

Mesure des tassements primaires et secondaires des déchets en décharge de classe II sous climat tropical humide

Emmanuel Ngnikam^{1,*}, Ritha Oumbe², Tina Magloire², Serge Hiligsmann³

(1) Laboratoire Énergie Eau et Environnement (L3E) de l'École Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, B.P. 8390 Yaoundé, Cameroun.

(2) ERA, BP 3356 Yaoundé, Cameroun.

(3) 3BIO-BioTech, Université Libre de Bruxelles, Av. F. Roosevelt 50, CP 165/61, Bruxelles - Belgique

* Auteur correspondant : emma_ngnikam@yahoo.fr

RÉSUMÉ

La présente étude a pour but de mesurer le tassement primaire et secondaire des déchets en décharge sous climat tropical humide. Une alvéole de 120 m³ a été remplie en quatre couches de 1 m sur un volume de 96 m³ de déchets ménagers (38,4 tonnes de déchets). À l'interface de chaque couche, nous avons disposé deux plaques reliées à une barre métallique graduée. Ce dispositif a permis de lire directement les tassements subis par chaque couche de déchets pendant le stockage. Les déchets ont été compactés en utilisant le godet de la pelle hydraulique (masse volumique de 0,42 tonnes/m³). Pendant le remplissage les déchets ont subi un tassement relatif de 14 % de la colonne des déchets, variable suivant les couches des déchets. Le tassement primaire est obtenu en 5 jours après couverture du casier. Il est évalué à 13 % de la colonne des déchets et varie en fonction de la position de la couche. La couche la plus profonde a le tassement le plus élevé. Après 7,5 mois de stockage, nous avons enregistré un début de tassement secondaire qui est évalué à 6,4 % de la colonne des déchets consolidés. Au bout de 2 ans et 1 mois, nous avons obtenu un tassement secondaire final de 15,14 %. Le tassement relatif total de la colonne des déchets est de 27,5 % et reste stable au bout de 2 ans. Pour le casier expérimental que nous avons mis en place, cela correspond à un tassement global de 104 cm hormis le tassement primaire instantané enregistré pendant le remplissage. La détermination des tassements primaire et secondaire des déchets en décharge permet d'évaluer les volumes supplémentaires pouvant être exploités, et prévoir avec plus de certitude la durée d'exploitation d'une alvéole ou d'une décharge pendant les études de faisabilité.

MOTS-CLÉS : décharge, déchets ménagers, tassement, climat tropical

ABSTRACT

The purpose of this study is to measure the primary and secondary settlement of solid waste in landfills in humid tropical climates. A cell of 120 m³ was filled in four layers of 1 m on a volume of 96 m³ of household waste (38.4 tons of waste). And the interface of each layer, we have arranged two plates connected to a graduated metal bar. The device made it possible to directly read the settlements suffered by each layer of waste during storage. The wastes are then compacted and used for hydration (mass volume of 0.42 tones/m³). During filling, 14 % of column of waste varies depending on the layers of the waste. Primary compressing is obtained 5 days after closing of the cell. It is estimated at 13 % of the column of waste after instantaneous compressing and also varies according to the position of the layer. The deepest layer having compressing more raised, and the surface layer, the weakest compressing. After 7.5 months of storage, we recorded a beginning of secondary settlement which is estimated at 6.4 % of the consolidated waste column. At the end of 2 years and 1 month, we obtained a final secondary settlement of 15.14 %. The total relative compressing of the waste column is 27.5 % and remains stable after 2 years. For the experimental cell we put in place, this corresponds to an overall compressing of 104 cm. The determination of the primary and secondary compressing of waste in landfill makes possible to evaluate additional volumes being able to be exploited, and to envisage with more precision the duration of exploitation a rack or of the landfill during the feasibility studies.

