



HAL
open science

Evaluation des impacts environnementaux d'un centre de stockage de déchets ménagers en activité sur la base de la caractérisation des flux de matière entrants et sortants : Application au site de Nkolfoulou, Yaoundé, Cameroun

Emmanuel Ngnikam, Fouad Zahrani, Pascale Naquin, Bruno K Djeutcheu, Rémy Gourdon

► **To cite this version:**

Emmanuel Ngnikam, Fouad Zahrani, Pascale Naquin, Bruno K Djeutcheu, Rémy Gourdon. Evaluation des impacts environnementaux d'un centre de stockage de déchets ménagers en activité sur la base de la caractérisation des flux de matière entrants et sortants : Application au site de Nkolfoulou, Yaoundé, Cameroun. Environnement, Ingénierie & Développement, 2012, N°61 - Juin 2012, pp.18-29. 10.4267/dechets-sciences-techniques.2618 . hal-03171752

HAL Id: hal-03171752

<https://hal.science/hal-03171752>

Submitted on 17 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Evaluation des impacts environnementaux d'un centre de stockage de déchets ménagers en activité sur la base de la caractérisation des flux de matière entrants et sortants : Application au site de Nkolfoulou, Yaoundé, Cameroun.

NGNIKAM Emmanuel¹, ZAHRANI Fouad², NAQUIN Pascale³, K.DJEUTCHEU Bruno⁴, GOURDON Rémy²

1. Laboratoire Energie Eau et Environnement (L3E) de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé. B.P. 8390 Yaoundé – Cameroun. Tel/fax : (237) 22 22 45 47 Email : emma_ngnikam@yahoo.fr

2. Université de Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale (LGCIE), bâtiment Sadi Carnot, 20 avenue A. Einstein,, 69621 Villeurbanne Cedex, France

3. POLDEN Insavalor; PO Box 52132 F- 69603 Villeurbanne, Cedex, France et CEFREPADE

4. Hygiène et Salubrité du Cameroun (HYSACAM)

RÉSUMÉ

Cette étude évalue les flux de matière entrants et sortants d'une décharge en zone tropicale humide et leurs impacts sur le milieu naturel et humain. Les paramètres de flux analysés concernent : les masses et caractéristiques des déchets entrants, la production de lixiviats et leur composition, la production de méthane et la pluviométrie. Les caractéristiques de l'environnement autour du site sont prises en compte pour l'approche des impacts environnementaux, dont le suivi est réalisé en amont et aval du point de rejet. Une méthodologie d'évaluation des flux entrants et sortants est proposée pour permettre quelle que soit la nature et la localisation du site, d'évaluer les impacts potentiels du centre de stockage sur les différents compartiments environnementaux.

Au démarrage de l'étude, le site sélectionné (**Nkolfoulou à Yaoundé**) avait déjà reçu 2,13 millions de tonnes de déchets, dont 66 % de la masse humide sont constitués de matières biodégradables. Notre étude montre que le site génère en moyenne 450 m³/j de lixiviats, dont seulement 54 m³ sont collectés et rejetés dans la rivière sans aucun traitement. Les impacts de ces rejets sont réels sur les eaux de surface dans la mesure où ce lixiviat est très chargé en DCO (700 à 2500 mg/l) et DBO₅ (400 à 700 mg/l) et, dans une moindre mesure cependant, en métaux lourds. On note dans les lixiviats la présence de germes de contamination fécale et de bactéries pathogènes. L'impact du rejet des lixiviats non traités dans la rivière reste perceptible à une distance de 100 m en aval du point de rejet. Le potentiel moyen de production de méthane des déchets entrants sur le site est de 79 kg de CH₄/tonne humide de déchets. Sur cette base, les émissions cumulées de méthane sont estimées à un équivalent de 1,9 millions de tonnes de CO₂ entre 2007 et 2030. Un projet de captage et brûlage du biogaz de la décharge de Nkolfoulou a été enregistré au MDP et permettra à l'horizon 2030 de capter 1,6 millions de tonnes équivalent CO₂ issues de méthane.

Mots clés : centre de stockage, déchet ménager, décharge, lixiviat, gaz à effet de serre, impact, environne-

ment.

ABSTRACT

This study evaluates the environmental and social impact of a landfill in the tropical humid zone in Africa. The different parameters analyzed are : the mass and characteristics of waste receive in the landfill, leachate generation and composition, methane production, and rainfall. The characteristics of the environment around the site are considered to approach environmental impacts, including impact monitoring is carried out upstream and downstream of the discharge point.

A methodology for assessing flow in and out is proposed to allow whatever the nature and location of the dumpsite to assess the potential impacts of the waste disposal on the different environmental compartments.

At the beginning of the study, Nkolfoulou landfill in Yaounde was selected. This had received 2.13 million tons of waste, of which 66 % of the wet mass are made of biodegradable materials. Our study shows that the site generates an average of 450 m³ / day of leachate, only 54 m³ is collected and discharged into the river without any treatment. Impacts of these discharges are real on the surface water to the extent that the leachate is COD load (700 to 2500 mg / l) and BOD₅ (400 to 700 mg / l) and to a lesser extent, however, heavy metal. We note the presence in this leachate, bacteria of fecal contamination and pathogens. The impact of the discharge of untreated leachate into the river is visible at a distance of 100 m downstream of the discharge point.

The average potential methane production of waste entering the site is 79 kg of wet waste CH₄ per ton. On this basis, the cumulative emissions of methane are estimated at an equivalent of 1.9 million tons of CO₂ equivalent between 2007 and 2030. A project to capture and burn biogas from the landfill Nkolfoulou was recorded in the CDM and in 2030 will capture 1.6 million tonnes of CO₂ equivalent from methane.

Keywords: landfill, household waste, landfill leachate, greenhouse gas emissions, environmental impact.

INTRODUCTION

Dans les pays en développement, les centres de stockage de déchets se résument le plus souvent à des décharges à ciel ouvert, présentées parfois comme des « sites provisoires » par les autorités locales, mais qui ont généralement des impacts négatifs sur le milieu naturel et les populations riveraines.

La présente étude concerne la décharge contrôlée de Nkolfoulou, située à 16 km de Yaoundé, capitale du Cameroun, peuplée d'environ 2,3 millions d'habitants en 2010. Le taux moyen d'accroissement de la population de la ville est de 5,7 % [BUCREP, 2010]. Cette décharge reçoit environ 1000 tonnes de déchets par jour provenant principalement des villes de Yaoundé et Soa. Le site a été mis en exploitation en 1989 et a connu une fermeture temporaire entre 1991 et 1998. Depuis sa réouverture en 1998, deux casiers ont été mis en exploitation. Cette décharge est située dans une zone équatoriale à 4 saisons (2 saisons de pluies qui alternent avec deux saisons sèches). La période pluvieuse couvre en moyenne 8 à 9 mois dans l'année, avec une moyenne de 1500 mm enregistrée sur la période de 1980 à 2005.

Les coupes géologiques réalisées en 2003 [Abuhngiendo, 2004] montrent que le sol de la décharge de Nkolfoulou est légèrement sableux. Le fond de casier repose sur des cuirasses latéritiques qui sont imperméables. Cependant les cuirasses sont en général discontinues dans l'espace et laissent des poches permettant l'infiltration des eaux [Abuhngiendo, 2004]. La végétation naturelle de la région de Nkolfoulou est constituée d'une savane arbustive et de zones de prairies. Le site de Nkolfoulou est situé dans le bassin versant de la Foulou, avec un réseau hydrographique simple, composé de quelques affluents localisables (Ototong, Ebengui, Akoo, Voum, etc.). La rivière Mfoulou est le milieu récepteur des rejets hydriques de la décharge de Nkolfoulou et des eaux de ruissellement d'origines diverses [MINMEE, 2004].

