentiel haut standing), entre 396 000 m et 397 000 m en abscisses et entre 590 000 m et 591 000 m en ordonnées dans le référentiel UTM 30N. Cette décharge, mise en place depuis 1965, s'étend sur une superficie de 153 ha. Elle se trouve à mi-parcours de l'axe Abidjan-Bingerville, à 18 km du centre-ville. Dans son fonctionnement actuel, elle est classée au rang des décharges sauvages (Kouadio *et al.*, 2000). Elle occupe un talweg dont

le drainage naturel se fait vers la lagune Ebrié (baie de M'Badon), au sud, à moins de 2,1 km (Kouamé, 2007). Au nord, elle est limitée par les quartiers résidentiels haut standing Génie 2000 et les Lauriers, à l'ouest par le village d'Akouédo, et à l'est par le village d'Akouédo Attié et la commune de Bingerville (figure 1).

2. Matériel et méthodes

La démarche méthodologique suit deux approches complémentaires.

2.1 Mesure de la composition du biogaz

La composition de gaz émanant de la décharge (émanation naturelle) a été mesurée à partir de puits forés sur les sites d'enfouissement. La technique utilisée est celle de l'extraction passive (EDEN, 2000). Les mesures ont été faites en considérant deux différentes saisons consé-

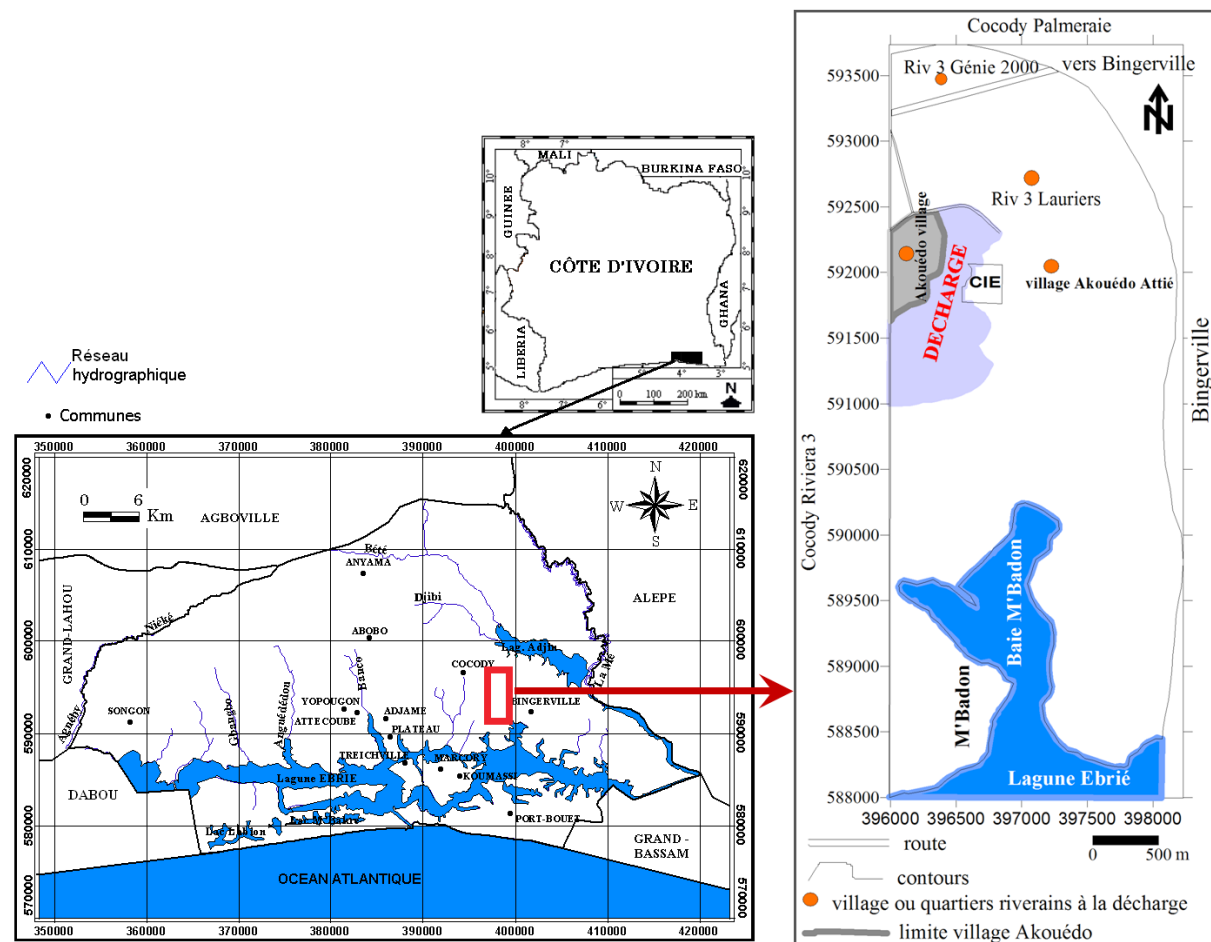


Figure 1. Présentation de la zone d'étude.
Presentation of the study area.