KEYWORDS: landfill, household wastes, primary and secondary compressing, tropical climate

Mesure des tassements primaires et secondaires des déchets en décharge de classe II sous climat tropical humide

Emmanuel Ngnikam, Ritha Oumbe, Tina Magloire, Serge Hilgsmann

Introduction

Des études ont permis la mise en place d'une base de données internationale sur les tassements [Olivier F., 2003] mais dans cette base de données, il apparaît que certaines régions du monde (Amérique du Sud, Asie, Afrique) sont sous-représentées voire totalement absentes. Ceci est dû au fait que les moyens financiers et techniques dont disposent les pays en développement sont insuffisants pour permettre un tel déploiement [Olivier F., 2003].

Fort de ce constat, il a été entrepris dans le cadre d'une action pilote¹ sur la décharge de Nkolfooulou à Yaoundé de mettre en place un protocole en vue du suivi des tassements primaire et secondaire.

La mesure des tassements des décharges est moins aisée que celle de sites géotechniques standards, les principales difficultés résultant de l'agressivité du milieu vis-à-vis des capteurs de mesure (d'autant plus que des mesures sur le long terme sont recherchées), du passage répété d'engins d'exploitation de la décharge y compris en période de post-exploitation et enfin de l'amplitude des déformations [Aina, M.P., 2006]. En effet, des tassements de plusieurs mètres ne sont pas rares. Des méthodes d'analyse numérique (stations GPS, scanner laser 3D) existent aujourd'hui permettant d'obtenir une estimation correcte des tassements de surface en l'absence d'installation de repères fixes. Ces méthodes méconnues présentent pourtant une alternative intéressante aux repères matérialisés, notamment dans le cas de sites de grande taille [Olivier F., 2003]. Les stations GPS peuvent être utilisées en présence de végétation dense, mais leur précision est faible, notamment en absence de post traitement qui est long et onéreux. Le scanner laser donne une excellente résolution et une bonne précision, mais le coût du post-traitement est assez élevé et la technique est récente et peu maîtrisée.

On distingue deux classes de mesure des tassements de surface, suivant l'existence ou non de repères fixes. La particularité de ces mesures de surface est que les instruments employés permettent seulement de mesurer le tassement global,

(1) Cette action pilote a été financé dans le cadre du programme RE-Source par l'Union européenne, la société HYSACAM et ERA – Cameroun.

sans possibilité de connaître les tassements des différentes couches des déchets en place et comment ces tassements se répartissent entre les couches de déchets. Par ailleurs, ces méthodes nécessitent un suivi par un technicien expérimenté en topographie, ce qu'on ne trouve généralement pas dans le personnel classique d'exploitation des décharges. La méthode que nous avons utilisée dans cette étude permet au-delà du tassement global, de mesurer les tassements subis par les différentes couches des déchets.

D'une manière générale, nous considérerons dans cette étude le temps de tassement primaire comme très court. Le tassement secondaire débute à t_1 , dès la fin des tassements primaires et devrait être de l'ordre de 8 à 30 % (pour une moyenne proche de 15 à 20 %) de la colonne de déchets [ADEME, 2005].

I. Contexte général de l'étude

La décharge de Nkolfooulou est située à 16 km de Yaoundé, capitale politique du Cameroun. La ville de Yaoundé a une population d'environ 3,1 millions d'habitants en 2015 et couvre une superficie habitée d'environ 375 km² [Hydroconseil/ERA-Cameroun, 2016]. Ce centre de stockage des déchets a reçu jusqu'en décembre 2017, près de 6,5 millions de tonnes de déchets [Ngnikam et al, 2017].

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 (septembre à novembre et avril à juin). La température varie entre 20 et 30°C, avec une moyenne à 24,5°C. La pluviométrie enregistrée dans la zone de Yaoundé a connu une évolution moyenne annuelle régressive entre 1950 et 2010. On a enregistré pendant cette période une réduction globale de 12 %, soit une diminution des précipitations moyennes de 2 % par décennie [Tchindjang *et al.*, 2012]. La moyenne observée entre 1981 et 2005 est de 1500 mm.

