



**HAL**  
open science

## Comportement des déchets en décharge sous climat tropical humide : cas de Nkolfoulou à Yaoundé

Emmanuel Ngnikam, Pascale Naquin, C. A Pagbe Peha, Fouad Zahrani, K. Bruno Djietcheu

### ► To cite this version:

Emmanuel Ngnikam, Pascale Naquin, C. A Pagbe Peha, Fouad Zahrani, K. Bruno Djietcheu. Comportement des déchets en décharge sous climat tropical humide : cas de Nkolfoulou à Yaoundé. *Environnement, Ingénierie & Développement*, 2016, N°71 - octobre 2016, pp.3-16. 10.4267/dechets-sciences-techniques.3349 . hal-03160163

**HAL Id: hal-03160163**

**<https://hal.science/hal-03160163v1>**

Submitted on 5 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

# Comportement des déchets en décharge sous climat tropical humide : cas de Nkolfooulou à Yaoundé

Emmanuel Ngnikam<sup>1</sup>, Pascale Naquin<sup>2</sup>, K. Bruno Djietcheu<sup>4</sup>,  
C. A. Pagbe Peha<sup>3</sup>, Fouad Zahrani<sup>2</sup>

(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 et coordonnateur de l'ONG ERA - Cameroun ; Email : emma\_ngnikam@yahoo.fr

(2) CEFREPADE INSA de Lyon, 9 rue de la physique, 69621 Villeurbanne, Cedex, France

(3) Ingénieur de Génie Civil, ancien stagiaire à ERA – Cameroun (avril – septembre 2014)

(4) Hysacam

## RÉSUMÉ

Les paramètres de comportement des déchets analysés concernent : la masse volumique, la teneur en eau, la température et la perméabilité. Ces quatre paramètres sont mesurés in situ sur des alvéoles en cours de remplissage ou déjà fermé. La masse volumique des déchets enfouis est mesurée en deux étapes : l'excavation d'un volume de déchets obtenu par le cubage d'une fouille, puis les déchets enlevés sont pesés au pont bascule. La fouille est effectuée dans plusieurs casiers de différents âges et à plusieurs profondeurs. La teneur en eau des déchets enfouis est mesurée directement par séchage d'un sous-échantillon à une température de 90°C jusqu'à masse constante. Deux méthodes sont utilisées pour mesurer la perméabilité des déchets enfouis : la méthode de double anneau et la méthode des fouilles. La masse volumique des déchets enfouis varie avec l'âge et la profondeur des couches. Les déchets les plus jeunes ont une masse volumique moyenne de 0,9 tonnes/m<sup>3</sup>. Elle augmente avec l'âge des déchets pour atteindre une valeur moyenne de 1,3 après un an. L'effet saisonnier a peu d'influence sur la masse volumique des déchets enfouis. La teneur en eau des déchets enfouis augmente avec la profondeur. Pendant la saison sèche elle passe de 36,3 % (0-1 m) à 77,0 % (1,2-2,4 m). Un autre test effectué dans le même casier confirme l'augmentation de la teneur en eau avec la profondeur, mais avec des valeurs inférieures à celles du test précédent : 40 % (0-1 m) et 43 % (2,2-3,6 m). Pendant la saison des pluies, la variation de la teneur en eau suivant la profondeur est plus nette (51 % entre 0 et 1 m, contre 76 % entre 2 et 3 m) pour les déchets d'un an. On peut conclure à l'influence des saisons sur la teneur en eau des déchets enfouis ainsi que de la profondeur. La température des déchets enfouis varie entre 32 et 45 °C en fonction de la profondeur des déchets. La mesure de la perméabilité des déchets enfouis a été moins nette. En effet, dans certains essais, nous avons plutôt observé des remontées d'eau après les fouilles. La mesure par méthode de double anneau a permis d'obtenir une perméabilité de l'ordre de 10<sup>-4</sup> m/s, compatible avec les données de la littérature.

**MOTS-CLÉS :** déchet, caractérisation, comportement, décharge, climat tropical

## ABSTRACT

The parameters analysed concern: density, water content, temperature and permeability. The density of buried waste is measured into two stages: the excavation of a volume of waste obtained by the cubage of excavation, then removed waste is weighed. The excavation is carried out in several cells of various ages and various depths. The water content of hidden waste is measured directly by drying samples at a temperature of 90 °C until constant mass. The permeability of the cells is measured by the method of double ring, then the coefficient of permeability is calculated. Two methods are used to measure the permeability of hidden waste: method of double rings and method of excavations. The density of hidden waste varies with age and depth of the layers. Younger waste has an average density of 0.9. This density increases with age of waste to an average value of 1.3 after one year. The season has little influence on the density of hidden waste. The results of the water content of the waste buried in the dry season show an increase in values with depth : it goes from 36.3 % (0-1 m) to 77.0 % (1,2-2,4 m) . Another test conducted in the same cell confirms the increase of the water content with depth but with lower values than those of the previous test: 40 % (0-1 m) and 43 % (from 2.2 to 3,6 m). During the rainy season, the change in water content with depth is sharper (51 % between 0 and 1 m, against 76 % between 2 and 3 m) for waste one year of age. We can conclude that the influence of the seasons on the water content of buried waste and depth. The temperature of the buried waste varies between 32 and 45 °C depending on the depth of the waste. The measurement of permeability of landfilled waste was less clear. Indeed, in some trials, we observed rather upwelling after excavation. Measurement by using double ring yielded a permeability of the order of 10<sup>-4</sup> m/s, consistent with the literature data.

**KEYWORDS :** waste, characterization, behaviour, landfill, tropical climate

## Comportement des déchets en décharge sous climat tropical humide : cas de Nkolfoulou à Yaoundé

Emmanuel Ngnikam, Pascale Naquin, K. Bruno Djietcheu,  
C. A. Pagbe Peha, Fouad Zahrani, K. Bruno Djietcheu

### Introduction

Le stockage en décharge est une des solutions de traitement des déchets les plus répandues et les moins onéreuses dans les pays en développement (PED). Cependant, si le stockage des déchets est relativement contrôlé et maîtrisé dans les pays occidentaux, ce type de traitement des déchets pose problème dans les PED du fait notamment de l'absence de contrôle, d'aménagements fonctionnels inadaptés ou inexistantes et de difficultés de financement. Il ressort de l'état de l'art effectué dans le cadre du programme Re-Sources, que la gestion des décharges dans les PED pose d'énormes difficultés [RE-Sources, 2014] :

- Le choix du site est souvent effectué selon des considérations économiques et pratiques (proximité au centre-ville), sans prise en compte des impacts sur l'environnement et sur les populations avoisinantes ;
- Les exploitations présentent rarement des aménagements fonctionnels adaptés (collecte et traitement des lixiviats, du biogaz...). Il existe un manque d'engins pour le compactage et la couverture des déchets, réduisant la durée de vie des installations et la stabilité des massifs de déchets ;
- De façon générale, les modes d'exploitation des sites ne sont pas forcément adaptés à la réalité physique des déchets, ou tiennent peu compte des comportements hydraulique, mécanique et biologique des déchets ;
- Les systèmes de financement sont souvent inadaptés, le recouvrement des coûts n'étant pas assuré. De plus, les collectivités locales des PED ne peuvent pas constituer des provisions pour l'aménagement, la fermeture et réhabilitation des décharges.

Fort de ces constats, ces travaux concluent que près de 98 % des villes des PED ont des décharges non contrôlées qui dans les villes moyennes sont de simples dépotoirs sauvages dans lesquels les déchets sont brûlés pendant les périodes sèches [RE-Sources, 2014]. Les difficultés rencontrées

peuvent avoir des origines politiques, juridiques (absence de réglementation sur la gestion des déchets en général et des décharges en particulier), techniques (méconnaissance de flux de déchets entrants et du comportement des déchets enfouis) ou financières (manque de moyens, système de tarification inadapté). Les collectivités peuvent également présenter des carences de savoir-faire et un manque de sensibilisation aux impacts environnementaux [Ngnikam & Tanawa, 2006].