cutives de la même année. Une première campagne de mesure a été faite pendant la grande saison des pluies, (début mai à mi-juin), et une seconde campagne de mesure pendant la grande saison sèche (mi-décembre à mi-janvier). La seconde campagne a porté sur les mêmes puits que ceux de la première campagne. Ainsi, trois puits de captage (puits n° 1, 2 et 3) ont été forés dans les dépôts anciens (figure 2) avec une tarière de 254 mm ayant une capacité de forage de 18 m. Ils ont été équipés de tuyaux en PVC de 102 mm de diamètre, crépinés à la base sur une longueur de 6 m. Les têtes de puits ont été étanchéisées avec de la bentonite. Chaque puits a été muni d'une vanne de contrôle. Un réseau de collecte a été installé, reliant chaque puits à un point central (appareil de mesure et équipements de pompage). Cette disposition fait partie des dispositions classiques utilisées pour déterminer la composition *in-situ* du biogaz dans les décharges (Vigneault, 1999 ; Bitton, 2004 ; Odotech, 2004). Elle a été déjà présentée en Afrique par Belhaj (2004) pour l'extraction et la valorisation du biogaz dans la décharge d'Akreuch (Maroc).

L'appareil de mesure est un analyseur de biogaz de type Automated Extraction Monitoring System (AEMS). Il mesure en continu les teneurs, exprimées en %

volumique, du méthane (CH_4), du dioxyde de carbone (CO_2), du dioxygène (O_2) et du diazote (N_2) qui composent le gaz émanant dans chaque puits. Il est équipé de deux détecteurs infrarouges qui fournissent les proportions de méthane et de gaz carbonique. À partir des principes galvaniques cellulaires, il donne les proportions d'autres types de gaz présents (H_2S , CO , SO_2 ...). La limite de détection absolue de cet instrument est de 0,1 % pour les volumes de CH_4 , de CO_2 et de O_2 . Les incertitudes liées à la mesure du méthane, du dioxyde de carbone et du dioxygène sont respectivement de $\pm 3\%$, $\pm 3\%$, et $\pm 1\%$ pour des volumes supérieurs à 5 %. En deçà, elles sont respectivement de $\pm 0,3\%$, $\pm 0,3\%$ et $\pm 1\%$.

Pour vérifier les facteurs âge de déchets et influence des lixiviats, deux autres puits (puits n° 4 et 5) ont été forés dans les dépôts récents (figure 2).

2.2 Analyse de l'émanation spatio-temporelle du biogaz

Les résultats des mesures ont été soumis au test de Fisher («test F») afin de mieux apprécier les écarts entre les deux saisons, des différentes proportions d'émanation de chaque type de dépôt. En effet, le test F est une méthode statistique assez commode pour comparer simultanément plusieurs moyennes. Dans notre cas, il s'agit de comparer les proportions d'émanation naturelle de biogaz entre les différentes saisons pour chaque type de dépôt. Ainsi, suivant le principe général de comparaison, on envisage l'hypothèse nulle suivant laquelle, pour chaque gaz et pour chaque type de dépôt, les émanations seraient identiques quelle que soit la saison, auquel cas la variabilité serait due à une influence réelle du facteur qui conduit à distinguer les différents groupes d'émanation ou elle peut simplement s'expliquer par les fluctuations d'émanation. Dans la pratique, le «test F» traduit les écarts entre les différents rapports d'émanation de chaque gaz, pour chaque type de dépôt, entre les deux saisons. Et, à l'aide de la table Snedecor, on détermine le seuil de signification (F théorique) au coefficient de sécurité 95 % ($F_{0,05}$). Si F observé ou calculé est plus grand que le F théorique, on refuse l'hypothèse nulle et on admet que les différences entre les émanations sont significatives. Cela signifie que les taux d'émanation sont trop différents pour être considérés comme homogènes.

Si F observé est plus petit que le F théorique, on accepte l'hypothèse nulle. Cela signifie que les pourcentages entre les deux saisons, pour un type de gaz et de déchets donné, ont des valeurs suffisamment proches pour qu'on accepte l'idée que les émanations soient homogènes, et qu'on admette que les différences entre les émanations ne sont pas significatives.