La décharge de Nkolfooulou occupe une superficie de 56 ha. Depuis la reprise de l'exploitation en 1998 par la société HYSACAM, c'est l'exploitation en casier qui a été instaurée avec compactage des déchets. Mais jusqu'en 2008, les casiers étaient superficiels et la profondeur des déchets relativement faible (maximum 5 m) [Zahrani, F., 2006]. Sur ces anciens casiers le suivi du tassement n'est pas possible, puisque les déchets ne

sont pas confinés. À partir de 2008, en préparation du projet de captage de biogaz de décharge, HYSACAM a introduit une exploitation par alvéole. La première alvéole de 76 000 m³, a été exploitée entre 2008 et 2009, ici la profondeur varie entre 10 et 15 m selon le profil topographique du site [Ngnikam et al, 2016]. Les nouveaux casiers ouverts après 2011 sont exploités en alvéoles successives. Pour les nouvelles alvéoles, les puits horizontaux et verticaux de captage de biogaz sont installés au fur et à mesure. Les déchets sont compactés après entreposage par les bulldozers et le compacteur à pied de mouton par couche de 0,4 à 1 m. Une couverture finale des déchets se fait après le remplissage des alvéoles. Elle est constituée de 75 cm de terre de déblais prélevés lors de l'aménagement du casier, de la géomembrane (type SOLPAC, 1 mm d'épaisseur) et de la terre végétale. Les casiers sont remplis avec une surélévation pouvant atteindre 10 m, rendant la mesure de tassement complexe, d'où notre recours à un casier expérimental.

2. Matériels et méthodes

2.1. Mise en place du casier expérimental

Nous avons calqué notre modèle sur les essais sur cuve pilote menés au BRE (Centre for Ground Engineering and Remediation, Watford, UK) dont les données ont été obtenues à partir de Watts *et al.*, (2001) et de données complémentaires fournies gracieusement par K.S. Watts [Watts *et al.*, 2001].

Dans notre cas, nous avons construit un mini casier de dimensions (6 m x 4 m x 5 m) (figure 1) soit un volume de 120 m³ rempli jusqu'à une hauteur de 4 m par couche de 1 m environ, soit un volume des déchets de 96 m³ environ (figure 2). 38,4 tonnes de déchets ménagers frais en provenance de la ville de Yaoundé ont été ainsi entreposés. Chacune des couches a été compactée à l'aide d'un godet de pelle mécanique : le poids volumique solide γ_0 du déchet après pose de la couverture argileuse (50 cm) avoisine $\gamma_0 = 4,23 \text{ kN/m}^3$. La densité de la terre utilisée a été mesurée et est de 1,38. La contrainte que cette couverture applique sur les déchets est donc $\gamma_c = 13,8 \text{ kN/m}^2$.

2.2. Remplissage du casier expérimental

On a formé quatre couches dénommées (de bas en haut) A, B, C et D, dont la hauteur initiale après compactage a été mesurée. À l'interface de chacune des couches ont été disposées deux plaques de métal reliées à une règle graduée qui nous ont permis de mesurer le tassement de chaque couche, ce qui représente un total de neuf plaques, la plaque de fond incluse (figure 3).

L'historique de remplissage est décrit dans le détail (couche par couche) couplé avec les dates d'initialisation des mesures (t_m^0),



Figure 1. Mini casier expérimental et plaques métalliques

qui correspond également à la date de pose de la couverture argileuse (t_0). La modélisation du schéma de remplissage de casier et du dispositif de mesure sont présentés dans la figure 3.