Les bailleurs de fonds internationaux, conscients des problèmes liés aux décharges dans les PED, financent depuis plusieurs années des projets de construction de décharges dans ces pays. Ces projets répondent aux principaux problèmes existants (apport de savoir-faire, apport de financement pour l'investissement, sensibilisation, propositions d'évolution de la réglementation). Mais ces apports financiers se limitent aux villes capitales, et peu de projets sont développés dans les villes moyennes et petites villes [RE-Sources, 2014].

En outre, les échecs concernant les projets de décharges se sont répétés ces dernières années. Il a notamment été constaté des comportements de décharges inattendus, très différents de ce qui avait pu être imaginé (une production de lixiviats sous-évaluée, une inefficacité du compactage, un taux de captage de biogaz largement en dessous des modèles théoriques...). Cela met en évidence un manque de connaissance des paramètres spécifiques aux décharges dans les PED [Aina M P., 2006]. En effet, les déchets y sont notamment beaucoup plus organiques et humides que dans les pays développés. Les conditions climatiques y sont également très différentes.

Malgré cela, les recherches actuelles s'intéressent peu aux problèmes des décharges dans les PED, et les projets sur financements internationaux n'incluent pas suffisamment de budgets d'analyses et d'expérimentation qui permettraient de mieux connaître ces spécificités. C'est dans ce contexte qu'il a été envisagé dans le cadre du programme Re-Sources, la réalisation d'une étude dont l'objectif est de déterminer les paramètres de comportement des déchets en décharge et le coût d'exploitation. Les paramètres suivis dans le cadre de cette étude sont : la densité des déchets entrants et enfouis, la température, l'humidité des déchets enfouis, la perméabilité du sol en place.

## I. Matériels et méthodes

Les matériels et méthodes préconisés dépendent du paramètre étudié. Trois méthodes de collecte sont envisagées : les enquêtes, les mesures et les calculs. Pour chaque paramètre, le protocole présente la méthodologie à utiliser et nous présenterons à chaque fois les adaptations qui ont été faites pour rendre les mesures possibles sur notre terrain.

### I.1. Les paramètres liés aux conditions extérieures

#### I.1.1. Contexte général de stockage des déchets

Ce paramètre est documenté à partir de la collecte des données générales dans la zone. Dans notre étude, cette collecte de données a été complétée par des mesures quotidiennes de la température extérieure, de la pluviométrie et de l'évapotranspiration. Les données pluviométriques ont été mesurées à l'aide d'un pluviomètre constitué d'un récipient de 5 litres et sur lequel nous avons collé un ruban gradué au millimètre. L'évapotranspiration est aussi mesurée par la pesée quotidienne des quantités d'eau évaporées dans le pluviomètre ci-dessus.

#### I.1.2. Milieu souterrain

Nous avons utilisé les données générales sur la géologie et l'hydrologie régionale disponible au ministère des mines, de l'eau et de l'énergie [MINMEE, 2003]. Ces données générales ont été complétées par une analyse des différentes couches de sol rencontrées après excavation du casier expérimental et la réalisation de la perméabilité du fond de casier. Pour la mesure de la perméabilité du fond de casier expérimental, la méthode Porchet a été utilisée.

#### I.1.3. Milieu naturel et hydrographie

Ce paramètre concerne le milieu naturel (faune, flore) et le contexte hydrographique du site. Nous avons effectué des enquêtes de terrain afin de remplir une grille faisant ressortir : (1) la végétation, (2) la pédologie (type de sol, perméabilité, granulométrie), (3) le régime des cours d'eau (débits, vitesses, usage de l'eau), (4) la présence ou non de zone humide autour du site.

### I.2. Caractéristiques des déchets enfouis

Dans cette rubrique sont rassemblés les paramètres qui doivent être mesurés sur les déchets en place. Plusieurs paramètres sont mesurés : la température, la perméabilité, la masse volumique et la teneur en eau des déchets enfouis. La mesure de ces deux derniers paramètres a déjà été décrite pour les déchets entrants sur le même site [Ngnikam *et al.*, 2012].

#### I.2.1. Masse volumique des déchets enfouis

La masse volumique est extrêmement variable selon la nature des déchets, leur compressibilité, la pression exercée sur le site de stockage et leur degré de dégradation [ADEME, 2005b]. Trois campagnes de caractérisation des déchets entrant sur la décharge de Nkoloulou ont été effectuées pendant la saison sèche et la saison pluvieuse [Ngnikam *et al.*, 2016]. La campagne effectuée pendant le remplissage de l'alvéole en cours d'exploitation, tout comme les autres mesures ont montré la prépondérance de la matière organique fermentescible dans les déchets entrants (63,5 % de la matière sèche), les autres constituants comme les plastiques, les papiers, les cartons, les textiles représentent entre 4 et 6 % de la masse sèche des déchets entrants [Ngnikam *et al.*, 2016].

Pour la mesure de la masse volumique des déchets enfouis, le volume des déchets enfouis est obtenu par le cubage d'une fouille de forme simple et régulière, facile à évaluer. La fouille est effectuée dans plusieurs casiers et à plusieurs profondeurs afin d'avoir une moyenne de l'ensemble des déchets. La masse des déchets prélevés est mesurée par pesée sur le pont-bascule. Les mesures sur les casiers anciens ont été effectuées en 2006 avant le reprofilage et couverture par la géomembrane [Zahrani F., 2006].

#### I.2.2. Teneur en eau des déchets enfouis

L'humidité des ordures ménagères dépend essentiellement du climat, de la saison et de la composition des déchets. En décharge, ce paramètre est aussi influencé par la profondeur et le niveau de dégradation [Yuen, 1999].

Nous avons prélevé les échantillons lors de fouilles à l'aide du godet de la pelle. L'échantillonnage était fait de la manière suivante : prélèvement tous les mètres sans tri, sur 4 à 5 mètres de profondeur. Un quartage a été effectué sur environ 50 kg pour obtenir un échantillon de 5 kg qui sera séché à l'étuve (séchage à l'étuve à 90 °C jusqu'à masse constante) [ADEME, 1993]. Cette mesure a été effectuée pendant la saison des pluies et la saison sèche.

#### I.2.3. La température

Nous avons effectué la mesure de la température extérieure et de la température des déchets enfouis.

**Mesure de la température extérieure** : la mesure de la température ambiante se fait parallèlement au suivi des paramètres climatiques à l'aide d'un thermomètre intégré à la station météo. Le thermomètre est placé aux abords de la décharge en dehors de la zone d'influence des déchets.

**Mesure de la température des déchets enfouis** : nous avons mesuré la température des déchets enfouis avec deux thermomètres, un au mercure et le deuxième à l'alcool.

Tout comme pour les densités des déchets enfouis, les mesures ont été effectuées sur les anciens casiers avant leur re-profilage et les casiers en exploitation.

#### 1.2.4. Perméabilité des déchets enfouis

Deux méthodes ont été utilisées pour la mesure de la perméabilité des déchets : la méthode du double anneau (NF X 30-418) et la méthode des tranchées (ou en fouille) [AFNOR, 1998].

##### a/ Méthode du double anneau

La perméabilité permet de comprendre le comportement hydraulique du massif de déchets et des sols encaissants. Cinq méthodes de détermination de la perméabilité des déchets sont proposées dans la littérature : double anneau, essai Lefranc, essai Nasberg, la méthode simplifiée en fouille et la méthode de couplage avec d'autres paramètres [ADEME, 2005a].

Nous avons choisi la méthode du double anneau car elle est peu onéreuse et adaptée aux mesures de la perméabilité dans les déchets. L'appareillage principal est constitué de deux anneaux (anneau extérieur, hauteur  $(h+e) = 0,96$  m et diamètre = 0,57 m, anneau intérieur, hauteur  $(h+e) = 0,96$  m et diamètre = 0,37 m. La figure n° 1 présente le dispositif expérimental.

Le mode opératoire a consisté en cinq étapes : (1) le décapage de la surface des déchets à l'aide de la pelle excavatrice sur une épaisseur de 50 cm, (2) l'implantation du double anneau dans le massif des déchets, (3) relevés des hauteurs libres entre le bord des anneaux et les déchets, (4) introduction de l'eau dans les deux anneaux en déclenchant le chronomètre pour la mesure du temps d'infiltration jusqu'au constat de la saturation, (5) relevé du niveau de l'eau dans l'anneau extérieur et intérieur après saturation (généralement près 4 heures pour le sol du fond de casier).