A partir de la caractérisation des déchets reçus sur le site de la décharge de Nkolfoulou, du système d'exploitation mis en place et de l'estimation des flux sortants, la présente étude vise à évaluer l'impact de ce système sur les eaux de surface et souterraines. L'impact de la décharge sur les populations qui travaillent sur le site a été étudié par ailleurs.

MATÉRIELS ET MÉTHODES MIS EN PLACE POUR L'ÉVALUATION DES PARAMÈTRES

La méthodologie utilisée est adaptée à chaque paramètre. Quatre méthodes de collecte de données et d'information ont été utilisées : les enquêtes, les mesures, les calculs et les analyses de laboratoire. Nous présentons ci-après

les méthodes utilisées pour renseigner les différents paramètres, en distinguant les paramètres liés aux conditions extérieures, le flux entrant, le flux sortant et l'analyse des impacts environnementaux.

2.1 – Paramètres caractérisant les flux des déchets entrants.

2.1.1 – Flux et origine des déchets.

Pour déterminer l'évolution du flux de déchets, il est indispensable de connaître le tonnage des déchets entrant sur le site. La décharge de Nkolfoulou est équipée d'un pont bascule depuis janvier 2003 et c'est donc le résultat des pesées effectuées par l'exploitant qui nous a permis d'évaluer le gisement des déchets entrants.

Il est par ailleurs nécessaire de distinguer les déchets suivant leur origine : déchets ménagers, industriels banals, agricoles, spéciaux. Les origines des déchets sont déterminées à partir d'une fiche de questionnaire qui est remplie par les gardiens pendant l'admission des déchets sur le site de la décharge. Ce questionnaire a été rempli au moins sur une durée d'une semaine pendant chaque saison.

2.1.2 – Caractéristiques physiques des déchets

Composition des déchets : la méthode utilisée pour la caractérisation des déchets entrants repose en grande partie sur le MODECOM [ADEME, 1993].

Nous avons modifié la méthodologie MODECOM pour l'adapter aux déchets des villes des pays en développement [Ngnikam, 2000]. Les adaptations portent essentiellement sur le tri qui s'est effectué sur une table, avec une séparation seulement des fractions fines (< 20 mm) à l'aide d'un tamis de mailles rondes. Tous les constituants au dessus de 20 mm sont triés manuellement et classifiés en 11 catégories en vue de déterminer la composition et mesurer l'humidité. Le choix des camions à trier s'est fait sur la base d'un sondage stratifié. La ville a été divisée en strates homogènes selon le standing de l'habitat et le type d'activités dominantes. Dans le cas de Yaoundé, les catégories des déchets sont définies à partir de cinq strates homogènes d'habitation (bas standing, lotissements municipaux, moyen standing, haut standing et zone commerciale). Le tri manuel des différentes catégories de déchets est fait sur un échantillon minimal de 500 kg par strate prélevé par pelletage alterné sur un camion de 5 à 7 tonnes [Ngnikam, 2000].

La densité des déchets entrants a été mesurée à partir de pesées effectuées sur le pont bascule et par catégorie de camion. La densité moyenne des déchets entrants a été calculée en pondérant la densité par type de camions, par le nombre total de camion de chaque catégorie reçus sur

le site pendant la période de campagne. Les densités ont été mesurées en saison des pluies et en saison sèche. L'humidité des déchets entrants a été mesurée sur des échantillons prélevés après le tri manuel. Sur chaque catégorie de déchets triés, nous avons choisi des échantillons de 1 à 5 kg pour le séchage à l'étuve à une température de 90°C jusqu'à masse constante.

2.1.3 – Comportement des déchets à l'eau

La méthode recommandée dans la bibliographie consiste à isoler une balle de déchets (0,5 à 1 m³) sur un sol étanche permettant la collecte des eaux de percolation. Cette balle de déchets devrait être confinée dans un géotextile placé dans une cage métallique pour permettre la pesée [ADEME, 2005]. Nous avons préféré une méthode plus simple en utilisant les matériels facilement mobilisables dans notre contexte :

- un tonneau de 250 litres (hauteur 0,96 m, diamètre 0,57 m, et section égale à 0,255 m²) ouvert sur sa partie supérieure ;
- un robinet soudé à la partie inférieure du tonneau afin de collecter l'eau relarguée ;
- une feuille métallique est fixée dans le tonneau à 0,3 m du fond. Elle est perforée (trous de 8 cm) pour permettre l'écoulement de l'eau. Elle supporte le poids du massif de déchets ;
- un tamis amovible (4 mm de maille), permet de retenir les particules fines. La couronne entourant le tamis permet de limiter les fuites de déchets fins sur les côtés ;
- la partie haute du tonneau est munie d'un couvercle amovible de diamètre inférieur à celui du tonneau (0,5 m). Plusieurs charges sont appliquées sur le couvercle afin de simuler les conditions de stockage (figure n°1).

Nous avons appliqué la technique du quartage avec utilisation de la pelle mécanique ou de la lame du bulldozer D7G pour séparer les ordures successivement en quatre parties. Au départ, environ quatre (04) tonnes, ensuite une (01) tonne et à la suite une demi (0,5) tonne. De l'échantillon d'une demi tonne, on effectue manuellement un pelletage pour obtenir entre 25 et 50 Kg de déchets pour le comportement à l'eau et entre 2 et 5 kg pour le test de teneur en eau.

Deux échantillons de 25 et 50 kg de déchets ont été prélevés pour déterminer le comportement à l'eau. Nous avons utilisé la méthode de pelletage fractionné pour extraire cette masse dans la benne sélectionnée au hasard à l'entrée de la décharge. Les extractions des pelletés se sont faites avec les demi-fûts. A la fin de la manipulation, des échantillons réduits de 2 à 5 kg sont prélevés pour l'analyse de la teneur en eau en laboratoire.

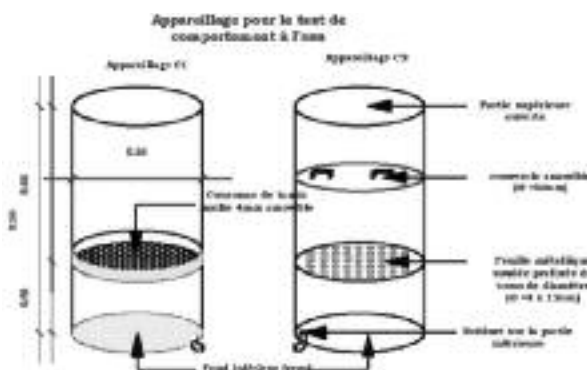


Figure n°1 : Appareillage pour le test de comportement à l'eau (ZAHIRANI, F. 2006)

Pour la mesure du comportement à l'eau, nous avons travaillé sur des échantillons séchés et sur des échantillons humides. Le principe consiste à introduire l'échantillon de déchets dans le fût. On injecte l'eau dans le fût jusqu'à immersion complète. Après deux heures de contact entre l'eau et les déchets, nous mesurons la quantité d'eau relarguée naturellement. La différence entre la quantité d'eau introduite, l'humidité intrinsèque et la quantité d'eau relarguée par les déchets permet de calculer la capacité au champ des déchets, qui peut se faire avec ou sans surcharge.

2.2 – Caractéristiques des sortants.

2.2.1 – Composition des lixiviats.

L'objectif ici est de déterminer la composition des lixiviats en molécules minérales et organiques et donc les risques éventuels liés à leur rejet dans le milieu naturel. Les paramètres retenus concernent : les indicateurs globaux (pH, conductivité, potentiel d'oxydo-réduction, DCO, DBO₅, MES, COT, etc.), les anions et cations majeurs, les métaux lourds, les paramètres bactériologiques. Chaque paramètre est analysé dans un laboratoire de référence (Centre Pasteur de Yaoundé) suivant le protocole normalisé. Les prélèvements ont été faits sur les lixiviats drainés par gravité dans le fond des casiers en exploitation.