Figure 2. Remplissage du casier

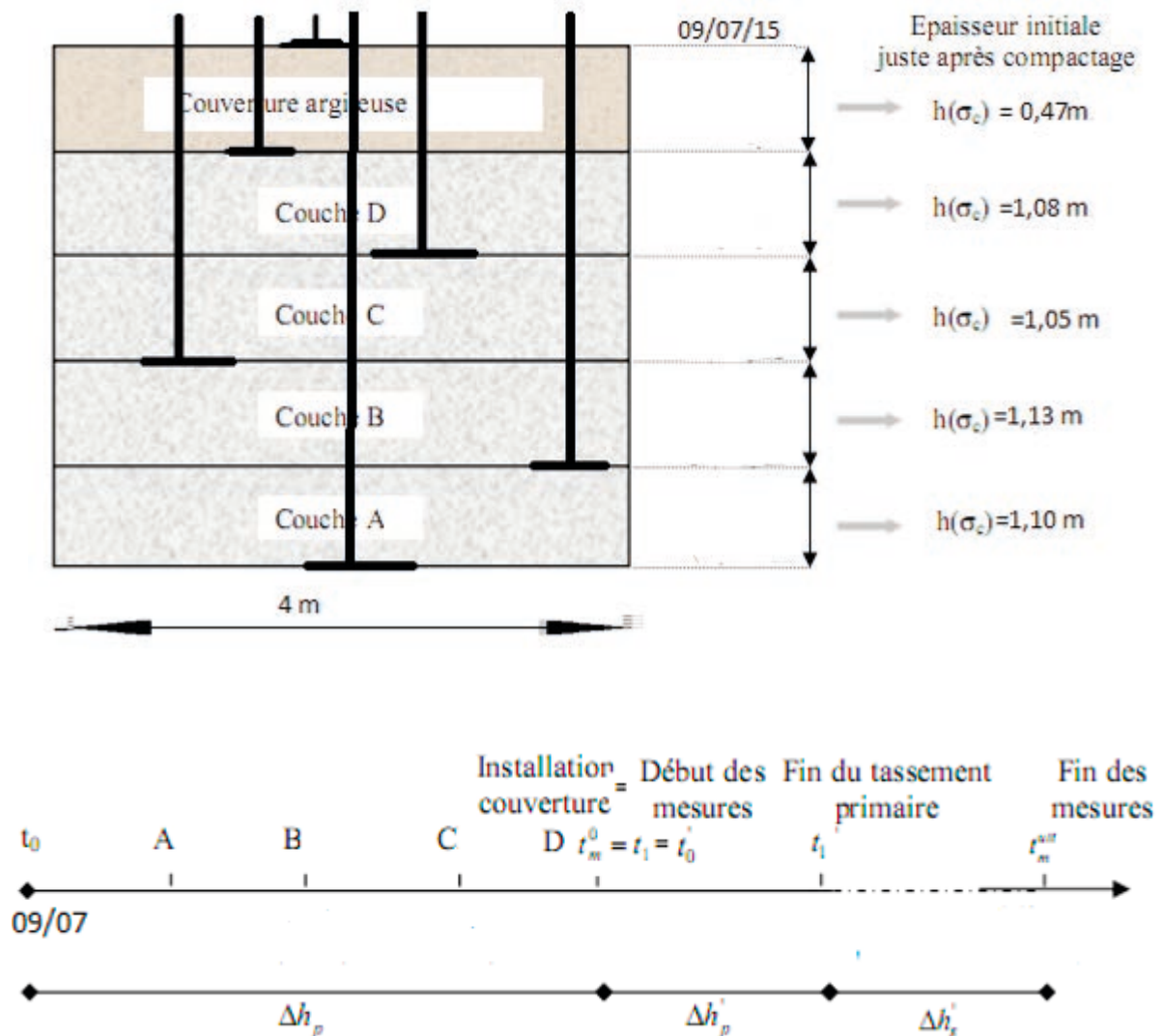


Figure 3. Modélisation du profil de remplissage et historique de remplissage

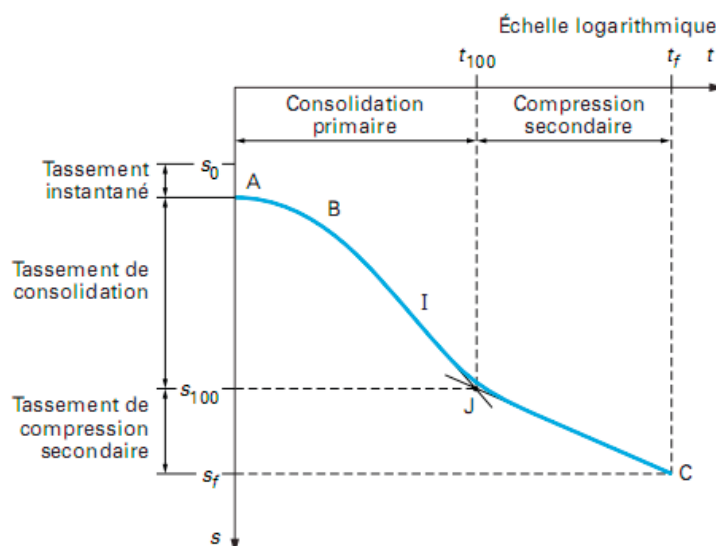


Figure 4. Courbe de consolidation théorique
 t_{100} correspond à la fin des tassements primaires