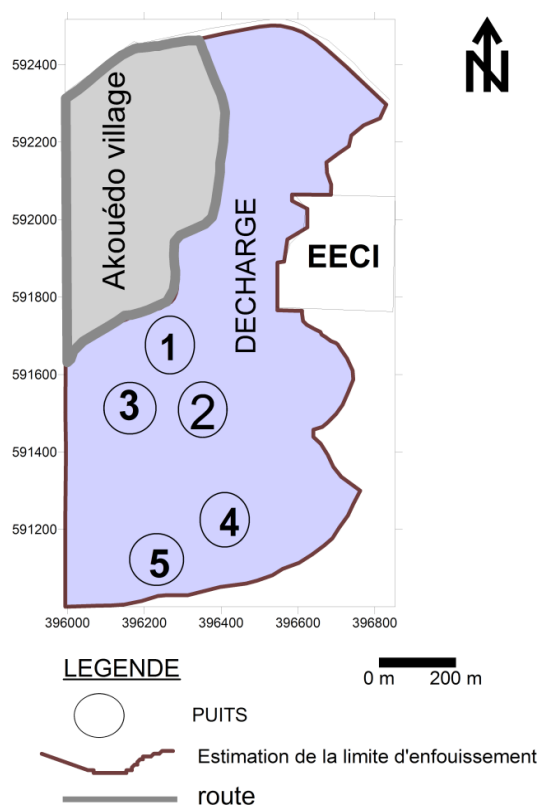


Figure 2. Localisation des puits de mesure sur le site de la décharge.

Location of measuring wells on the landfill site.

Tableau I. Composition du biogaz émanant naturellement de la décharge.

Composition of biogas emanating naturally from the landfill.

Émanation naturelle par saison, par puits et par type de dépôt						
N° Puits	Saison	% CH ₄	% CO ₂	% O ₂	% N ₂	CH ₄ /CO ₂
Dépôts anciens						
1	P	67,0	27,0	0,3	0,1	2,5
	S	74,0	20,0	4,0	0,1	3,7
2	P	70,0	28,0	0,1	0,0	2,5
	S	71,0	26,0	3,0	3,0	2,7
3	P	70,0	26,0	0,0	0,5	2,7
	S	65,0	23,0	3,0	5,0	2,8
Moyenne	P	69,0	27,0	0,1	0,2	2,5
Moyenne	S	70,0	23,0	3,3	2,7	3,0
Dépôts récents						
4	P	51,6	21,3	5,5	15,3	2,4
	S	50,1	24,3	4,2	15,7	2,1
5	P	49,9	22,5	6,1	16,1	2,2
	S	50,3	22,1	5,8	17,1	2,3
Moyenne	P	50,7	21,9	5,8	15,7	2,3
Moyenne	S	50,2	23,2	5,0	16,4	2,2
Composés Organiques Volatils (COV) recherchés (moyenne toutes mesures des 5 puits - Émanation naturelle et dans les lixiviats)						

Hydrogène sulfuré (H ₂ S)	moins de 2 ppm
Chloroforme (CHCl ₃)	non détectable
Chlorure de vinyle (CH ₂ CHCl)	moins de 136 ppm
Chlorure de méthylène (CH ₂ Cl ₂)	non détectable
Benzène (C ₆ H ₆)	Trace

P : émanation naturelle du puits pendant la grande saison des pluies

S : émanation naturelle du puits pendant la grande saison sèche

3. Résultats

3.1 Composition du biogaz par saison

Les moyennes des différentes mesures effectuées (exprimées en %) par saison, par puits et pour chaque type de dépôt, sont résumées dans le tableau I.

Les proportions de CH₄ et de CO₂ sont prédominantes, avec des taux d'émanation plus élevés de CH₄. En effet, pour les deux saisons, le taux moyen de production de CH₄ est de 69,5 % dans les dépôts anciens, et 50,4 % dans les récents dépôts, soit un écart de 19 %, alors que celui de CO₂ est respectivement de 25 % et de 22,5 %, soit un écart de 2,5 %. D'autre part, dans les anciens dépôts, le pourcentage

moyen de CH₄ en saison des pluies est sensiblement identique à celui de la saison sèche (respectivement 69 % et 70 %), alors que ceux de CO₂, O₂ et N₂ en saison sèche sont relativement supérieurs à ceux de la saison des pluies. Cependant, dans les récents dépôts, le taux de fluctuation des différents types de gaz des deux saisons est pratiquement nul.

Par ailleurs, le méthane et le dioxyde de carbone, principaux gaz à effet de serre, représentent en moyenne, pour les deux saisons en volume combiné, 94,5 % de l'émanation totale de gaz dans les dépôts anciens, et 73 % dans les dépôts récents.

Quant au dioxygène et au diazote, on observe une très faible émanation en saison des pluies dans les

anciens dépôts (respectivement 0,1 % et 0,2 %). En revanche, dans les déchets récents, aussi bien en saison sèche qu'en saison des pluies, le taux d'émanation du diazote représente plus de 15 % du volume de biogaz qui se dégage de la décharge, et celui du dioxygène, plus de 5 %. Ces résultats indiquent clairement que les dépôts anciens sont des milieux véritablement anoxiques en saison des pluies.

D'autre part, les rapports CH_4/CO_2 , indicateurs du déroulement de la fermentation, sont largement supérieurs à 2 pour l'ensemble des puits, et même supérieurs à 3 au niveau de certains puits en saison sèche dans les anciens déchets. D'ailleurs, pour ces déchets, en saison sèche, les rapports sont généralement supérieurs à ceux de la saison des pluies. Le phénomène inverse est observé au niveau des déchets récents.