2.2.2 – Bilan hydrique et production de lixiviats.

Le bilan hydrique est obtenu par calcul selon la le principe suivant : bilan des entrées en eau = bilan des sorties.

En entrée, nous avons : l'eau apportée par la pluie (P) (apport direct), l'eau de ruissellement entrée (R1), l'eau constitutive des déchets (teneur en eau) (Ed) et en sortie nous avons : l'évapotranspiration (ETR), l'eau de ruissellement sortie (R2) l'eau qui s'infiltre dans le substratum (I) et l'eau de lixiviation (L). Ceci permet d'établir l'équation de bilan :

$$P + R1 + Ed = I + L + R2 + ETR \pm S$$

Dans les décharges contrôlées, le drainage préalable du site et l'imperméabilisation du fond de casier permettent de négliger les termes I, R1 et R2. D'où :

$L = (P + Ed) - ETR \pm S$, où S est la variation du stock d'eau dans le casier.

Dans notre cas, les valeurs de P sont fournies par la pluviométrie locale (relevé de la station météo la plus proche pendant une période de 20 ans). La comparaison des valeurs de l'évaporation potentielle mensuelle (ETP) et des hauteurs de précipitations mensuelles (P) permet de calculer l'évapotranspiration réelle mensuelle (ETR). Dans une région équatoriale comme Yaoundé, c'est la méthode de Thornthwaite (1954) qui est utilisée pour l'estimation de l'évapotranspiration (ETR).

2.2.3 – Production de méthane.

Ce paramètre permet d'estimer le flux global du biogaz produit dans la décharge. Dans notre cas, c'est le modèle de l'IPCC qui a été utilisé. Il est basé sur l'équation de Rettenberger [ZAHIRANI, 2006].

Deux méthodes d'estimation des émissions de CH₄ provenant des décharges de déchets solides sont décrites dans les lignes directrices du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat) pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (GIEC, 1996) : la méthode par défaut est la méthode de décomposition de Premier Ordre (DPO). Les deux méthodes se différencient essentiellement par le fait que la méthode DPO produit un profil d'émissions temporel qui reflète mieux la structure du processus de dégradation dans le temps, alors que la méthode par défaut utilise l'hypothèse de l'émission de la totalité du CH₄ potentiel pendant l'année d'élimination des déchets (GIEC, 2000).

$$Q_{CH_4} = \sum_x A * k * MSWt(x) * L_0 * e^{-k(t-x)}$$

Avec :

t : année de l'inventaire (1994 pour le Cameroun)

x : années pour lesquelles des données d'entrée doivent être ajoutées

A = (1 - e^{-k})/k facteur de normalisation corrigeant la somme

k : taux d'émission de méthane (1/an)

MSWt (x) = Total des déchets solides municipaux entreposés l'année x (Gg/an)

L₀ : Potentiel d'émission de méthane = [FCM (x)*COD (x)* COD* F *(16/12) (Gg CH₄/Gg de déchets)] ;

FCM (x) : Facteur de correction de méthane pour l'année x (fraction) ;

COD (x) : Carbone organique dégradé (COD) pour l'année x (fraction) (Gg C/Gg de déchets) ;

COD_L : Fraction du COD libérée

F : Fraction par volume de CH₄ dans les gaz de décharge

Les taux de dégradation les plus rapides (k = 0,2, ou une demi-vie d'environ 3 ans) sont associés à des taux d'humidité élevés et des matériaux rapidement dégradables, tels que les déchets alimentaires. Les taux de dégradation les plus lents (k = 0,03, ou une demi-vie d'environ 23 ans) sont associés à un environnement plus sec et des déchets à dégradation lente, tels que le bois ou le papier.

La quantité des déchets entreposée (MSWt) est fournie par le bilan des pesées enregistrées sur le pont bascule pendant la période déterminée.

Le facteur de correction de méthane (FCM) permet de pondérer le taux de production de biogaz en fonction des conditions de mise en décharge des déchets. Les facteurs par défaut proposés par le GIEC sont de 1 pour les décharges contrôlées, 0,8 pour les décharges traditionnelles ayant plus de 5 m de déchets entreposés et 0,4 pour les décharges traditionnelles ayant moins de 5 m de déchets entreposés.

La fraction de carbone organique biodégradable (COD) se détermine par la caractérisation des déchets Cette fraction dépend de la composition des déchets. La méthodologie du GIEC (1996) propose la formule suivante pour estimer la fraction de carbone biodégradable à partir de la composition sur sec des déchets :

Fraction de COD = 0,4 x [fraction (papier/carton + tissus)] + 0,17 x Fraction (déchet de jardin) + 0,15 x Fraction (déchet de cuisine) + 0,3 x Fraction (bois et copeaux).

Toutes ces fractions sont fournies par la composition du déchet entrant.

Fraction de carbone organique dégradé libéré (COD_L) : la valeur donnée par les Lignes directrices du GIEC est de 0,77 ; cette valeur est utilisée seulement si la lignine C est exclue de la valeur de COD, ce qui semble réaliste dans notre cas, compte tenu de la faible proportion de bois dans les déchets entrants (0,8%).

Fraction de CH₄ dans le biogaz de décharge (F) : La composition des gaz issus de la décharge est généralement de l'ordre de 40 à 60 % pour le CH₄ et de 40 à 60 % pour le CO₂.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 – Le contexte d'exploitation du site de la décharge.

La décharge de Nkolfooulou occupe une superficie de 47 ha. Ouverte en 1989, c'est depuis septembre 1998 que cette décharge a été réaménagée suite à la reprise de service de la collecte des déchets dans la ville de Yaoundé. Les équipements du CSD et les aménagements fonctionnels sont présentés dans la figure n°2.

Le site de la décharge est clôturé sur les parties accessibles. Une guérite à l'entrée permet de filtrer les entrées et enregistrer les camions. Une route goudronnée de 1 km de long permet de relier le local technique à la route Yaoundé –Soa. Cette route est prolongée par les pistes en terre qui desservent les casiers en exploitation. Le local technique est constitué d'un bâtiment administratif de 90 m² abritant l'ordinateur d'enregistrement des pesées du pont bascule, les bureaux, les vestiaires et la salle d'eau. L'alimentation en eau se fait à travers un forage d'où l'eau est pompée vers un réservoir de 2 m³. Le site a reçu déjà trois casiers : le premier de 5,3 ha exploité entre 1998 et 2003, le deuxième de 5,1 ha exploité entre 2002 et 2008 et le dernier d'une capacité de 76 000 m³ (7600 m²) mis en exploitation en 2008. Un bac de rétention de lixiviat (80 m³) permet de drainer le premier casier (1998 – 2003) et le dernier casier en exploitation. Un casier expérimental de 2600 m³ a été construit sur le site avec le concours de l'exploitant HYSACAM afin de suivre les paramètres de sortie et le comportement des déchets en décharge. Ce site a bénéficié en 2009 d'un projet MDP portant sur le captage et le brûlage en torchère de biogaz. Ce projet a permis à partir de 2010 de réaliser la couverture des anciens casiers et d'installer un réseau de captage de biogaz et son brûlage.

Les déchets sont mis par couches successives compactées, avec une couverture périodique de terre. HYSACAM dispose pour cela de compacteurs à pieds de mouton, de bouteurs et de chargeurs qui interviennent uniquement lors de la couverture. L'ensemble des engins d'exploitation du site consomme en moyenne 20,7 m³ de gasoil et 410 litres de lubrifiants par mois.