La mesure sur les barres se fait en prenant comme référence une graduation sur l'une des deux barres placées au fond du casier (elles ne subissent aucun tassement). On attache une corde sur ces barres à la graduation de référence et on la tend horizontalement jusqu'aux autres barres afin d'y lire la graduation.

2.3. Détermination de la date de fin des tassements primaires

La date de fin des tassements primaires est obtenue grâce à la courbe de consolidation (figure 4).

On exprime les tassements suivants :

- Tassement primaire (phase 1 : remplissage (instantané)) : $\Delta h_p = h(t_1) - h(\sigma_c)$
- Tassement primaire (phase 2 : post-remplissage) : $\Delta h'_p = h(t'_1) - h(t_1)$

Définition de Δh_p , $\Delta h'_p$, $h(\sigma_c)$, t_1 , t'_1

Les tassements sont définis comme la déformation rapportée à l'épaisseur initiale juste après compactage :

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta h_p}{h(\sigma_c)} \quad [1a]$$

$$\varepsilon'_p = \frac{\Delta h'_p}{h(\sigma_c)} \quad [1b]$$

2.4. Détermination du coefficient de compression primaire

D'après le modèle ISPM (Incremental Settlement Prediction Model), le tassement primaire relatif de chaque couche est

exprimé par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_p}{h(\sigma_c)} = C_R * \log \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right) \quad [2]$$

Le coefficient de compression primaire est donc donné par la relation :

$$(C_R)_{phase1} = \frac{\varepsilon_p}{\log \left(\frac{\sigma(t_1)}{\sigma_c} \right)} \quad [2a]$$

$$(C_R)_{phase2} = \frac{\varepsilon'_p}{\log \left(\frac{\sigma(t'_1)}{\sigma_c} \right)} \quad [2b]$$

La seule inconnue ici est σ_c , sa détermination est obtenue par la méthode graphique.

Elle est basée sur les diagrammes reprenant les valeurs de C_R^* en fonction de σ_c , inconnue, à partir des valeurs de déformation primaire et de surcharge. $(C_R^*)_{phase1}$ et $(C_R^*)_{phase2}$ ont été représentés en fonction de la préconsolidation supposée du déchet. Si l'on admet une valeur voisine de C_R^* pour chaque couche, on en déduit au point de concours des courbes correspondant à chaque couche, la valeur commune de σ_c . σ_c est la contrainte de remplissage exercée par les engins d'exploitation de la décharge sur chaque couche des déchets, ainsi que les charges exercées par les couches supérieures.

2.5. Détermination du coefficient de compression secondaire

La détermination des tassements secondaires des déchets dans les décharges de classe II est en général basée sur les

valeurs des coefficients de compression secondaire des déchets. Les variations de ce coefficient permettent de statuer sur des éventuelles variations significatives des valeurs des tassements secondaires dans le temps. Dans la littérature, on se limite en général à la valeur des tassements pour lesquels le coefficient de compression secondaire ne varie plus.

La détermination de ce coefficient sera faite à partir de la relation suivante :

$$C_{\alpha\varepsilon}(t) = \frac{\varepsilon(t)}{H(\sigma) \cdot \log\left(\frac{t-t'_0}{t'_1-t'_0}\right)} \quad [3]$$

La définition de $H(\sigma)$ est la hauteur des déchets de la couche qui reçoit la contrainte σ .

Dans notre cas, ce coefficient, ainsi que les valeurs de tassements ont été mesurés sur le même dispositif expérimental utilisé lors des mesures de tassement primaire et secondaire. Ces mesures ont été réalisées une fois par mois pendant six mois, autour de la deuxième année après la mise en place. Une mesure intermédiaire avait été réalisée 8 mois après la mise en place de la colonne des déchets.