En outre, les concentrations des composés organiques volatils, mesurées dans les 5 puits, sont respectivement, moins de 136 ppm pour le chlorure de vinyle, moins de 2 ppm pour l'hydrogène sulfuré, et des traces de benzène, aussi bien en saison sèche qu'en saison des pluies. Ces concentrations sont inférieures aux valeurs limites d'exposition de 3 000 ppm (INERIS, 2003) pour le chlorure de vinyle et de 10 ppm (INRS, 2005) pour l'hydrogène sulfuré.

3.2 Émanation spatio-temporelle du biogaz sur le site de la décharge

L'homogénéité ou l'hétérogénéité de la distribution du biogaz entre les différentes saisons a été testée avec le test de Fisher. Le test de Fisher, ou test F, est un test d'hypothèse statistique qui permet de tester l'égalité de deux variances (ou moyennes) en faisant le rapport des deux variances (ou moyennes) et en vérifiant que ce rapport ne dépasse pas une certaine valeur théorique que l'on cherche dans la table de Fisher (ou table de Snedecor). Si F est plus grand que la valeur théorique, on rejette l'hypothèse d'égalité des deux variances. Ici, nous avons appliqué le test F aux taux d'émissions entre les différentes saisons, par type de déchets, et les résultats sont présentés dans le tableau II.

Pour les dépôts récents, l'application de l'analyse de variance montre que la différence de fluctuation entre les émissions des deux saisons au seuil de 95 % n'est pas significative pour l'ensemble des polluants. L'hypothèse d'émission relativement identique entre la saison des pluies et la saison sèche est acceptable pour l'ensemble des polluants de ce type de dépôt. Le taux de production du biogaz en saison sèche serait donc sensiblement identique à celui de la saison des pluies. Ces résultats indiquent que le site d'enfouissement d'Akouédo possède des potentiels

Tableau II. Test de comparaison des proportions d'émanation des deux saisons.

Comparison test of proportions of emanations of the two seasons.

	Nature du gaz	Nature du test F	Résultats du test F	
Anciens dépôts	CH ₄	Test F calculé	08,00	Significatif
		Test F théorique	7,71	
	CO ₂	Test F calculé	4,8	Non significatif
		Test F théorique	7,71	
	O ₂	Test F calculé	86,13	Significatif
		Test F théorique	7,71	
	N ₂	Test F calculé	3,08	Non significatif
		Test F théorique	7,71	
Dépôts récents	CH ₄	Test F calculé	2,42	Non significatif
		Test F théorique	18,51	
	CO ₂	Test F calculé	1,08	Non significatif
		Test F théorique	18,51	
	O ₂	Test F calculé	1,44	Non significatif
		Test F théorique	18,51	
	N ₂	Test F calculé	1,33	Non significatif
		Test F théorique	18,51	

importants de transformation anaérobie au niveau des récents dépôts. Cependant, à cause de la présence continue de lixiviat dans ces dépôts, la décomposition anaérobie du site pourrait être latente, ce qui justifierait la faible production observée dans ces dépôts par rapport à ceux des anciens dépôts.

Pour ces derniers, l'application de l'analyse de variance montre que la différence de fluctuation entre les émissions de la saison des pluies et de la saison sèche n'est significative, au seuil de 95 %, que pour le méthane et le dioxygène. L'hypothèse d'émission homogène, quelle que soit la saison, n'est donc acceptable que pour CO_2 et N_2 . Pour ces dépôts, l'absence de lixiviat aurait vraisemblablement une incidence sur la différence de fluctuations observées au niveau des émanations de CH_4 et d' O_2 .

Discussion

La mesure de l'émanation naturelle du biogaz pendant les deux saisons (grande saison sèche et grande saison des pluies) donne des proportions élevées de CH_4 et de CO_2 . Ces deux gaz représentent respectivement 69,5 % (moyenne des deux saisons) et 25 % (moyenne des deux saisons) de l'émanation totale dans les dépôts anciens ; soit 94,5 % pour les deux gaz. Dans les dépôts récents, l'émanation de ces deux gaz représente respectivement 50,4 % (moyenne des deux saisons) et 22,5 % (moyenne des deux saisons), soit 73 %.

Ces taux globaux d'émanation (94,5 % dans les anciens dépôts et 73 % dans les dépôts récents) sont supérieurs à celui des décharges de l'Union européenne estimé à 64 % (Biogas China, 2006). Aussi, le taux d'émanation du CH_4 est largement supérieur à celui du Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Crégy-les-Meaux (France) qui est de 50 % (Balland et Legrand, 2001). Cette décharge se distingue des autres décharges européennes par son ancienneté (ouverte depuis 1970) et par l'absence totale de périmètre d'isolement qui rend insupportables les nuisances et les risques, tout comme pour la décharge d'Akouédo.