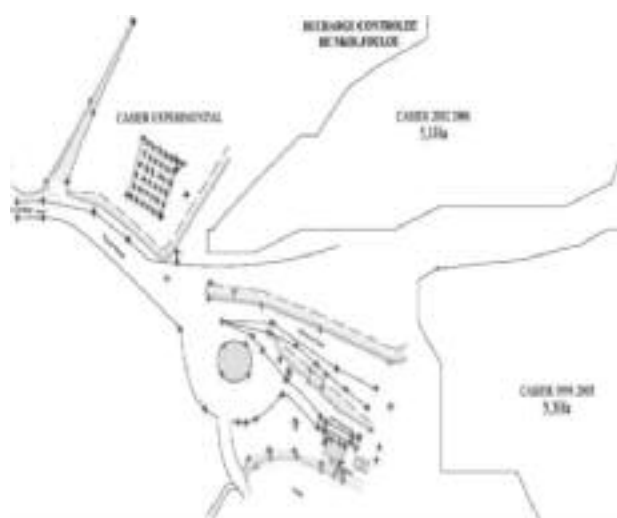


Figure n°2 : présentation de la décharge de Nkolfofouou

Le coût de revient, évalué à partir des éléments de fonctionnement présentés ci-dessus, de l'amortissement des engins et des salaires et autres frais de personnel est évalué à 2,30 € par tonne de déchets entreposés, dont 88,5 % pour l'exploitation et 11,5 % pour les amortissements [ZHRANI, 2006].

3.2 – Caractéristiques des déchets entrants.

3.2.1 – Flux et origine des déchets.

Tous les déchets admis sur le site sont pesés depuis janvier 2003. Avant cette date, la quantité des déchets admis peut être estimée à partir du nombre et du type de camion de collecte. Le tableau n°1 donne un aperçu de la quantité et origine des déchets admis sur le site depuis janvier 2003.

Jusqu'en septembre 2008, cette décharge avait reçu 2,13 millions de tonnes des déchets entreposés dans deux casiers couvrant 10,4 ha. Selon les estimations de HYSACAM, entre 2009 et 2015, ce site peut recevoir encore environ 3 millions de tonnes de déchets dans deux casiers, soit une moyenne annuelle de 428 571 tonnes par an pendant cette période [Anonyme, 2009]. Les déchets admis à la décharge de Nkolfofouou proviennent de la ville de Yaoundé (déchets ménagers, déchets de balayage des rues et des places, déchets des marchés, déchets industriels banals, déchets hospitaliers) et de la ville de Soa (déchets ménagers).

3.2.2 - Caractéristiques physiques des déchets.

a/- Composition des déchets.

La caractérisation des déchets entrants dans la décharge de Nkolfofouou a été effectuée sur le site. Le tri manuel est effectué sur l'échantillon brut humide. Le tableau n°2 présente le résultat de composition des déchets entrants dans la décharge de Nkolfofouou. Ce résultat est issu du tri de 3 007 kg d'ordures ménagères prélevés sur un échantillon primaire de 32,8 tonnes de déchets provenant de cinq strates d'habitation de la ville de Yaoundé [Djeutcheu K., 2005].

Le point commun entre les différentes strates est le grand pourcentage de la matière organique putrescible (62 à 70 %). Les papiers et les cartons ont un pourcentage très élevé dans les déchets de marchés (17,2%), car ce sont les déchets d'emballage des produits de consommation. De même, on note une absence de caoutchouc dans les strates haut standing, moyen standing et périurbain : ceci s'explique par la rareté des garages pour automobiles qui sont les premiers producteurs de ce type de déchets ; il faut noter également que le caoutchouc fait l'objet d'une filière de récupération bien organisée dans la ville de

Provenance des déchets	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Ville de Yaoundé	185 838	182 112	238 998	255 055	///	///
Ville de Soa	539	967	1 894	2 021	///	///
SECA (déchets industriels banals)	2120	4 152	4 152	4 430	///	///
Autres	1 238	1 524	619	627	///	///
Total	189 735	188 755	245 663	262 133	273 006	350 141

Tableau n°1 : Quantité de déchets (tonnes) enfouis sur le site de Nkolfoulou de 2003 à 2008.

Fractions (%)	Haut standing	Moyen standing	Hab. spontané	Marchés	Périurbain	Moyenne	Max	Min	Ecart type
Bois	0,19	1,12	0,50	1,90	0,37	0,8	1,90	0,2	0,70
Caoutchouc	0,00	0,00	1,78	1,18	0,00	0,6	1,8	0,00	0,84
Carton/Papier	15,18	6,80	2,50	17,18	7,66	9,7	17,2	2,50	6,13
Dangereux	0,10	0,06	0,10	0,11	0,02	0,1	0,1	0,02	0,04
Gravats	2,02	0,36	1,09	0,29	0,77	0,9	2,0	0,3	0,70
Métaux	1,52	0,91	1,19	1,71	1,00	1,3	1,7	0,9	0,34
Plastiques	7,09	8,00	12,19	6,58	7,86	8,3	12,2	6,7	2,23
Textile (cuir et tissu)	4,56	5,03	5,98	2,57	3,17	4,3	6,0	2,6	1,39
Verres	1,52	1,01	1,19	0,57	1,37	1,1	1,5	0,6	0,37
Fermentescibles	62,25	70,37	65,76	63,86	66,70	65,8	70,4	62,3	3,08
Eléments fins (Ø<20 mm)	5,57	6,34	7,73	4,05	11,06	7	11,1	4,05	2,65

Tableau n°2 : composition des déchets entrants (% sur matière humide).

Yaoundé : il est probable que ces déchets soient récupérés en amont par les ménages ou les éboueurs pendant la collecte. Nous avons remarqué que les éléments fins pour toutes les strates sont en grande partie constitués de fragments de feuilles vertes, de terre, de débris de pulpe d'arachide et de concombre.

Les déchets dangereux sont constitués essentiellement des déchets hospitaliers, des déchets ménagers contaminés par des produits dangereux ou par des pansements de soins. Ils ne sont pas toujours répertoriés mais ils présentent de graves risques de contamination. Le faible taux de déchets dangereux dans les différentes strates peut s'expliquer d'une part par le faible tonnage des déchets

hospitaliers par rapport au flux général entrant dans le site et d'autre part par la pratique de la récupération des batteries de véhicules par les populations et par les propriétaires de garages. On note également la rareté des piles dans les déchets entrants.

b – Densité des déchets entrants.

Le volume est déterminé par le type de camion et le taux de remplissage est estimé par analyse visuelle. Plusieurs tests ont été effectués pendant la saison sèche (août et février) et la saison des pluies (juin). Le tableau n°3 présente les résultats des campagnes de mesure effectuées sur la décharge pendant cette période.

Type de camion	densité min	densité max	Moyenne	nombre de mesures	observations
Ampliroll	0,19	0,5	0,33	16	Non compacté
Bennes tasseuses	0,4	0,72	0,59	25	compacté
Benne entrepreneur	0,38	0,68	0,54	5	Non compacté
Camion grue	0,46	0,76	0,58	9	Légèrement compacté
Porte Coffre	0,11	0,91	0,47	46	Non compacté
Benne ville de Paris	0,15	0,63	0,41	28	Non compacté
Camionnette	0,14	0,14	0,14	2	Déchets verts

Tableau n°3 : densité des déchets entrants par type de camion.