3. Résultats

3.1. Mesure du tassement primaire instantané

Au cours du remplissage, la lecture sur les barres métalliques placées au-dessus des couches A, B, C et D, ainsi que la barre placée au fond du casier noté F, a permis de suivre l'évolution de la hauteur de chaque couche lors de la phase de remplissage résumé dans le tableau 1.

Le tassement subit par chaque couche durant la phase de remplissage est donc (tableau 2) :

Le tassement primaire instantané suivi par la couche A est le plus important et celui-ci décroît au fur et à mesure que l'on monte. Ce résultat est logique car la couche A a été soumise à plus de contrainte lors du remplissage : le poids des couches de déchets sus-jacentes ainsi que la contrainte de compactage de ces couches. Alors que la couche D n'a été soumise qu'au poids de la couverture d'où son faible tassement instantané.

Tableau 1. Évolution de la hauteur de chaque couche durant le remplissage

Couche	A	B	C	D	Couverture
H0 (m)	1,10	/	/	/	/
H1 (m)	1,08	1,13	/	/	/
H2 (m)	1,00	1,05	1,05	/	/
H3 (m)	0,93	1	0,98	1,08	/
Hf (m)	0,9	0,95	0,9	1,04	0,47

Tableau 2. Tassement primaire instantané subit par les couches durant le remplissage

Couche	A	B	C	D
Tassement (cm)	20	17,5	15	4
Tassement relatif	18,2 %	15,5 %	14,3 %	3,7 %

Tableau 3. Évolution du tassement post remplissage des couches du casier

	Tassement (cm)			
	Couche A	Couche B	Couche C	Couche D
Jour 1	1,5	3,5	2,5	3,5
Jour 2	3	7	5,5	4
Jour 3	4	11	9	5,25
Jour 4	6,5	13,5	14	6,5
Jour 5	9	14,5	15,75	7,5
Jour 6	11	15	16,25	8,15
Jour 7	11,75	15,25	16,5	8,25
Jour 9	11,95	15,3	16,65	8,4

3.2. Détermination de la date de fin des tassements primaires

L'évolution du tassement des couches de notre casier a été suivie quotidiennement tout en traçant progressivement la courbe de consolidation. Lorsque nous avons eu un changement de concavité de toutes les 4 couches, correspondant à la fin du tassement primaire ; nous avons interrompu les mesures quotidiennes. C'est ainsi que nous avons suivi l'évolution du tassement des couches de notre casier durant une dizaine de jours et les résultats ont été consignés dans le tableau 3.

Ces données nous permettent de tracer les courbes de consolidation de chaque couche du casier (figure 5). À partir de ces courbes, nous déterminons le temps de fin de tassement primaire de chaque couche et nous en ferons la moyenne pour déterminer le temps de fin de tassement primaire de toute la colonne de déchets.

Nous constatons que les couches B et C ont mis moins de temps à se stabiliser que les couches A et D. Pour la couche D, ceci s'explique facilement par le fait qu'elle ne supporte pas une grande surcharge donc son tassement s'est fait de manière très progressive d'où l'aspect étalé de sa courbe de consolidation. En ce qui concerne la couche A, au contraire, elle est soumise à la plus grande surcharge donc son tassement est très important. Et bien qu'une bonne partie ait eu lieu

durant la phase de remplissage, elle a subi encore un assez fort tassement post-remplissage. Elle avait donc déjà commencé à se stabiliser durant le remplissage ; c'est ainsi qu'après son tassement a été plus lent.

En déterminant donc graphiquement le point d'inflexion de chaque courbe, nous avons obtenu les dates de fin de tassement des quatre couches t'_1 , comptées à partir de la pose de la couverture (respectivement : 6 ; 4 ; 4,4 et 5,6 jours). Le temps de tassement t'_1 peut donc être estimé à 5 jours avec un écart type de 0,82 jours.