La perméabilité  $k$  d'un déchet est définie par la vitesse d'infiltration de l'eau ;  $k$  étant mesuré par la loi de Darcy :

$$Q = k * S * i,$$

$$\text{Avec } i = \frac{h + e}{e}$$

$$\text{Et : } Q = \frac{V}{t}$$

$$\text{D'où } k = \frac{S1 * h * e}{t * S1 * (h + e)} = \frac{h * e}{t * (h + e)} \quad (1)$$

$Q$  : débit infiltré en  $m^3/s$  mesuré pendant l'essai

$k$  : perméabilité en  $m/s$

$S1$  : Surface d'infiltration en  $m^2$  (section de l'anneau interne)

$i$  : Gradient hydraulique en  $m/m$

$h$  = Charge hydraulique au-dessus des déchets

$e$  : Epaisseur de la couche filtrante (déchets) en  $m$

$t$  : Temps de percolation

##### b/ Méthode simplifiée en fouille

Le principe consiste à creuser un trou dans le massif des déchets, d'extraire le volume creusé et de le remplacer par de l'eau. Le principe de la mesure consiste à injecter une quantité d'eau d'environ 800 litres dans le trou durant 15 minutes puis d'attendre le temps de stabilisation. Les mesures de niveau sont effectuées chaque heure. Nous utilisons la formule de Porchet adaptée à une fosse parallélépipède rectangle [ADEME, 2005a]. La figure n° 2 montre le principe du test.

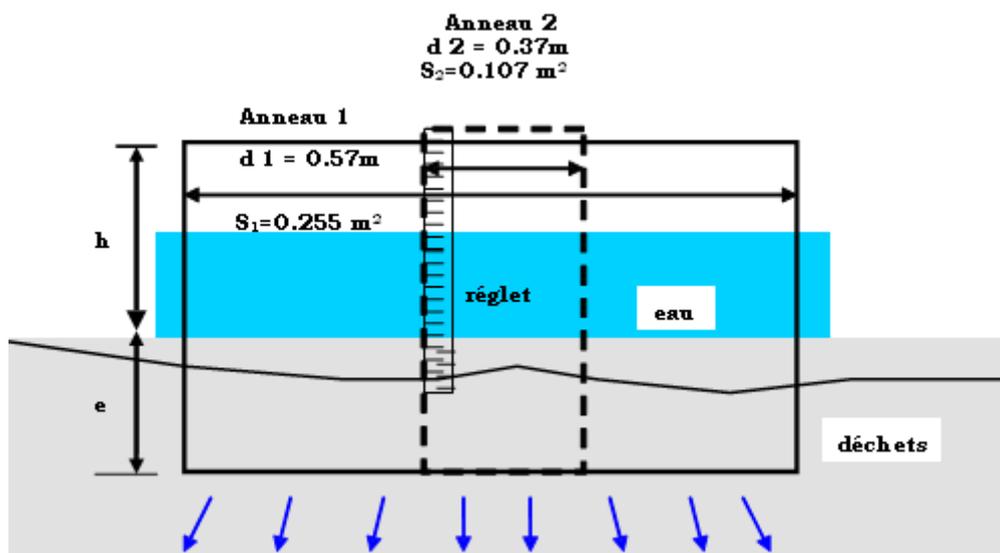


Figure n° 1 : Appareillage de mesure de la perméabilité par le double anneau

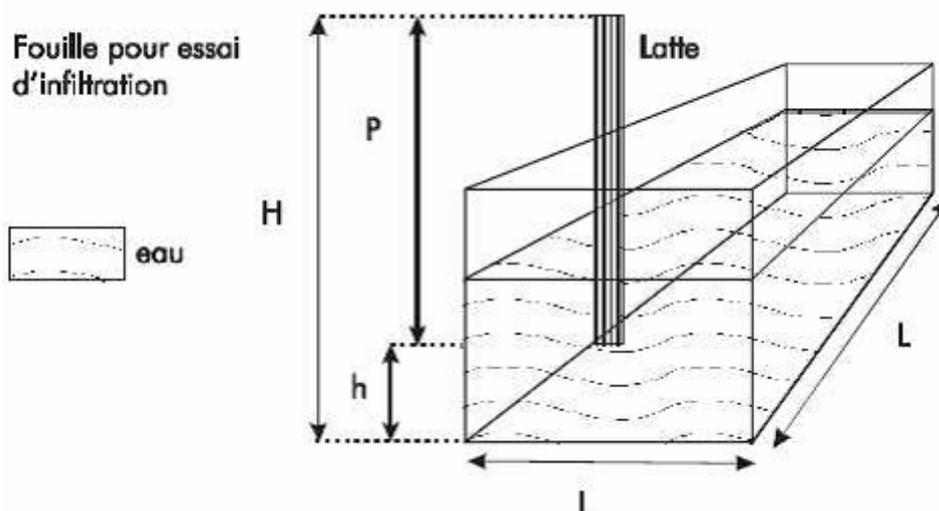


Figure n° 2 : Méthode simplifiée en fouille pour la mesure de la perméabilité des déchets enfouis.

Le calcul de la perméabilité  $k$  se fait suivant la formule suivante :

$$k = \frac{-C}{60 \times (t_2 - t_1)} \times \ln \frac{(H - P_2 + C)}{(H - P_1 + C)} \quad (2)$$

$$\text{Avec } C = \frac{L \times l}{2 \times (L + l)} \quad (3)$$

Avec :

$k$  : Perméabilité en m/s

$L$  = longueur de la fouille en m

$l$  = largeur de la fouille en m

$H - P_1 = h_1$  = niveau de l'eau à  $t_1$

$H - P_2 = h_2$  = niveau de l'eau à  $t_2$

$t_1$  = début du test

$t_2$  = fin du test

La valeur de perméabilité obtenue par cette méthode est entachée d'une marge d'erreur de 10 à 20 % en raison des difficultés de réaliser les trous de forme parallépipède rectangle dans le massif des déchets.

## 2. Résultats et discussions

### 2.1. Les contextes d'exploitation des sites de décharge

#### 2.1.1. Contexte géographique du site

La décharge de Nkolfoulou est située à 16 km de Yaoundé, capitale politique du Cameroun. La ville de Yaoundé a une population d'environ 2,3 millions d'habitants en 2015 et couvre une superficie habitée d'environ 375 km<sup>2</sup> [Cuy, 2011]. Le taux moyen d'accroissement de la population de la ville est variable selon les périodes de projection : de 5,7 % entre 1987 et

2005, elle chute à 4,6 % entre 2015 et 2020 et 4 % après [Cuy, 2015]. Selon ces hypothèses, la population de Yaoundé sera de 6 millions d'habitants en 2035, avec un maximum de 5 millions dans le périmètre administratif actuel [Cuy, 2015]. La décharge de Nkolfoulou reçoit les déchets collectés dans la ville de Yaoundé et la ville de Soa (20 000 habitants). La société privée Hysacam assure la gestion de ce site depuis son ouverture en 1989. Selon Hysacam, le centre de stockage de Nkolfoulou reçoit en moyenne 1 200 tonnes des déchets par jour provenant principalement de la ville de Yaoundé. En 2015, la quantité totale des déchets enfouis dans ce centre est de 5,32 millions de tonnes au 31 août 2015 [Oumbe, 2015].

Le climat de la ville de Yaoundé est de type équatorial avec 4 saisons : 2 saisons sèches (novembre à mars et juillet à août), 2 saisons de pluie (août à novembre et avril à juin). La température varie entre 20 et 30 °C, avec une moyenne à 24,5 °C. La pluviométrie moyenne enregistrée entre 1981 et 2005 est de 1 500 mm, avec une moyenne de 293 mm enregistré au mois d'octobre qui est le plus pluvieux. L'humidité relative de l'air atteint un maximum de 85 % au mois d'août avec un minimum de 72 % dans le même mois [Ngnikam, 2000].