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Moy
Masse humide (kg)	3,46	3,46	3,32	3,12	4,06	3,82	3,76	1,55	1,94	3,22	2,2	3,1
masse sèche (kg)	0,98	1,26	1,54	1,24	1,76	2,12	1,82	0,8	0,78	1,54	0,76	1,3
Masse de l'eau (kg)	2,48	2,2	1,78	1,88	2,3	1,7	1,94	0,75	1,16	1,68	1,44	1,8
humidité par rapport aux déchets humides (%)	71,7	63,6	53,6	60,3	56,7	44,5	51,6	48,4	59,8	52,2	65,5	58,1

Tableau n°4 : Taux d'humidité des déchets entrants à la décharge

Les valeurs de densité varient selon le type de camion entrant dans la décharge. Les valeurs maximales sont enregistrées par les bennes tasseuses. Les minimums sont enregistrés par les Ampliroll où aucun tassement n'est effectué sur les déchets. On peut noter que la densité des déchets entrants est très élevée et ceci indépendamment des saisons. Sur la moyenne de 131 mesures effectuées pendant la période d'observation, on enregistre une densité moyenne de 0,44 avec un écart type de 0,22. Il faut signaler à titre de comparaison que les densités des déchets en poubelle dans la ville de Yaoundé varient de 0,24 (saison sèche) à 0,36 (saison des pluies) [NGNIKAM, 2000].

c – Teneur en eau.

Les tests de comportement des déchets à l'eau et la détermination de la densité des déchets en place nécessitent la connaissance du taux d'humidité dans les échantillons. Nous avons choisi des échantillons par quartage des déchets entrants dans la décharge ; d'autres tests sont effectués sur des déchets enfouis en profondeur. Du fait de la taille réduite de l'étuve disponible, les déchets y ont été introduits en plusieurs fractions. Le temps mis pour l'obtention d'un poids constant à l'étuve est différent d'un échantillon à l'autre (tableau n°4).

Les mesures ont été effectuées aux mois de février (grande saison sèche), juin (petite saison de pluie) et juillet (petite saison sèche). Les échantillons n°1 à 4 ont mis 74 h pour avoir une masse constante, les échantillons n° 5 à 11 ont nécessité 92 h. La teneur en eau moyenne de l'ensemble des échantillons est de 58%, avec un taux de près de 72% pour certains échantillons. Ce résultat est conforme avec les mesures effectuées sur les déchets en poubelle. En effet, le taux d'humidité des déchets en poubelle à Yaoundé varie entre 50% en saison sèche et 65% en saison des pluies [NGNIKAM, 2000].

3.2.3 – Comportement des déchets à l'eau.

Nous avons constaté que le séchage de l'échantillon avant l'introduction dans le dispositif expérimental modifiait la nature du déchet dans sa structure interne (gonflement des fibres végétales constitutives de la matière organique

biodégradable par exemple) et donc son comportement à l'eau. Le test de comportement à l'eau a été poursuivi sur les déchets humides. La capacité au champ des déchets entrants varie en fonction du temps d'immersion des déchets et ceci quelque soit leur taux d'humidité. Les déchets bruts ont une capacité de rétention de l'eau plus faible. Leur capacité au champ augmente avec la durée d'immersion. La capacité au champ est de 63% pour la durée d'immersion de 8 heures, et elle baisse progressivement ensuite (figure n°3).

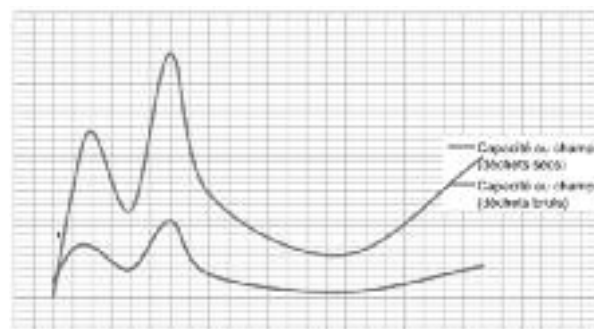


Figure n°3 : capacité au champ des déchets en fonction de la durée d'immersion (en heures)

On peut conclure qu'après une période d'immersion de plus de 8 heures, le déchet est complètement saturé et ne permet plus de stocker de l'eau. Le comportement en eau des déchets bruts traduit la situation qui se passe dans une décharge, dont les déchets entrants ont la possibilité de stocker jusqu'à 60% d'eau. La capacité au champ des déchets séchés varie entre 44 et 157%, avec une moyenne de 121% obtenue sur les 12 échantillons, en fonction du temps d'immersion des déchets. Cette valeur est liée à l'évaporation de l'eau constitutive des déchets. Le processus de séchage et de ré-humidification doit prendre un minimum de temps et surtout ne traduit pas la réalité de stockage des déchets sur la décharge. Avant l'application des charges, les valeurs de rétention obtenues sont supérieures à 30% (par rapport au brut).

Après l'application des charges (2 à 7 kPa), la capacité de rétention diminue : elle est inférieure à 31% (sur brut). Malgré le fait que la pression exercée soit nettement inférieure à celle qui est appliquée en décharge lors du compactage des déchets (78,8 kPa à la décharge de

Nkolfoulou), la capacité au champ des déchets bruts est relativement faible (maximum de 30% pour une charge de 2,1 kPa) et diminue rapidement en fonction de la charge (figure n°4).

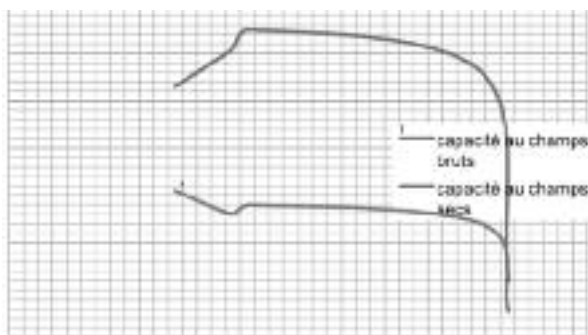


Figure n°4 : Capacité au champ des déchets entrants en fonction des charges appliquées (kPa)

On peut déduire que la capacité de rétention de l'eau diminue au fur et à mesure que la contrainte verticale appliquée sur les déchets augmente. Le compactage des déchets en décharge permet de diviser au moins par deux la capacité au champ des déchets bruts. Une décharge exploitée en couche successive des déchets compactés a moins la capacité de rétention de l'eau qu'une décharge brute qui n'est pas compactée. Plus la charge de compactage est élevée, plus les lixiviats sont relargués. Mais ce

phénomène n'est optimal que si le casier est bien drainé et permet l'évacuation gravitaire du lixiviat vers un point bas situé dans le casier ou en dehors.

3.3 – Caractéristiques des sortants.

3.3.1 – Caractéristiques des lixiviats.

a/- Caractéristiques physico-chimiques

Les casiers en exploitation sur la décharge de Nkolfoulou ne sont pas équipés de canaux de drainage des lixiviats. Ceux-ci s'accumulent donc dans le massif des déchets. Avec le temps, la quantité de déchets enfouis augmente, ce qui provoque une pression permettant l'écoulement des lixiviats à travers des chemins préférentiels afin d'atteindre les fossés qui ceinturent les casiers et les bassins de rétention. Trois échantillons de lixiviats ont été prélevés : l'un au niveau de l'entrée du bassin de collecte des lixiviats (E1), un autre à la sortie du bassin de collecte (E2) et le troisième (E3) dans un puits creusé dans un casier (2003-2006). Les échantillons ont été prélevés et analysés le même jour dans l'un des laboratoires de l'Université de Yaoundé I. Les paramètres mesurés sont le pH, la DCO et la DBO5. Pour les métaux lourds, les analyses ont été effectuées à l'INSA de Lyon. Le carbone minéral et total a été mesuré à l'aide d'un COT mètre. Les anions ont été mesurés par chromatographie ionique et les résultats de ces analyses sont présentés dans le tableau n°5.