Ces deux gaz sont des gaz à effet de serre, participant au réchauffement global de la planète. Le potentiel de réchauffement du méthane est 21 fois celui du CO_2 (Dessus *et al.*, 2008). En conséquence, nous pouvons affirmer que la décharge d'Akouédo constitue une grande source d'émission de gaz à effet de serre. D'ailleurs, selon Ouattara (2013), en Côte d'Ivoire, une hausse moyenne de la température annuelle de 0,3 °C/an se serait signalée depuis la décennie 1990. D'autre part, le fort taux d'émanation naturelle

du méthane s'avère inquiétant dans la mesure où, en plus d'être un gaz à effet de serre, il est inflammable pour des concentrations comprises entre 5 % et 15 % dans l'air. La base ARIA a recensé 151 accidents qui sont survenus en France jusqu'au 1^{er} juillet 2004 dans les décharges. Près de 59 % des événements recensés dans les sites d'enfouissement sont des incendies, plus fréquents pendant les mois les plus chauds de l'année (Broz, 2006).

Par ailleurs, il existe peu d'études statistiques fiables reliant des pathologies définies à des variations extrêmes des conditions climatiques. La seule prévision médico-météorologique qui paraisse être confortée par de nombreuses études, concerne l'infarctus du myocarde, dont l'incidence est fonction du climat. Il est plus fréquent en période hivernale dans les régions très froides ou froides, et en été sous les climats chauds (GRACES, 2006).

Rappelons que, certes, le biogaz contient principalement du méthane et du dioxyde de carbone, mais il peut contenir des composés azotés (NH_3 , N_2), et également des composés soufrés (H_2S , mercaptans), de l'hydrogène et produits intermédiaires de fermentation : alcools, acides, esters... (Servais, 2001 ; Afsset, 2008). La proportion du méthane et du dioxyde de carbone dépend de la nature du substrat, et précisément de la proportion carbone/hydrogène/oxygène/azote (CHON). Par exemple, un substrat riche en C et H produit une forte proportion de méthane, jusqu'à 90 %. Un substrat moyennement riche, comme la cellulose, produit un biogaz contenant typiquement 55 % de méthane et 45 % de gaz carbonique.

En Côte d'Ivoire, les déchets de la décharge d'Akouédo sont constitués de plus de 60 % d'ordures ménagères (Haupt et Stoll, 1996 ; Sané, 2002). Le substrat est donc riche en matière organique (Sané, 2002) et donc en C et H. Cette forte teneur organique justifie le potentiel élevé d'émission de méthane et de gaz carbonique.

D'autre part, le rapport CH_4/CO_2 obtenu à la décharge d'Akouédo est supérieur à 2. Ce rapport est indicateur du déroulement de la fermentation. Il est généralement très stable dès lors que la fermentation est bien établie. Il est en général de 1,3 à 1,4, pour les déchets composés principalement de cellulose (Servais, 2001). À Akouédo, ce rapport est largement supérieur à 2. Il traduit non seulement la richesse organique des déchets (Sané, 2002), mais confirme la grande capacité de la décharge à produire le méthane (volume $\text{CH}_4 > 2$ volume CO_2). Aussi indique-t-il que le déroulement de la fermentation au sein de la décharge est bien établi.

Toutefois, l'observation des différents taux de production de ces deux gaz par type de dépôt rend compte qu'il est relativement stationnaire par saison. La différence est seulement marquée entre type de dépôts. La production de CH_4 et de CO_2 en saison sèche et en saison des pluies, des anciens dépôts, est supérieure à celle des récents dépôts. Cependant, quel que soit le type de dépôt, le taux de production de méthane est supérieur à 50 % et traduit effectivement la grande capacité de la décharge d'Akouédo à le produire.

Les déchets de la ville d'Abidjan sont composés de 66,43 % de matières biodégradables (Sané, 2002). Or la teneur en carbone organique contenu dans les déchets est reliée à l'état de dégradation du déchet. Cette valeur évolue au cours de la dégradation, une partie du carbone étant lixiviée ou transformée en biogaz. La teneur en matière organique évolue donc avec l'âge du déchet, du fait de la dégradation. Toutefois, pour deux déchets de même âge, prélevés sur des sites différents, les valeurs peuvent être très variables. Cette disparité est liée à la nature hétérogène des déchets, aux conditions initiales d'enfouissement, au mode d'exploitation, aux conditions climatiques, etc. La connaissance de ce paramètre permet d'apprécier le potentiel polluant de la décharge, ou la charge organique du massif de déchets. Un déchet ménager est supposé contenir 15 %, 55 % et 30 % respectivement de matière organique facilement, moyennement et lentement biodégradable (Aina, 2006). La forte variabilité des constantes d'hydrolyse est donc notable. Elle est liée à certains facteurs tels que la surface réactionnelle, la température, l'humidité et même le pH, et justifierait la forte productivité de biogaz au niveau des anciens dépôts. Les déchets de ces dépôts, malgré leurs natures essentiellement fermentescibles, seraient constitués majoritairement de déchets moyennement ou lentement biodégradables. Ce facteur expliquerait le taux relativement élevé de biogaz produit par ces dépôts. D'autre part, en saison des pluies, le taux d'humidité relativement élevé aurait également un effet favorable à la production de biogaz. Pendant cette saison, l'eau de pluie qui s'infiltre dans la masse de déchets a l'avantage d'augmenter l'humidité, d'entraver la circulation d'air et de rehausser la digestion anaérobie, car l'humidité a une grande influence sur l'action des bactéries (Amarante, 2010). La production de méthane est le résultat direct de l'activité des bactéries méthanogènes dégradant la matière organique des déchets ménagers (Rouez, 2008). Cette activité est dépendante d'un grand nombre de facteurs d'influence, dont le pH et la teneur en eau sont vraisemblablement les variables les plus influentes en condition d'enfouissement (Barlaz, 1996). Aussi, non seulement la présence d'eau est indispensable à l'activité bactérienne, mais