#### 2.1.2. Contexte environnemental

**Géologie** : des coupes géologiques réalisées par le bureau d'étude « Soil and Water Investigation S.A. » en 2003 montrent que le site est situé sur une zone constituée de haut en bas de :

- une argile légèrement sableuse d'environ 1,80 à 2,50 m d'épaisseur;
- une argile latéritique rougeâtre sur une épaisseur d'environ 0,70 à 1,50 m ;
- une cuirasse latéritique de 3 m d'épaisseur

environ, au-dessus d'une roche décomposée présageant un toit rocheux [Abuhngiendo, 2004]. La présence d'argile réduit la perméabilité du sol en place. Le sol du centre de stockage des déchets de Nkolfoulou est légèrement sableux. Le fonds de casier repose sur les cuirasses latéritiques qui sont semi-imperméables. Cependant les cuirasses sont en général discontinues dans l'espace et laissent des poches permettant l'infiltration des eaux.

**Milieu naturel et hydrographie** : 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, Voumndi, etc.). Ces affluents se transforment en torrents en période de grandes pluies. La rivière Mfoulou est le milieu récepteur des rejets hydriques de la décharge de Nkolfoulou et des eaux de ruissellement d'origine diverses [Djombé, 2007].

### 2.1.3. Perméabilité du sol encaissant

La perméabilité du sol encaissant a été mesurée dans l'alvéole 3E, nouvellement préparée par l'exploitant comme casier expérimental. Cette alvéole a une profondeur maximale de 30 m côté talus et 20 m (côté rampe d'accès). Elle a un volume moyen de 135 000 m<sup>3</sup> et la durée de son remplissage prévue était de 3 à 4 mois. En fonction du nombre de faciès de sol observé au fond de cette alvéole, deux essais de perméabilité ont été réalisés en raison d'un essai par faciès. Les mesures ont été effectuées en août 2014 pendant la petite saison sèche. Les résultats sont présentés dans les tableaux n° 1 et 2 pour les deux essais.

D'après Porchet on a :

$$\frac{2K}{r}t = -\ln\left(h_t + \frac{r}{2}\right) + \ln\left(h_0 + \frac{r}{2}\right) \quad (4)$$

En passant aux logarithmes décimaux on a :

$$\log\left(h_t + \frac{r}{2}\right) = \ln\left(h_0 + \frac{r}{2}\right) - \frac{2K}{2,3r}t \quad (5)$$

Cette équation est sous la forme  $Y = A - B \cdot t$  avec :

$$Y = \log\left(h_t + \frac{r}{2}\right), \quad A = \ln\left(h_0 + \frac{r}{2}\right)$$

et :  $B = \frac{2K}{2,3r}$  est la pente de la courbe

et :  $\log\left(h_t + \frac{r}{2}\right) = f(t)$

d'où :  $K = \frac{2,3 \cdot B \cdot r}{2}$  (6)

Avec K : la perméabilité verticale du fond du casier;  $h_t$  : la hauteur de l'eau à l'instant t et r : le rayon du trou. La figure n° 1 présente la courbe  $Y = A - B \cdot t$ .

L'allure de la courbe tendance nous permet d'avoir l'équation suivante :

$$Y_1 = -4,35 \times 10^{-6}t - 0,3325$$

On aura donc :

$$K = \frac{4,35 \times 10^{-6} \cdot 2,3 \cdot 0,29}{2} = 1,48 \times 10^{-6} \text{ m/s} \quad (7)$$

Les résultats du deuxième essai sont présentés dans le tableau n° 2.

Avec le même raisonnement que précédemment, nous arrivons à une valeur de la perméabilité pour ce 2ème essai,  $K = 1,67 \times 10^{-6}$  m/s. On se rend compte que pour les deux points de mesure, le résultat de la perméabilité est presque identique et correspond aux valeurs seuils pour un sol peu perméable recommandé pour une décharge d'ordures ménagères. Cette valeur de perméabilité verticale de sol en place se situe dans la plage des valeurs déterminées par Soil and Water en 2003 [Abuguiendo, 2004] et par Bruno Djietcheu en 2005 au fond d'un casier expérimental réalisé sur le même site [Djietcheu, 2005].

**Tableau 1 : Résultats du premier essai de mesure de la perméabilité du sol encaissant**

Temps t (en secondes)	Hauteur de l'eau $h_t$ (en m)	$\left(h_t + \frac{r}{2}\right)$	$\log\left(h_t + \frac{r}{2}\right)$
0	0,185	0,465	-0,33
3540	0,163	0,443	-0,35
8760	0,1449	0,4249	-0,37
12300	0,121	0,401	-0,40
15840	0,111	0,391	-0,413

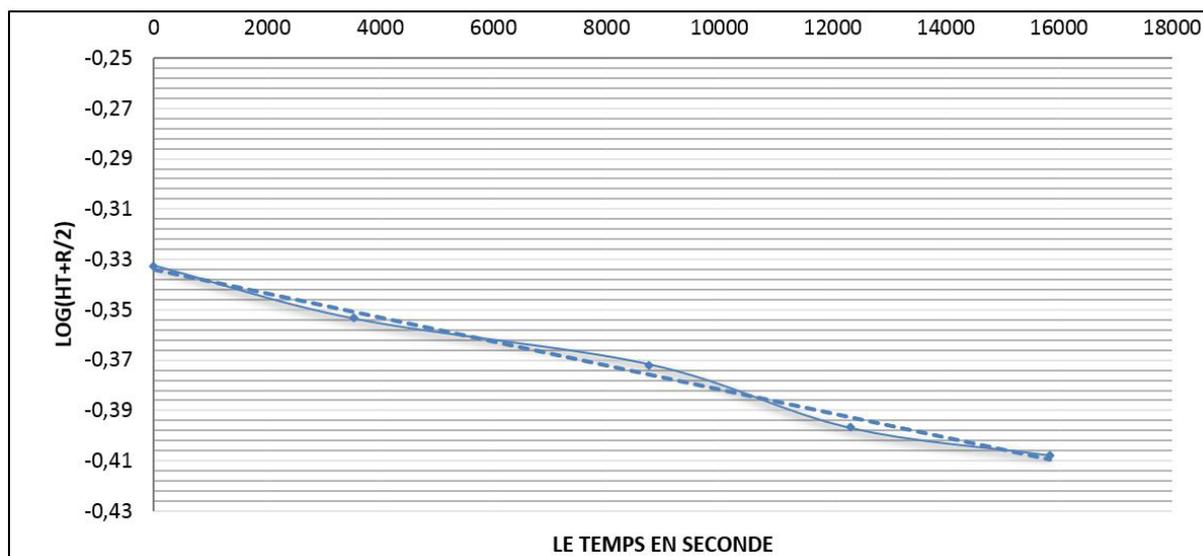


Figure n° 3 : Représentation graphique de la courbe d'infiltration sur le fond de l'alvéole 3E (1er Essai)

Tableau 2 : Résultats du deuxième essai de mesure de la perméabilité du sol encaissant

Temps t (en secondes)	Hauteur de l'eau $h_t$ (en m)	$(h_t + \frac{r}{2})$	$\log(h_t + \frac{r}{2})$
0	0,219	0,509	-0,298
1320	0,214	0,504	-0,297
6600	0,188	0,478	-0,323
11460	0,161	0,451	-0,346
14700	0,141	0,431	-0,365