Classes	paramètres	E1	E2	E3	Norme UE ¹	Norme Française ²
Indicateurs globaux	Température (°C)	31	30,5	30		
	pH	8	8,9	7,5	5,5 à 9	
Charges organiques (mg/l)	DCO	722	1124	2245	30	125
	DBO ₅	420	500	700		
Carbone (CT, COT, CIT) (mg/l)	CT	1340	1154	1699		
	CIT	769	597	1036		
	COT	572	557	663		70
Anions et Cations (mg/l)	F ⁻	<5	<5	<5		
	Cl ⁻	1313	1393	1644	200	
	NO ₂ ⁻	111	25,4	13,6	50	
	NO ₃ ⁻	238	177	54,8		
	Br ²⁺	<5	<5	<5		
	SO ₄ ²⁻	436	72,1	24,8	250	
Métaux Lourds (mg/l)	PO ₄ ³⁻	7,93	8,61	14,7	0,7	
	Cd	<0,005	<0,005	<0,005	0,001	0,2
	Cr	0,151	0,133	0,12	0,05	0,1
	Cu	0,108	0,01	0,007	0,005	
	Fe	3,12	1,37	10,3	1	2
	Hg	0,011	<0,002	<0,002		
	Mn	0,146	0,104	0,435	1	2
	Ni	0,163	0,213	0,396		
Pb	0,019	< 0,003	0,051			
Zn	0,113	0,035	0,099	1	2	

LD : limite de détection, CT : Carbone total, CIT : Carbone inorganique (minéral) total, COT : carbone organique total.

Tableau n°5 : Analyse de lixiviats de la décharge de Nkolfoulou

1 - Directive n°75/440/CEE du 16 juin 1975 relative à la qualité des eaux superficielles destinées à la procédure d'eau alimentaire (A3 G/l) (annexe 4).
2 - Arrêté du 9 septembre 1997 relative aux décharges existantes et aux nouvelles installations

L'incertitude sur les résultats des métaux lourds est de 10% (valeurs proches des limites de détection). La précision sur les résultats de COT est de 5%. Pour les anions, l'incertitude est de 5 % et de 10 % pour les valeurs inférieures à 1 mg/l. Le COT indique la teneur en carbone organique biodégradable dissous. La DCO permet d'apprécier la concentration en matières organiques ou minérales, dissoutes ou en suspension dans l'eau, au travers de la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale. La DBO5 est la quantité d'O₂ nécessaire aux microorganismes pour oxyder les matières organiques, dissoutes ou en suspension dans l'eau en 5 jours.

Globalement, les lixiviats de la décharge de Nkolfofoulou sont peu chargés en matières organiques oxydables pour des lixiviats de décharge en exploitation. La valeur de DBO5 et DCO dans l'échantillon E3 est supérieure à celles de E1 et E2, car E3 est un lixiviat jeune (casier en cours d'exploitation). Les DBO5 et DCO de l'échantillon E2 (sortie du bassin de lixiviats) sont supérieures à celles de E1 (entrée du bassin). Ceci peut s'expliquer par le fait que la matière organique se dissout progressivement d'un bassin à l'autre, sans avoir pour autant le temps de se dégrader. En période sèche, il peut également y avoir évaporation et donc concentration du lixiviat. Le rapport DBO5/DCO qui évolue dans le temps indique le degré de biodégradabilité et fournit des données sur la nature des transformations physicochimiques des déchets stockés. Le rapport DBO5/DCO atteint la valeur 0,58 dans l'échantillon E1, 0,44 dans E2 et 0,31 dans E3. Ces valeurs indiquent une pollution oxydable et biodégradable caractéristique de lixiviats jeunes.

Quelque soit le lieu de prélèvement, le lixiviat de la décharge de Nkolfofoulou présente une forte pollution organique. La DCO est nettement supérieure à la norme de rejet de lixiviat de décharge en France (arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et nouvelles installations) ; la même observation est valable pour le carbone organique total (COT). Même à la sortie des bassins de rétention du lixiviat, cette pollution organique est encore élevée, pouvant entraîner une eutrophisation de la rivière Mfoulou qui reçoit ces effluents. Les autres éléments à surveiller dans ces lixiviats sont le potassium dont la concentration est de 10 à 20 fois supérieure à la norme européenne pour les eaux de surface, les chlorures dont les concentrations sont 5 fois plus élevées.

D'une manière générale, la concentration en métaux lourds reste relativement faible quelque soit le lieu de prélèvement. Néanmoins, certains métaux méritent une surveillance plus rapprochée. Il s'agit du cuivre, du chrome et du cadmium. Le travail de récupération fait sur le site permet de réduire le plomb et les autres métaux présents dans les déchets.

b – Caractéristiques bactériologiques.

Les échantillons de lixiviats ont été prélevés à l'entrée et sortie du bassin de décantation. Ces échantillons ont fait l'objet d'analyses bactériologiques. Les paramètres dosés concernent : les germes aérobies, les coliformes fécaux, les streptocoques fécaux, les sulfite réducteurs, les salmonelles et les shigelles (tableau n°6). Les analyses bactériologiques ont été réalisées suivant la méthode d'analyse par colorimétrie sur membrane filtrante basée sur la recherche et le dénombrement des bio-indicateurs de pollution bactériologique. Les colonies de germes non sollicités sont inhibées au profit de ceux recherchés. Elles sont exprimées par nombre de germes présents dans 100 ml d'échantillon.

Paramètres bactériologiques	Entrée du décanteur	Sortie du décanteur
Germes aérobies à 30°C	5×10^4	10^3
Coliformes totaux	10^5	2×10^3
Coliformes fécaux	3×10^3	4×10^2
Streptocoques fécaux	15×10^3	9×10^3
Sulfite réducteurs	10^4	10^2
Salmonelles	Présence	Négatif
Shigelles	Négatif	Négatif

Tableau n°6 : Caractéristiques bactériologiques des lixiviats.

Les coliformes fécaux et streptocoques fécaux se retrouvent dans le lixiviat de la décharge de Nkolfofoulou à l'entrée et à la sortie du décanteur. On remarque que la présence de décanteur ne joue pas un rôle important pour la réduction de la pollution bactériologique. La présence des streptocoques fécaux est un indicateur de la contamination fécale et présage d'un risque sanitaire en cas de la contamination des eaux par le lixiviat (risque de diarrhée). La présence des bactéries pathogènes (salmonelles et shigelles) dans le lixiviat est aussi présage d'un risque sanitaire important en cas de pollution des eaux de consommation.

3.3.2 – Bilan hydrique et production de lixiviats.

Nous rappelons l'équation générale du bilan hydrique qui est la suivante :

$$L = (P + R1 + Ed) - (R2 + Ei + ETR) - Ec.$$

La difficulté d'évaluation de ces paramètres réside dans l'incertitude associée à la détermination des valeurs prises par chacun (BELLENFANT, 2001). Pour déterminer ces paramètres, les casiers déjà exploités ont fait l'objet d'un levé topographique et leur surface déterminée. Les données de la pluviométrie sont collectées sur la période de 1984 à 2004. La hauteur moyenne annuelle enregistrée

pendant cette période est de 1 513 mm. Le bilan hydrique est effectué sur le casier (1998 – 2003), dont la superficie est de 51 000 m², casier qui a fait l'objet d'un dispositif de drainage du lixiviat et son orientation dans un bassin de décantation. L'eau contenue dans les déchets (E_d) équivaut à l'humidité des déchets entrants dont la moyenne est de 58 %. En fonction du tonnage journalier des déchets entrants, nous avons déterminé la quantité d'eau contenue dans les déchets qui est de 390 m³, tandis que la quantité moyenne d'eau de pluie est de 211,4 m³. Les caniveaux de drainage réalisés autour du casier permettent d'évacuer les eaux de ruissellement hors du casier, les paramètres R1 et R2 sont alors nuls. Les mesures effectuées sur le fond du casier expérimental nous donne une perméabilité de $1,35 \times 10^{-6}$ m/s : nous pouvons donc estimer que la migration vers le substratum est relativement faible à la décharge de Nkolfooulou et donc considérer E_i nul. L'évapotranspiration, calculée à partir de la formule de Thornthwaite (1954) est de 486,3 mm ; ramenée à la surface, cela permet de déduire la quantité d'eau évaporée qui est de 68,4 m³/j.