ses déplacements constituent un vecteur de colonisation microbienne et un vecteur de dispersion des composés chimiques, favorisant l'apport de substrats tout comme la dilution d'inhibiteurs (El-Fadel *et al.*, 1999 ; Aguilar, 2000). Des études montrent que des taux d'humidité supérieurs à 60 % augmentent la production de gaz, qui atteint un maximum environnant 80 %. Au-delà de cette concentration, la production se stabilise (Amarante, 2010) et justifie la stabilisation dans la production de biogaz au niveau des récents dépôts. Au niveau de ces dépôts, Adjiri, au cours de ses travaux réalisés en 2010, a noté une présence continue de lixiviats. Toutefois, les émanations de biogaz dans les puits de ces dépôts sont supérieures à 50 % et indiquent une grande capacité de fermentation des déchets de la décharge au niveau de ces dépôts, mais cette production est étouffée par la présence continue de lixiviats. Ce facteur explique la différence non significative exprimée par le test de Fisher pour l'ensemble des polluants de ces dépôts, pour les deux saisons. La présence continue de lixiviats au niveau de ces dépôts fait donc que la production de biogaz dans ces dépôts est indépendante des saisons.

D'autre part, le site d'enfouissement de la décharge d'Akouédo, ne possédant pas de couverture imperméable, occasionne l'accumulation des eaux de pluies dans la masse biodégradable des anciens dépôts. Ainsi, au-delà de la concentration maximum de 80 %, les eaux de pluies seraient également à l'origine de la stabilisation de la production de biogaz autour de 69 % au niveau de ces dépôts. Par ailleurs, l'émanation du diazote est plus importante dans les dépôts récents. En effet, les déchets ont une grande capacité à convertir le nitrate ou le nitrite en diazote gazeux (dénitrification) sous l'action de micro-organismes (Vassilia *et al.*, 2006). Cependant, dans la plupart des réactions, les nitrites ont une dénitrification plus rapide et plus complète que les nitrates (Vassilia *et al.*, 2006). Kouamé (2007) et Adjiri *et al.* (2008), dans des travaux effectués sur le site de la décharge d'Akouédo, ont obtenu de faibles concentrations de nitrites dans les lixiviats d'Akouédo. Ainsi, se référant aux travaux de Vassilia *et al.* (2006), ces faibles teneurs seraient dues à la conversion des nitrites en diazote gazeux du fait de la présence continue de lixiviat. Dans ces récents dépôts, selon les travaux de Adjiri (2010), le niveau du lixiviat est élevé. La circulation du lixiviat à travers la masse de déchets solides a l'avantage d'augmenter l'humidité et de rehausser la digestion anaérobie de la fraction organique du déchet (El-Fadel, 1999 ; Yuen, 1999). Cependant, l'accumulation de l'ammonium dans le lixiviat a été reconnue comme étant problématique à la biodégradation, pour la simple raison qu'il n'y a aucun processus d'élimination de l'ammonium dans les conditions anaérobies (Vassilia *et al.*, 2006). À la décharge d'Akouédo, selon Adjiri *et al.* (2008), la teneur en ammo-

nium dans les lixiviats au niveau des récents dépôts, est suffisamment élevée (564 mg/L), largement supérieure à la norme fixée à 10 mg/L par le Centre Ivoirien d'Antipollution (CIAPOL) pour les eaux de rejet. Cette forte accumulation d'ammonium, entretenue par la présence continue de lixiviats, pourrait également induire l'inhibition de la méthanisation (Wens *et al.*, 2001) et une baisse de l'émanation de CH₄ dans ces dépôts.

Aussi, les émissions de composés organiques volatils sur le site de la décharge sont faibles. Ces derniers représentent moins de 0,04 %, aussi bien pendant la saison sèche que pendant la saison des pluies.