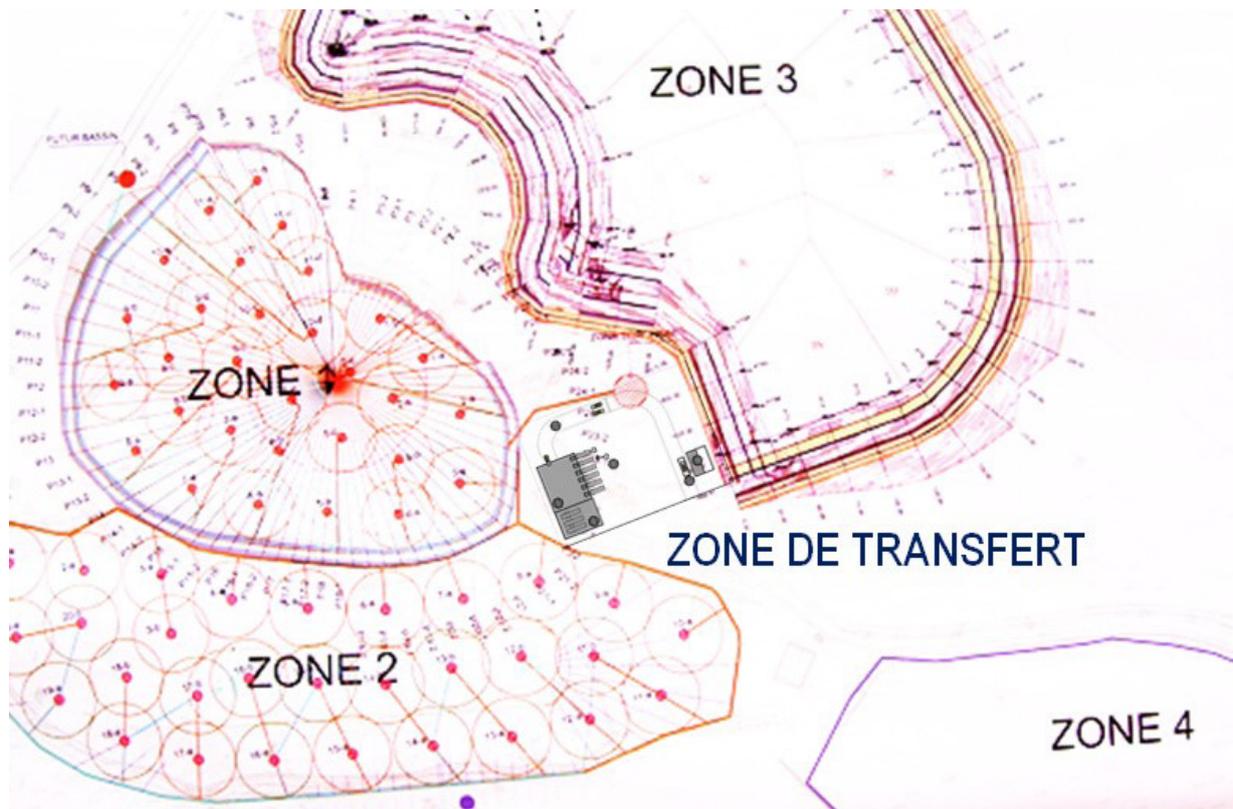
#### 2.1.4. Les conditions d'exploitation

La décharge de Nkolfoulou occupe une superficie de 56 ha (figure n° 4).

Le site de la décharge est clôturé sur les parties accessibles sur une longueur de 445 m. Un guérite est prévue à l'entrée pour filtrer les entrées et enregistrer les camions. Une route goudronnée de 1 km de long permet de relier la décharge à la route Yaoundé –Soa. Cette route est prolongée par les pistes en terre qui desservent les casiers en exploitation. Sur le site, un bâtiment administratif de 90 m<sup>2</sup> abrite le local de mesure du pont bascule, les bureaux, les vestiaires et la salle d'eau. Le site a reçu déjà trois casiers : le premier de 5,3 ha exploité entre 1998 et 2003 avant son réaménagement dans le cadre du projet de captage de biogaz de décharge et son brûlage en torchère. Le deuxième de 5,1 ha exploitée entre 2003 et 2008 et le troisième d'une capacité de 76 000 m<sup>3</sup> (7 600 m<sup>2</sup>) exploité entre 2008 et 2009. Ces trois premiers casiers ont été profilés en 2011 et couverts par une géomembrane de couverture et la terre végétale. Un réseau de captage de

biogaz y a été installé. Les nouveaux casiers ouverts après 2011 sont exploités en alvéoles successives. Les puits de captage de biogaz y sont installés au fur et à mesure. Hysacam installe sur ce site des puits verticaux et horizontaux dans les nouvelles alvéoles pour améliorer le taux de captage de biogaz.

En effet, avec l'installation des puits verticaux à raison de 5 puits par hectare, le rendement de captage était de 20 %, contre 60 % attendu dans les estimations. Les puits verticaux sont constitués des conduites en PEHD de 90 mm de diamètre et crépinées à partir de 75 cm en dessous de la surface des déchets. Ils sont reliés à la torchère par un réseau de collecte secondaire en PEHD de 110 mm de diamètre et un réseau primaire de 200 mm de diamètres. Les têtes de puits verticaux sont en acier inoxydable de 110 mm de diamètre. Les drains horizontaux sont placés dans les tranchées de déchets espacés de 15 m et sont constitués des tuyaux en PEHD crépinés à partir de 10 m de la bordure de l'alvéole. Avec ce système combiné, l'entreprise arrive à atteindre un rendement de captage de 50 %, ce qui est proche des estimations de départ [Pagbe, 2014].



**Figure n° 4 : présentation de la décharge de Nkolfoulou**

Depuis 2011, Hysacam a investi près de 2,8 milliards de francs CFA sur ce centre de stockage, dont près de 67 % dans le matériel d'exploitation et 25 % dans l'étanchéité et la couverture finale des casiers [Pagbe, 2014]. Le reste de 8 % des investissements sont faites pour la réalisation de la voirie interne, le bâtiment et l'approvisionnement en eau et en électricité. En matière de fonctionnement, le coût d'exploitation de ce centre est estimé à 480 millions de FCFA par an, hors mis les charges d'amortissement. Ces frais se répartissent presque de manière équitable entre le carburant et lubrifiant, les frais de personnel et les frais d'entretien des engins. Il faut rappeler que près de 100 employés travaillent en temps plein sur le site, qui accueille plus les récupérateurs informels depuis 2010.

Le coût de revient des déchets enfouis, 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 2500 FCFA par tonne des déchets traités [Pagbe, 2014]. Ce coût a subi ainsi une augmentation de près de 65 % par rapport à celui évalué en 2006, soit 2,30 € par tonne de déchets entreposés [Zahrani F, 2006]. Cette augmentation est néanmoins modeste comparé au montant des investissements réalisés sur le site entre les deux périodes (2,8 milliards de francs CFA, contre 70 millions seulement pour la période 1998 à 2003). En effet, l'augmentation des investissements a été atténuée par la croissance rapide des quantités des déchets entrants (près de 2,5 millions de tonnes entre 2009 et 2014) [Pagbe, 2014].

## **2.2. Caractéristiques des déchets enfouis**

### **2.2.1. Masse volumique des déchets enfouis**

Les mesures ont été effectuées sur quatre casiers. Il s'agit des casiers correspondant aux périodes d'exploitation respectives de 1998-2003 et 2003-2006, un mini casier expérimental et l'alvéole 3B du casier n° 3 en cours d'exploitation en 2014. Dans cette alvéole, deux points de mesures ont été réalisés près du quai de déchargement qui est la zone la plus compactée de l'alvéole à cause des mouvements répétitifs de circulation des engins d'exploitation. Les mesures effectuées sur le mini casier expérimental et l'alvéole 3B sont effectuées sur les déchets frais. Pour chaque mesure, nous avons réalisé une fouille sur 3 profondeurs en moyenne pour une masse de déchets prélevés entre 1,7 à 8 tonnes par essai.

Le casier 1998-2003 n'étant pas assez profond, nous n'avons pas pu faire d'essais au-delà de 3 m. Dans ce casier, la densité des déchets enfouis est proche de 1,3 (tableau n° 3).