La teneur en eau des déchets enfouis a été mesurée en laboratoire après prélèvement des échantillons sur le site par la méthode de tranchée. Elle est en moyenne de 40% [NGNIKAM et al, 2011]. Ceci permet de déduire la quantité d'eau stockée dans les déchets. La différence entre la teneur en eau des déchets entrants (58%) et les déchets stockés permet d'estimer la capacité en eau des déchets stockés qui est de 18%, valeur de la capacité au champ des déchets mesurée en laboratoire avec une surcharge de 6 kPa (figure n°4). La quantité d'eau stockée dans les déchets est de 280 m³/j en moyenne. La quantité moyenne de lixiviats produits dans la décharge est :

$$L = (211,4 + 390) - (0 + 0 + 68,36) - 280 = 253 \text{ m}^3/\text{j}.$$

Il faut signaler que cette production n'est pas uniforme dans l'année et dépend du régime pluviométrique. Cette variation est mise en exergue par la campagne de mesures effectuée pendant une année à l'entrée du bassin de décantation. Ces quantités varient en fonction des saisons. En saison sèche nous avons une production minimale (Décembre - Mars) moyenne pendant la petite saison de pluie (Avril à Juin) et importante pendant la grande saison de pluie (Septembre, Octobre, Novembre) (figure n°5).

La quantité de lixiviat produit (253 m³/j) est nettement supérieure à la quantité récupérée (54 m³/j). Cela signifie que le fond de casier n'est pas parfaitement drainé et qu'une quantité importante de lixiviat reste piégée dans la masse des déchets. Ce phénomène a été mis en exergue lors des mesures de la perméabilité des déchets enfouis, où on a observé après les fouilles réalisées dans les casiers une remontée rapide des eaux qui se maintient sur une durée de plus de dix heures [Djeutcheu K., 2005].

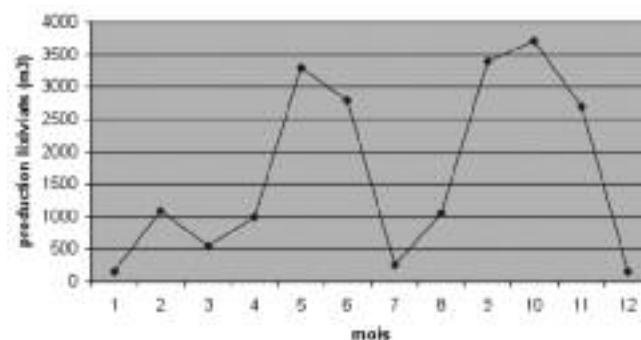


Figure n°5 : Evolution des lixiviats collectés dans le casier 1998 - 2003

3.3.3 – Production de biogaz de décharge.

En s'appuyant sur la composition des déchets entrants et le modèle de l'IPCC, nous obtenons pour la décharge de Nkolfooulou, les paramètres suivants pour le calcul des émissions de méthane :

Fraction de COB = $0,4 \times 0,142 + 0,17 \times 0,03 + 0,15 \times 0,658 + 0,3 \times 0,008 = 0,1606$;

- Le facteur de correction de méthane : FCM = 1 ;

- Les taux de dégradation : nous prenons pour la décharge de Nkolfooulou en fonction des caractéristiques des déchets entrants, une durée de demi-vie de 7 ans, ce qui permet d'avoir la valeur de $k = 0,099 \text{ an}^{-1}$.

- Fraction de carbone organique dégradé libéré (COD_L) : TABASARAN (1976) propose la formule empirique suivante pour estimer cette quantité de carbone :

COD_L = 0,014 x T + 0,28, où T est la température du milieu exprimée en degrés Celcius. La température mesurée des déchets enfouis est de 36°C. D'où COD_L = 0,77, correspondant au facteur par défaut préposé par l'IPCC.

- $L_0 = 1 \times 0,8 \times 0,1606 \times 0,77 \times 0,6 \times (16/12)$, **L₀ = 79 kg de CH₄/tonne de déchets.**

La figure n°6 présente le profil des émissions de méthane de la décharge de Nkolfooulou et le potentiel pouvant être capté. Le potentiel de production de biogaz à la décharge de Nkolfooulou est élevé à cause de la nature des déchets en présence, des conditions climatiques locales et du mode d'exploitation du site de la décharge. Malgré la faible profondeur des déchets enfouis (moins de 5 m en moyenne), le casier est constamment saturé en eau, ce qui augmente le potentiel de production de biogaz. Jusqu'en 2030, le site pourra produire environ 1,9 millions de tonnes équivalent CO₂ de gaz à effet de serre, si l'année de fermeture fixée en 2022 est respectée. La quantité de méthane émis reste à un niveau encore élevé jusqu'en 2035, soit près de 13 ans après la fermeture du site.

Suite aux informations collectées pendant cette étude, un projet de captage et brûlage de ce gaz en torchère a été mis en place par l'exploitant. Ce projet permettra de capter 1,6 millions de tCO₂ de méthane à l'horizon 2030 et les brûler en torchère. Le méthane capté pourrait permet-

tre d'alimenter une centrale à gaz de 2 à 3 MW, pouvant générer entre 2012 et 2032, environ 410 GWh heure d'électricité pour les ménages et industries de la ville de Yaoundé, s'il était valorisé. Le taux de collecte de biogaz estimé ici est de 70%. Pour atteindre ce ratio, il faut réduire la perméabilité du casier; ce qui suppose une couverture superficielle des déchets en présence et une imperméabilisation du fond de casier et des parois latérales par la géomembrane, ce qui n'est pas le cas à Yaoundé.

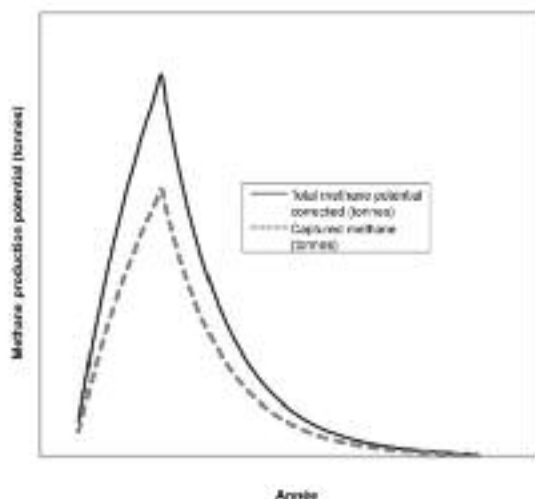


Figure n°6 : potentiel de méthane émis

3.4 – Impact du rejet de lixiviat sur la rivière Mfoulou.

Les lixiviats de la décharge de Nkolfofoulou sont rejetés dans la rivière Mfoulou qui coule en contrebas, sans aucun traitement. L'influence de ces rejets sur la qualité de l'eau de la rivière a été analysé, à partir des prélèvements des échantillons d'eau en amont, au point d'impact et après. Seule la variation de la pollution organique (DBO5 et DCO) a été observée (figure n°7).