Rappelons que le biogaz contient également d'autres composés chimiques. Selon l'Afsset (2008), 17 études ont fourni des données de composition. L'ensemble des informations fournies par ces auteurs a permis d'isoler 256 composés susceptibles d'être présents dans les différents types de biogaz. À Akouédo, ces composés représentent en moyenne 2 % dans les anciens dépôts et 5 % dans les récents dépôts, alors qu'ils représentent 36 % dans les décharges européennes (Biogas China, 2006).

Aussi le biogaz brut est-il issu d'un procédé microbiologique de digestion anaérobie. Ce procédé nécessite une flore anaérobie spécifique qui peut se retrouver en aérosol dans le biogaz (Moletta, 2005). Cette microflore du biogaz est constituée essentiellement de bactéries, d'eucaryotes et de virus. L'étude par culture identifie une majorité pathogène, opportuniste (Vinneras *et al.*, 2006). Les toxines émises par ces micro-organismes conduisent à des symptômes respiratoires : fièvre d'inhalation ou ralentissement de la fonction respiratoire suivant le type d'exposition aiguë ou chronique (Afsset, 2008). Ces symptômes ont été observés par Adjiri (2010) chez les populations vivant aux alentours de la décharge d'Akouédo.

Conclusion

Le biogaz émanant de la décharge se compose essentiellement de CH₄ (69,5 % et 50,4 %, correspondant respectivement à l'émanation totale des anciens et récents dépôts (moyenne des deux saisons)) et de CO₂ (25 % et 22,5 %, respectivement la moyenne des deux saisons des anciens et récents dépôts). Le taux de production du CH₄ par rapport au CO₂ est élevé et supérieur à 2, ce qui traduit l'anoxie de la décharge et sa grande capacité à produire le méthane. Cette capacité semble être maintenue latente par la présence continue de lixiviats au niveau de récents dépôts. Au niveau des anciens dépôts, c'est plutôt en saison des pluies que ce phénomène de latence est observé. Ce phénomène a l'avantage de constituer, de ce fait, une source inhibitrice de production de gaz à effet de serre. Toutefois, quels que soient la saison et le type de déchets, le taux de production de méthane est supérieur à 50 %, et celui du CO₂ à 20 %, soit supérieur à 70 % pour les deux gaz, malgré le phénomène de latence observé. Ces différentes observations permettent de dire que le site de la décharge d'Akouédo est une importante source de production de gaz à effet de serre. L'application du test F au niveau des récents dépôts indique une différence de fluctuation non significative entre les proportions de gaz. Dans les dépôts anciens, la non-significativité n'est observée qu'au niveau des rapports du CO₂ et du N₂. En conséquence, nous pouvons dire que l'émanation naturelle de biogaz est indépendante du type de saison dans les dépôts récents. Par contre, dans les anciens dépôts, des teneurs en eaux de pluies supérieures à 80 % dans la masse de déchets semblent avoir une influence inhibitrice sur le taux de production de méthane.

Références bibliographiques

Adjiri, O. (2010). Évaluation environnementale et du risque sanitaire liée à la présence d'une décharge sauvage en secteurs résidentiels dans un pays en voie de développement : cas de la décharge d'Akouédo (Abidjan, Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat unique de l'université Félix Houphouët Boigny, Cocody, 230 p.

Adjiri, O., Gone, D., Kouamé, K. *et al.* (2008). Caractérisation de la pollution chimique et microbiologique de l'environnement de la décharge d'Akouédo (Abidjan, Côte d'Ivoire), *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, n° 2(4), p. 401-410.

AFSSET. (2008). Évaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel. Rapport d'expert, Paris, 185 p.

Aguilar-Juarez, O. (2000). Analyse et modélisation des réactions biologiques aérobies au cours de la phase d'exploitation d'un casier d'un centre d'enfouissement technique. Thèse de doctorat spécialité Génie des Procédés de l'INSA, Toulouse, 233 p.

AINA, P. (2006). Expertises des centres d'enfouissement techniques de déchets urbains dans les PED : contributions à l'élaboration d'un guide méthodologique et à sa validation expérimentale sur sites. Thèse de l'université de Limoges, 236 p.

Amarante, L. (2010). Biométhanisation des déchets putrescibles municipaux-technologies disponibles et enjeux pour le Québec. Rapport de Maîtrise de l'université de Sherbrooke, 99 p.

Balland, P., Legran, H. (2001). Les risques engendrés par la décharge de Crégy-les-Meaux (77) et les dispositions de précaution à envisager. Rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement (IGE), Paris, 56 p.

Barlaz, M. (1996). Microbiology of solid waste landfills, chap. 2, In Microbiology of solid waste. Edited by Palmisano & Barlaz, CRC Press, Boca Raton, 240 p.

Belhaj, S. (2004). Présentation du calcul de la ligne de base du projet pilote MDP : Décharge Akreuch. Rapport de présentation clean tech, rabat, 23 P.

BIOGAS CHINA. (2006). Énergies renouvelables : le biogaz en Chine. Communiqué de presse de l'Institute of Science in Society (ISIS), London, 23 p.

Bitton, G. (2004). Résumé des activités de surveillance du biogaz. Rapport Biothermica Technologies Inc., Montréal, 15 p.