À deux ans d'âge, on observe une très faible variation de la masse volumique des déchets enfouis en fonction de la profondeur. Cette masse volumique ne varie pas en fonction des saisons. Les mesures effectuées à la même

**Tableau 3 : Masse volumique des déchets (t/m<sup>3</sup>) in situ dans le casier 1998 – 2003**

Mois (saison)	Masse (kg)	H (m)	L (m)	l (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique	Profondeur (m)	Masse volumique	Age des déchets
<b>Juin (petite saison de pluie)</b>	5840	1	2	2	4	1,46	0 - 1		
	7980	1,2	2,4	2,5	7,2	1,11	0 - 1,2		
	4340	1,1	2	1,5	3,3	1,32	1,2 - 2,4	1,29	2 ans
<b>Février (saison sèche)</b>	4240	1,2	2	1,4	3,36	1,26	0 - 1,2		
	3380	0,9	2	1,4	2,52	1,34	1,2 - 2,1		2 ans
	1740	0,5	2	1,4	1,4	1,24	2,5 - 3	1,28	

**Tableau n° 4 : Masse volumique des déchets (t/m<sup>3</sup>) in situ dans le casier 2003 – 2006**

Mois (saison)	Masse (kg)	H (m)	L (m)	l (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique	Profondeur (m)	masse volumique moyenne	Age des déchets
<b>juin (saison de pluie)</b>	7060	1,55	2,7	2,2	9,207	0,77	0 - 1,55		
	3360	1,35	1,9	1,35	3,46	0,97	1,5 - 2,70		
	3800	1,3	1,3	0,9	1,521	2,5	2,7 - 3,5	1,41	1 an
<b>Février (saison sèche)</b>	5180	1,3	2,1	1,7	4,641	1,12	0 - 1,3		
	6160	1,5	2,1	1,7	5,355	1,15	1,3 - 2,6		
	7100	1,6	2,1	1,7	5,712	1,24	2,8 - 4,4	1,17	1 an

**Tableau 5 : Masse volumique des déchets (t/m<sup>3</sup>) in situ dans l'alvéole 3B du casier n° 3**

Mois (saison)	Masse (kg)	H (m)	L (m)	l (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse volumique	Profondeur (m)	Masse volumique moyenne	Age des déchets
<b>mai (petite saison de pluie)</b>	6160	2,1	1,3	1,9	5,187	1,188	0 – 1,3		
	8800	2,4	2,3	2,2	6,957	1,26	1,3 – 2,3		
	6300	2,1	3,3	2	4,2	1,5	2,3 - 3,3	1,31	1 an
<b>mai (petite saison sèche)</b>	6640	3	1,2	2,2	7,92	0,839	0 – 1,2		
	2880	2	2,1	1,7	3,06	0,941	1,2 – 2,1	0,928	
	3760	2	3,2	1,7	3,74	1,005	2,1 - 3,2		3 mois

période dans le casier 2003 – 2006 donnent les mêmes résultats. Dans ce deuxième casier jusqu'à 4,5 m de profondeur, nous n'avons pas observé des différences statistiques des masses volumiques des déchets enfouis (tableau n° 4).

A un an d'âge, on note que la masse volumique en saison sèche est faible par rapport à celle de la saison des pluies. Ces valeurs augmentent en fonction de la profondeur. Les essais

réalisés en 2014 ont été faits pendant la petite saison des pluies (mai) et sur les déchets de 3 mois et d'un an d'âge (tableau n° 5).

Tout comme sur les alvéoles plus anciennes, on observe que la masse volumique des déchets enfouis augmente avec l'âge des déchets et la profondeur. La masse volumique obtenue après un an d'enfouissement a le même ordre de grandeur que celle obtenue sur le casier 2003 – 2006. Pour les déchets nouvellement enfouis (3 mois), la variation de la masse volumique

**Tableau 6 : Evolution de la teneur en eau dans les déchets enfouis**

Casier	Age du déchet	profondeur (m)	Masse (kg)			Teneur en eau	Teneur en eau
			brute	sèche	Eau	brute (%)	Matière sèche (%)
<b>Casier 1998 - 2003</b>	2 ans	0 - 1	3,5	2,1	1,4	40,00	66,70
		1 - 2,2	2,8	1,6	1,2	42,90	75
		2,2 - 3,6	2,56	1,46	1,1	43,00	75,30
<b>Casier 2003 - 2006</b>	1 an	0 - 1,3	1,68	1,02	0,66	39,30	64,70
		1,3 - 2,8	3,6	2,12	1,48	41,10	69,80
		2,8 - 4,4	2,1	1,18	0,92	43,80	78
<b>Casier expérimental</b>	7 mois	0,9 - 2	4,5	2,76	1,74	38,70	63
		2 - 3	3,1	1,88	1,22	39,40	64,90
		3,5 - 4,5	3,52	2,16	1,36	38,60	63
<b>Alvéole 3B</b>	1 an	0 - 1,3	1,53	0,56	0,97	63,52	173,20
		1,3 - 2,3	2,1	0,67	1,43	68,1	213,40
		2,3 - 3,3	0,92	0,22	0,7	76,1	318,20
<b>Alvéole 3B</b>	3 mois	0 - 1,2	0,8	0,39	0,41	51,21	105,10
		1,2 - 2,1	1,8	0,678	1,122	62,35	165,50
		2,1 - 3,2	0,7	0,217	0,481	68,76	221,70

suivant la profondeur est faible, sans dire que cette variation est plus importante dans les déchets enfouis depuis un an. Après deux années d'enfouissement, on peut déjà conclure à une stabilité de la masse volumique des déchets enfouis. Ceci correspond également à la fin du tassement secondaire [Olivier, 2003].

Les mesures effectuées sur le casier expérimental (7 mois d'âge), nous donnent une masse volumique moyenne des déchets enfouis de  $0,86 \text{ t/m}^3$  à la fin du remplissage de l'alvéole, beaucoup plus faible par rapport à celle trouvée dans les casiers plus anciens. Mais cette masse volumique représente presque le double de celle des déchets entrants pendant la période d'observation ( $0,44 \text{ t/m}^3$ ). Tous les essais de mesure des masses volumiques que nous avons réalisés ont été faits sur les casiers ou alvéole n'ayant pas reçu au préalable la couverture finale. Les conditions d'exploitation sont presque identiques pour tous les casiers (utilisation d'un compacteur à rouleau vibrant) et mise en place des déchets par couche d'environ 1 m avant compactage.

Nous pouvons affirmer que la masse volumique des déchets enfouis est aussi fonction de l'âge des déchets et de la profondeur. Les déchets frais qui n'ont pas encore subi la biodégradation poussée sont moins denses que les déchets anciens et ceci quelle que soit la profondeur. Les déchets anciens (un an et plus) sont déjà presque entièrement dégradés et présentent un potentiel d'absorption de l'eau plus important, corrélé à une masse volumique plus élevée, avec

néanmoins une légère différence entre la saison sèche et la saison des pluies. Après un an d'âge, la masse volumique des déchets enfouis ne varie pratiquement plus : nous avons observé une moyenne de  $1,3 \text{ tonne/m}^3$  pour les déchets de un an et plus. Au regard des tendances observées pendant nos études, la masse volumique des déchets enfouis varie en fonction de la profondeur et ceci pendant la première année d'enfouissement. Bien que la masse volumique sèche soit le paramètre le plus représentatif du tassement des déchets, il nous a été impossible d'avoir cette grandeur avec les mesures in situ. En effet, les couches les plus profondes gardent plus d'eau que les couches superficielles et subissent également un compactage supplémentaire lié à la charge des déchets qui est au-dessus et la circulation des engins d'exploitation. Mais comme on va le constater avec la variation de la teneur en eau, c'est l'accumulation de l'eau dans les couches en profondeur qui est le principal facteur d'augmentation de la masse volumique.

Il faut relever que la méthode en fouille que nous avons utilisée donne des valeurs d'incertitude<sup>1</sup> de 10 à 20 %, liées à l'irrégularité des dimensions de la fouille et aux pertes de matériaux lors du transport à la pelle excavatrice vers le camion qui ne peut pas circuler sur les déchets stockés.

(1) Il est recommandé après ouverture de la fouille de le recouvrir avec une bâche étanche qu'on remplira de l'eau afin de mesurer le volume réel pour réduire cette incertitude. Nous n'avons pas pu avoir recours à cette technique à cause de l'éloignement des points d'eau et des difficultés de transport sur le massif des déchets.

### 2.2.2. Teneur en eau des déchets enfouis

Pendant la réalisation des mesures des masses volumiques, les échantillons sont prélevés pour la mesure de la teneur en eau des déchets. Les mesures ont été effectuées en saison sèche pour les trois anciens casiers et en petite saison des pluies pour l'alvéole 3B. Chaque échantillon a été séché à 90 °C à l'étuve jusqu'à l'obtention de masses constantes. En effet, le séchage à 110 °C comme le recommande la norme fait fondre certains constituants des déchets comme le plastique souple.