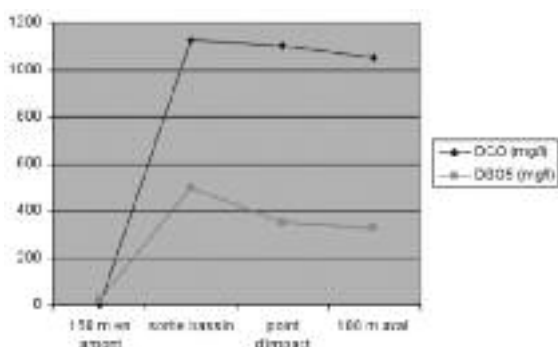


Figure n°7 : variation de la DCO et DBO5 dans la rivière Mfoulou.

Les mesures ont été effectuées pendant la grande saison sèche (mars) quand le débit de lixiviat collecté, ainsi que le débit du cours sont faibles. On remarque une forte

augmentation de la concentration de la DBO5 au niveau du point d'impact et cette concentration est maintenue 100 m en aval, avec néanmoins une légère diminution grâce à la dilution et peut-être aussi de l'auto-épuration. La même observation est effectuée en ce qui concerne la DCO. Même à 100 m du point d'impact la réduction de la concentration en DCO et DBO5 n'est pas significative. Le rejet du lixiviat sans aucun traitement dans la rivière a une influence significative sur la qualité des eaux de cette rivière. Il est impératif pour sauvegarder la qualité de cette rivière de procéder au traitement du lixiviat avant son rejet dans la rivière.

CONCLUSION

Le contrôle des déchets entrants dans les décharges des pays en développement, ainsi que tous les flux sortants (biogaz et lixiviats) est une nécessité impérieuse aussi bien pour la gestion technique et financière du site que pour la préservation de l'environnement. Ce travail a permis de caractériser pendant deux années, les déchets entrants à la décharge de Nkolfofoulou à Yaoundé et les principaux effluents liquides et gazeux qui sont rejetés. Ce site reçoit en moyenne 250 000 tonnes de déchets par an en 2010, avec une croissance moyenne de 10% par an jusqu'en 2022, date probable de fermeture. Cette décharge reçoit principalement des ordures ménagères, dont la fraction putrescible est importante (plus de 66% de la matière sèche). Leur potentiel de rétention d'eau est fort (60% sur la matière brute), mais se réduit considérablement après le compactage (moins de 20%). Le fort taux d'humidité des déchets entrants (58% en moyenne), ajouté aux conditions d'exploitation du site et au climat sont à l'origine de la forte production de lixiviats (45 m³/ha/jour). Prés de 90% de cette eau restent piégés dans la masse des déchets en présence et les 10% restants sont évacués sans aucun traitement dans la rivière.

Les analyses de ces lixiviats montrent que la pollution organique est importante, ainsi que quelques métaux lourds, comme le cuivre, le cadmium et le zinc dont la surveillance est recommandée. On peut dire que les activités de récupération pratiquées en amont et sur le site de décharge réduisent considérablement la présence de certains métaux lourds comme le plomb très présent dans les déchets des ateliers de mécaniques et autres. L'impact du rejet de lixiviat dans la rivière Mfoulou reste perceptible, à 100 m après le point de rejet. Nous recommandons fortement de traiter le lixiviat avant son rejet dans le cours d'eau. Un traitement biologique par lagunage microphyte pourra être suffisant pour baisser les taux élevés de la DCO, DBO5 et COT observés à la sortie du décanteur. Le potentiel théorique de production de méthane est éva-

lué à 79 kg/tonne des déchets. Le potentiel de méthane émis, évalué à 1,9 millions de teCO₂ entre 2007 et 2030 a fait l'objet d'un projet de captage et brûlage de gaz en torchère ayant bénéficié d'un financement dans le cadre du mécanisme pour le développement propre

RÉFÉRENCES

ABUHNGIENDO, R.M. *Maîtrise des entrées et sorties d'un centre de stockage d'ordures ménagères : Cas de la décharge de Nkolfoulou à Yaoundé.* Rapport de fin d'étude. Yaoundé : ENSP de Yaoundé, 2004, 71 p.

ADEME. *MODECOM, Méthodologie de caractérisation des ordures ménagères.* Angers (France) : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise d'Energie, Connaître pour Agir, Guides et cahiers techniques, 1993. 60 p.

ADEME. *Expertise des décharges dans les pays en développement. Protocole général d'expertise et de mise en œuvre.* Paris : ADEME, 2005.

Anonyme, 2009. Nkolfoulou Landfill Gas Recovery Project. Project design document form (CDM, PDD) - version 03. CDM – Executive Board. Jan 2009. 64 pages.

Anonyme, 2003. *Etude de caractérisation du sol de la décharge de Nkolfoulou.* Rapport N° 0215/EFO/SWI/03. Yaoundé : SOIL & WATER INVESTIGATION S.A, juillet 2003, 14 p.

Anonyme, 2001. *Rapport d'audit urbanistique : Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisation (SDAU) et Plan de développement Long terme 2020 (PDL) de Yaoundé.* Augea International – IRIS – Conseil, Yaoundé, septembre 2001.

BELLENFANT, G. *Modélisation de la production de lixiviats en centre de stockage de déchets ménagers.* Thèse de doctorat. Nancy : Institut National Polytechnique de Lorraine, LAEGO, 2001, 180 p.

DJEUTCHEU, B. *Contribution à l'expertise d'une décharge dans un PED : cas de la Décharge Contrôlée de NKOLFOULOU.* Mémoire de fin d'étude d'ingénieur. ENSP, juillet 2005. 107 pages.

GIEC. *Lignes directrices révisées du GIEC pour les inventaires des gaz à effet de serre.* Houghton, J.T., Gylan Meira Filho, L., Griggs, D.J. & Kathy, M. (eds.), Volume 3 : manuel de référence, Genève (Suisse) : Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM), Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). 1996. Section 6 : "déchets". P 6.1 – 6.40.

JOHANNESSEN, L.M. et BOYER, G. *Observations of solid waste landfills in developing countries: Africa, Asia and Latin America.* Washington : World Bank. 1999, 47 p.

LANINI, S., AGUILAR, O., LEFEBVRE, X. and BAL-LANSAT, G. *Temperature increase in landfills during the aerobic period in : Christensen T.H., COSSU R., STEGMANN, R. Proceedings of Sixth International Landfill Symposium. Sardinia Cagliari Italy, 1997, vol. 1, pp. 121-126. ligne].* Disponible sur www.grida.no/climate/gpg/french.htm

MINMEE. *Evaluation des impacts environnementaux de la décharge contrôlée de Nkolfoulou (SOA).* Yaoundé : Ministère des Mines de l'Eau et de l'Energie, 2004. 62 p.

NGNIKAM, E. *Evaluation environnementale et économique de systèmes de gestion des déchets solides municipaux : Analyse du cas de Yaoundé au CAMEROUN.* Thèse LAEPSI. Lyon : INSA de Lyon, 2000, 363 p.

NGNIKAM, E. et TANAWA, E. *Les villes d'Afrique face à leurs déchets.* Edition de l'UTBM (Université de Technologie de Belfort- Montbéliard). Décembre 2006. 281 pages.

ZAHRANI, F., NAQUIN, P., et NGNIKAM, E. *Précollecte des déchets ménagers dans les pays en développement : comment évaluer les actions menées ?* Déchets Sciences et Techniques, n°43, septembre 2006. pp 31 – 43

ZAHRANI, F. 2006. *Contribution à l'élaboration et validation de protocole d'audit destiné à comprendre les dysfonctionnements des centres de stockage des déchets (CSD) dans les pays en développement. Application à deux CSD : Nkolfoulou (Cameroun) et Essaouira (Maroc).* Thèse de doctorat, INSA de Lyon. Ecole doctorale de Chimie de Lyon. Novembre 2006, 281 pages.