Broz, J. (2006). Étude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel. Rapport INERIS, Paris, 34 p.

Dessus, B., Laponche, B., Le Treut, H. (2008). Réchauffement climatique : importance du méthane. Rapport CNRS, Paris, 7 p.

El-Fadel, M. (1999). Leachate recirculation effects on settlement and biodegradation rates in MSW landfills, *Environmental Technology*, n° 20, p. 1-13.

Eden. (2000). Étude biogaz de décharge : d'un problème environnemental à une solution énergétique. Rapport d'étude de l'association EDEN, France, 12 p.

Erses, SA, Mohammad, FA, Turgut, Ot *et al.* (2005). Determination of solid waste sorption capacity for selected heavy metals in landfills, *Journal of Hazardous Materials B*, n° 121, p. 223-232.

GRACES (Groupe de Réflexion Académie et Conseil Économique et Social). (2006). Partager la connaissance et ouvrir le dialogue : le changement climatique. Rapport d'activité, Paris, 30 p.

Haupt, F., Stoll, H. (1996). Gestion des déchets industriels et dangereux dans les zones urbaines en Afrique de l'Ouest. Rapport Lux-développement, Abidjan, 108 p.

INERIS. (2003). Émission accidentelle de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère : seuil de toxicité aiguë. Chlorure de vinyle. Rapport INERIS, Verneuil-en-Halatte, 2 p.

INRS. (2005). Recommandation R 420. Impression Corlet, Paris, 4 p.

Jeanneret, C. (2006). Énergies, dossier Pédagogique. Environnement Info, Département de l'instruction publique de Genève, 86 p.

Kouadio, G., Dongui, B., Trokourey, A. (2000). Détermination de la pollution chimique des eaux de la zone de la décharge d'Akouédo (Abidjan-Côte d'Ivoire). *Revue Science et Technologie – ENS-CI*, Série A-01, p. 34-41.

Kouame, IK. (2007). Caractérisation de la pollution physico-chimique des eaux dans la zone d'Akouédo et étude du risque de contamination de la nappe d'Abidjan par un modèle de simulation des écoulements et du transport des polluants, thèse de Doctorat de l'université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, 212 p.

Moletta, M. (2005). Caractérisation de la diversité microbienne aéroportée des biogaz. Thèse de doctorat de l'université Montpellier 2, 195 p.

Notre Planete. (2006). Énergie renouvelable. La revue du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), vol. 16, n° 4, Nairobi, Kenya, 30 p.

Odotech. (2004). Projet d'aménagement d'une cellule d'enfouissement technique à St-Thomas : évaluation de l'impact de la qualité de l'air et évaluation préliminaire du risque pour la santé. Rapport sectoriel qualité de l'air, Berthierville, 157 p.

Ortega, R. (2009). Étude du traitement des siloxanes par adsorption sur matériaux poreux : application au traitement des biogaz. Thèse de doctorat de l'école des Mines de Nantes, 164 p.

Ouattara, A.; Dayoro, K.; FOKOU, G. (2013). Perception des effets sanitaires du changement climatique par les populations urbaines défavorisées de Côte d'Ivoire. Conférence internationale Africa Écosanté 2013, Abidjan, 15 p.

Poulleau, J. (2002). Caractérisation des biogaz. Bibliographie, Mesures sur sites. Rapport, INERIS, 31 p.

Rouez, M. (2008). Dégradation anaérobie de déchets solides : caractérisation, facteurs d'influence et modélisation. Thèse de l'école doctorale de chimie de spécialités Sciences & Techniques du Déchet de l'INSA, Lyon, 2006, 259 p.

Sane, Y. (2002). La gestion des déchets à Abidjan : un problème récurrent et apparemment sans solution, *Revue africaine de gestion et d'évaluation environnementale*, n° 4(1), p. 11-22.

Servais, C. (2001). Supplément énergie plus. Dossier biogaz de Énergie Plus, n° 268, Paris, 34 p.

Vassilia, V, Ponthieu, M, Giulia, B *et al.* (2006). Nitrate and nitrite injection during municipal solid waste anaerobic biodegradation. *Waste Management*, n° 20(2), 14 p.

Vigneault, H. (1999). Modélisation numérique du rayon d'influence des puits de captage des biogaz dans les sites d'enfouissement sanitaires. Mémoire de maîtrise ès sciences de l'université de Québec, 150 p.

Vinneras, B., Schonning, C.; Nordin, A. (2006). Identification of the microbiological community in biogas systems and evaluation of microbial risks from gas usage. *Science of Total Environment*, n° 367(2-3), p. 606-615.

Wens, P., Vercauteren, T., De Windt, W *et al.* (2001). Factors inhibiting anaerobic degradation in a landfill. Eighth International waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Cagliari, p. 13-20.

Yuen, S. (1999). Bioreactor land filling promoted by leachate recirculation: a full scale study. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Melbourne, Melbourne, 244 p.