On peut déjà remarquer que la teneur en eau sur matière sèche des déchets en place varie selon les saisons. En saison sèche elle est plus faible et varie entre 63 % pour les déchets jeunes (un an au plus) à 75 % pour les déchets plus anciens (deux ans). Pendant la saison sèche, l'effet de la profondeur est moins perceptible quel que soit l'âge du déchet. La teneur en eau des déchets bruts est en moyenne de 40,5 % pendant la saison sèche, relativement plus faible que la teneur en eau des déchets entrants sur le site de la décharge pendant la même période (58 %). Par rapport à la teneur en eau sur matière sèche, on observe pendant la saison sèche une légère augmentation en fonction de l'âge des déchets enfouis : 63,7 % pour les déchets de 7 mois d'âge, 70,8 % pour les déchets d'un an et 72,3 % pour les déchets de deux ans d'âge. Pendant la saison des pluies, l'augmentation de la teneur en eau sur matière sèche est plus perceptible en fonction de la profondeur des déchets enfouis, mais également en fonction de l'âge. En effet, pour les déchets jeunes (3 mois d'âge), nous observons une valeur moyenne de teneur en eau de 164,1 %, variant entre 105 % dans la couche de surface à 221,7 % pour la couche la plus profonde (entre 2 et 3 m). La même observation est faite sur les déchets plus anciens où on obtient une moyenne de teneur en eau de 235 %. Tout comme pour les déchets jeunes, l'influence de la profondeur sur la teneur en eau sur matière sèche des déchets enfouis est nette. Ce phénomène s'explique par le fait qu'en absence de couverture finale de l'alvéole, l'eau de pluie migre facilement vers le fond des casiers et forme un effet de bassin dans la couche profonde. Ce phénomène est mis en exergue pendant les fouilles de l'alvéole où on observe les remontées des lixiviats.

### 2.2.3. Température

Plusieurs prises de température ont accompagné les tests de densité in situ et de la teneur en eau des déchets enfouis. Les valeurs obtenues varient entre 32°C et 45°C, en fonction des lieux et de la profondeur. Les valeurs de température des déchets enfouis dans l'ancien casier (1998-2003) donnent une moyenne de 36°C. Par contre, elle est de l'ordre de 40°C pour le casier (2003-2006) et peut atteindre 50°C parfois. Pour le mini casier expérimental, la valeur moyenne est de l'ordre de 39 °C. Ces résultats autorisent à faire le lien entre la température et la biodégradation : la température diminue avec l'âge des déchets.

### 2.2.4. La perméabilité des déchets enfouis

Nous avons utilisé deux méthodes pour évaluer la perméabilité des déchets enfouis : la méthode de double anneau et la méthode des fouilles.

#### a/ La méthode de double anneau

Deux essais de perméabilité ont été effectués sur le deuxième casier et sur les déchets d'une année d'âge. Pour notre premier test :  $h = 11$  cm,  $e = 12$  cm et  $t = 10$  mn. Comme indiqué dans la relation (1).

$$k = \frac{0,11 \cdot 0,12}{600 \cdot (0,11 + 0,12)} = 9,56 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Le deuxième test a été réalisé dans le même casier à une profondeur de 0,5 m dans les mêmes conditions que le test précédent :  $h = 9,5$  cm,  $e = 9$  cm et  $t = 10$  min

$$k = \frac{0,095 \cdot 0,09}{600 \cdot (0,095 + 0,09)} = 7,6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

La limite de ce test réside dans la difficulté d'implantation des anneaux dans le massif de déchets et dans leurs déformations, dues à la composition hétérogène des déchets, ainsi que la taille des particules (présence de bouts de tissus, d'éléments métalliques plus ou moins rigides et de divers éléments solides). La pression exercée pour l'enfoncement des anneaux dans le massif de déchets crée des déformations sur les bords et donc des fuites d'eau. Les valeurs mesurées se trouvent dans la plage de valeurs de perméabilité à saturation des déchets [ $1 \times 10^{-4}$  à  $1 \times 10^{-6}$  m/s] [Bellenfant, 2009]. La perméabilité des déchets enfouis est 10 fois plus élevée que celle du sol du fonds de casier. Ce qui explique l'accumulation de l'eau en fonds de casier, du moment où celui-ci est mal drainé.

#### b/ Méthode des fouilles

Plusieurs tests ont été effectués en février 2014 : trois tests dans le casier (2004-2006), un test dans l'ancien casier et le dernier dans le mini casier expérimental. La figure n° 3 indique l'évolution de l'eau au cours de la mesure.

Sauf pour le test effectué dans le mini casier expérimental, il s'est produit durant tous les autres tests un phénomène contraire à celui que nous attendions. Au lieu de baisser, le niveau d'eau s'est élevé au cours du temps (figure 6).

Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que les déchets sont saturés en eau et que le casier peut être assimilé à un stockage de type « baignoire ». Le casier semble se comporter comme une couche géologique contenant une nappe phréatique quasi statique, plus ou moins sous pression, qui, lorsqu'on la « perce », permet une de lixiviats, un peu à l'instar d'une baignoire dont la pression exercée par les déchets sur la surface libre de l'eau a été enlevée. Ce phénomène a été aussi observé dans les puits creusés pour la mesure des masses volumiques. Ces trous

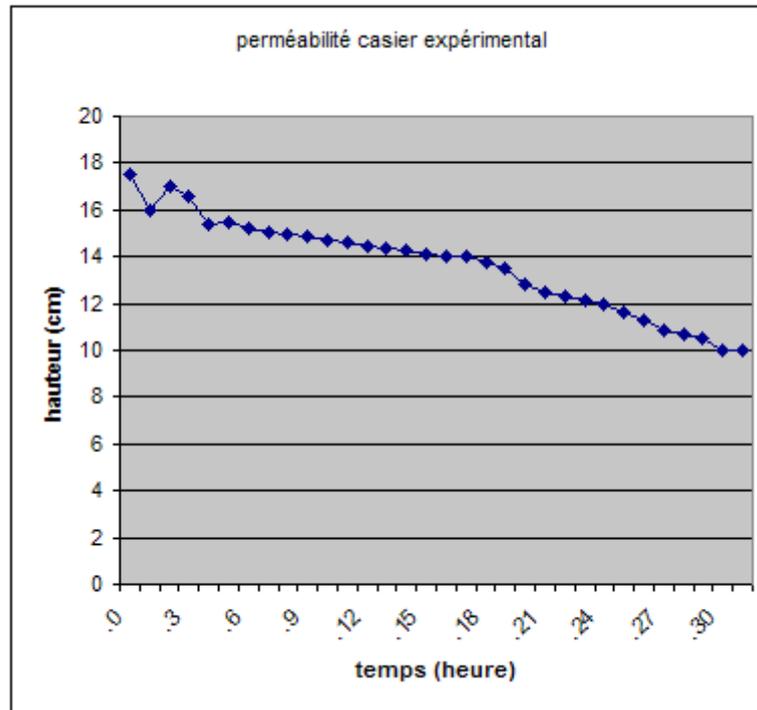


Figure n° 5 : Courbe d'infiltration de l'eau dans le casier expérimental

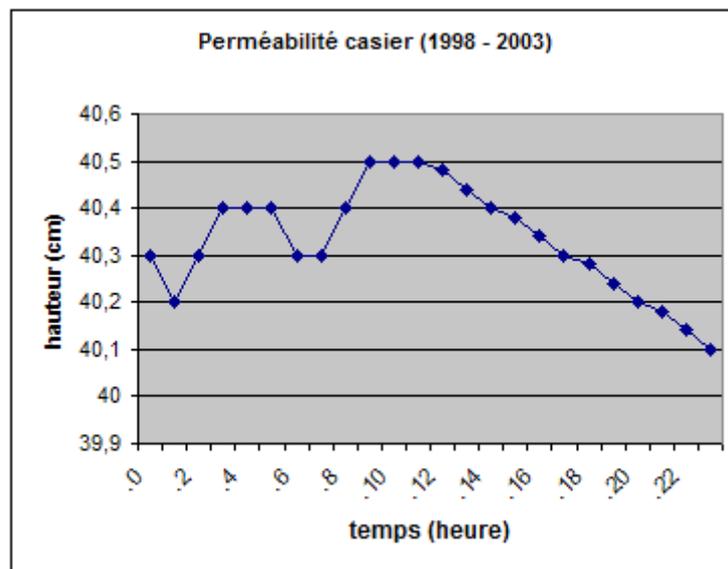


Figure n° 6 : Courbe d'infiltration de l'eau dans le casier 1998 - 2003

se sont remplis au fur et à mesure par l'eau stockée dans le fond de la décharge. L'absence de drainage des fonds de casiers anciens ne permettent pas l'évacuation des eaux de pluies. Ce même résultat a été obtenu lors des deux essais réalisés sur l'alvéole 3B pendant la petite saison de pluie en 2014 et ceci quel que soit l'âge du déchet enfoui [Pagbe, 2014].

Seul le cas du mini casier nous permet de calculer la valeur de cette perméabilité. Nous utilisons la formule de Porchet adap-

tée à une fosse parallépipède rectangle, avec le coefficient de forme « C » comme l'indique la relation (3) :

$$C = \frac{L \cdot l}{2 \cdot (L + l)} = 0,22 \text{ m}$$

La perméabilité obtenue est de l'ordre de  $2,7 \times 10^{-7}$  m/s. La valeur trouvée est très faible, sans doute du fait du fort compactage des déchets effectué lors du remplissage du casier.

## Conclusion et recommandations

Ce travail nous a permis de déterminer les caractéristiques des déchets enfouis dans les décharges de classe 2 en climat équatorial : masse volumique, taux d'humidité, température, perméabilité verticale. Ces paramètres constituent des éléments pour le dimensionnement de décharge qui constituent le principal exutoire des déchets solides municipaux dans les villes des pays en développement. Les résultats obtenus permettent également de prévoir le comportement à court terme (deux années) des déchets enfouis. La température des déchets enfouis est essentielle pour l'estimation de la productivité de biogaz, notamment dans le cas où la décharge devrait être équipée de dispositif de captage et de valorisation de biogaz. Dans les conditions d'exploitation décrites ici, la valeur de la masse volumique des déchets enfouis, pour le calcul des volumes stockés est de 0,9 tonnes/m<sup>3</sup> avec une faible variation entre la couche superficielle et les couches profondes. Dans les conditions de Yaoundé, cela correspond à un doublement de la masse volumique moyenne<sup>2</sup> des déchets entrants. Tous les essais de perméabilité réalisés au cours de cette étude ont montré les difficultés de drainage et de collecte des lixiviats dans les fonds d'alvéoles. Les résultats de la perméabilité des déchets enfouis obtenus par la méthode de double anneau est plus proche de la réalité, par rapport à la méthode Porchet. Mais compte tenu des difficultés liées à la mise en œuvre de cet essai, la méthode de double anneaux n'est pas recommandée pour la mesure de la perméabilité des déchets enfouis. Par contre, la méthode Porchet est recommandée à condition qu'on utilise les bâches en plastique remplies de l'eau pour avoir les valeurs exactes des volumes des fouilles. Dans le cas où l'effet baignoire est observé, il faut limiter la profondeur de la fouille à la partie non saturée des déchets enfouis.

Cette étude a permis de mettre en exergue, l'évolution de la teneur en eau des déchets enfouis en fonction de l'âge. Mais la période d'observation a été courte pour tirer des conclusions finales. Il serait important pour les prochaines études d'étendre la période de mesure sur au moins cinq années, avec les mesures annuelles pour confirmer cette tendance. Nous pouvons recommander pour les décharges compactées en milieu tropicale humide une masse volumique de 0,9 à 1 tonne/m<sup>3</sup> comme valeur optimale pour le dimensionnement des volumes déchets nouvellement enfouis dans les centres d'enfouissement technique de classe 2. La température mesurée dans les déchets enfouis (39 à 45 %) est optimale pour la production de biogaz de décharge. Nous recommandons également que cette étude soit complétée par la mesure des tassements primaires et secondaires sous le même climat, afin de disposer des informations complètes pour le calcul de la durée d'exploitation d'une décharge de classe 2.

(2) Masse volumique en benne (ou densité apparente en benne)

## Références bibliographiques

- Abuhngiendo, R.M., 2004. Maîtrise des entrées et sorties d'un centre de stockage d'ordures ménagères : Cas de la décharge de Nolfoulou, Yaoundé. Mémoire d'ingénieur de Génie Civil, ENSP, Yaoundé, 2004, 71 p.
- ADEME., 1993. MODECOM. Méthodologie de caractérisation des ordures ménagères. Angers (France) : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise d'Energie, Connaitre pour Agir, Guides et cahiers techniques, 1993. 60 p.
- ADEME, 2005a. Expertise des décharges dans les pays en développement. Protocole général d'expertise et de mise en œuvre. Paris : ADEME, 2005.
- ADEME-LIRIGM, 2005b. Guide méthodologique pour le suivi des tassements des centres de stockage de classe II. (Déchets ménager et assimilés). ADEME Editions, Anger 2005, 60 p.
- AFNOR NF X 30-418., 1998. Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapportés, ou artificiellement reconstitués. Infiltromètres à double anneau, de type ouvert. Paris, FA045763, Octobre 1998, 38 p.
- Aina, M. P. 2006. Expertises des centres d'enfouissement techniques de déchets urbains dans les PED : contributions à l'élaboration d'un guide expérimental et validations sur sites. Limoges : Thèse ENSIL de limoges, LSEE, 2006, 214 p.
- Bellenfant, G. (2009). Modélisation de la production de lixiviat en centre de stockage de déchets ménagers. Thèse de doctorat en Génie civil – Hydrosystèmes – Géotechnique, Institut National Polytechnique De Lorraine, 178 p.
- Cuy, 2011. Stratégie de gestion des déchets de Yaoundé : rapport définitif de mission 1 : diagnostic. Etude réalisé par le groupement SOGREAH/ECTA – BTP, Communauté Urbaine de Yaoundé. Décembre 2011, 220 p.
- Cuy, 2015. Stratégie de gestion des eaux usées de la ville de Yaoundé. Rapport mission 1 : diagnostic et état des lieux (étape 2). Etude réalisée par le groupement STUDI/GENEX pour le compte de la Communauté Urbaine de Yaoundé. 112 p.
- Djietcheu B., 2005. 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 p.
- Djombe G., 2007. Analyse de l'impact de la décharge de Nkolfoulou sur les eaux souterraines. Rapport de recherche pour le réseau COPES AOC. Yaoundé, novembre 2007. 202 p.
- MINMEE, 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.
- Ngnikam E, Naquin P, Oumbe R, Djietcheu B., 2016. Évolution des caractéristiques des déchets ménagers dans la ville de Yaoundé. Janvier 2016. In presse. 18 p.

Ngnikam E, Zahrani F., Naquin, P, Djietcheu B.K et Gourdon, R., 2012. 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. Revue francophone d'écologie industrielle, n° 61, juin 2012. pp : 18 à 29.

Ngnikam, E. et Tanawa, E, 2006. Les villes d'Afrique face à leurs déchets. Edition de l'UTBM (Université de Technologie de Belfort- Montbéliard). Décembre 2006. 281 p.

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

Olivier F., 2003. Tassement des déchets en CSD de classe II : du site au modèle. Thèse de doctorat, Laboratoire Lirigm, Université de Grenoble, 334 p.

Oumbe R., 2015. Suivi des paramètres de la décharge de Nkolfoulou : caractérisation, tassement et production de lixiviats. Mémoire de fin d'études d'ingénieur de Génie Civil, ENSP Yaoundé, 105 p.

Pagbe Peha, CA, 2014. Dimensionnement des décharges en zone tropicale humide : cas de la décharge de Nkolfoulou (Yaoundé). Mémoire de fin

d'étude ingénieur, ENSP Yaoundé, septembre 2014. 118 p.

RE-Sources 2014. Etat de l'art de la gestion des décharges dans les pays en développement. Réseau Groupe de travail « décharge ». Réseau pour une gestion durable des déchets solides (RE-SOURCES). Groupe de travail n° 3 « décharge ». 114 p.

Yuen, S.T. S., 1999. Bioreactor landfills promoted by leachate recirculation. A full scale study, Thesis, PhD Dissertation. Melbourne: University of Melbourne, March 1999.

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). Mémoire de thèse de doctorat, INSA de Lyon. Ecole doctorale de Chimie de Lyon. Novembre 2006, 281 p.