Le tassement qui nous intéresse est celui après la pose de la couverture. À la fin du remplissage du casier, la colonne de déchets a subi un tassement primaire instantané « e ».

$$e = (46,75 \pm 4) \text{ cm}$$

Ce qui correspond à un tassement relatif

$$\varepsilon'_p = \frac{e}{H} = \frac{0,4675}{3,785}$$

$$\varepsilon'_p = (12,35 \pm 1) \%$$

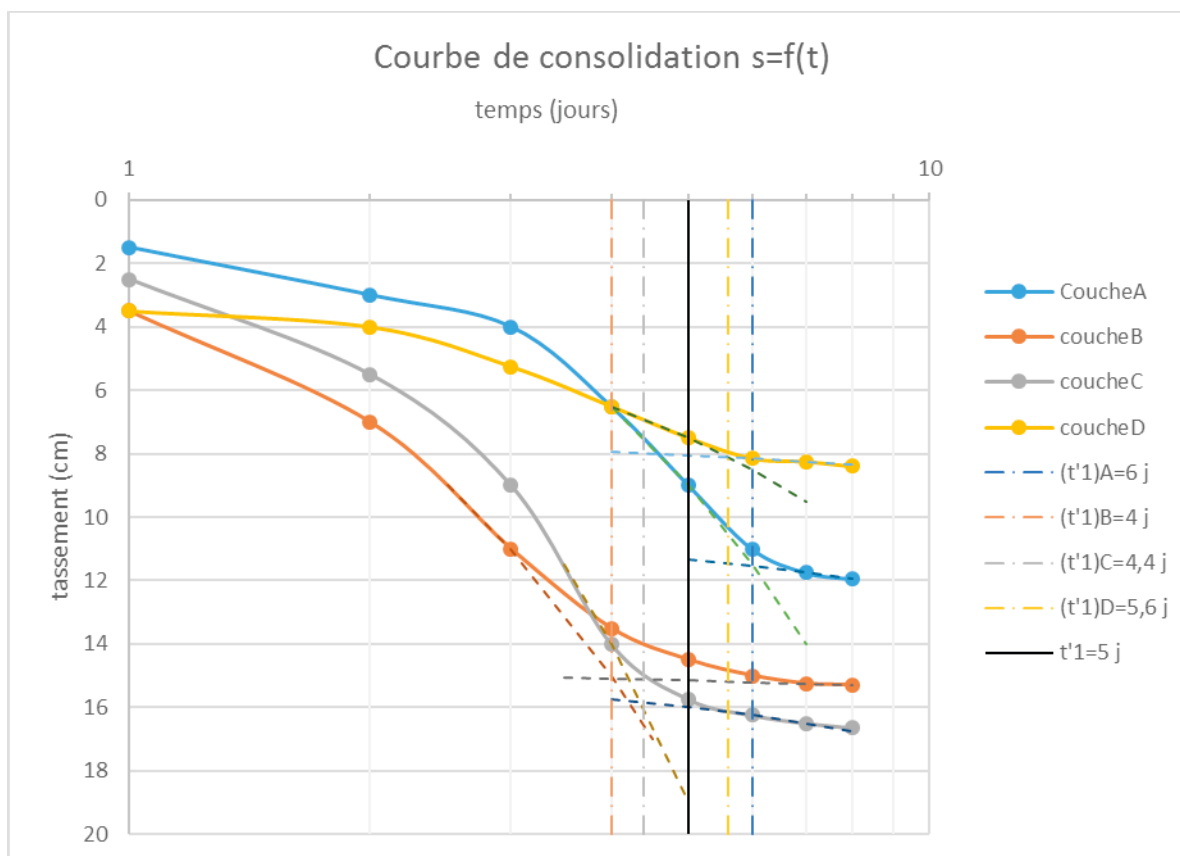


Figure 5. Détermination graphique du temps de tassement primaire t'_1 sur courbe semi-log de consolidation

3.3. Détermination du coefficient de compression primaire

La détermination du coefficient de compression primaire est un préalable pour l'étude ultérieure des tassements secondaires et ainsi pour la prédiction des tassements à long terme.

3.3.1. Détermination de la contrainte de remplissage σ_c

Nous allons exprimer les tassements subis par les couches durant et après le remplissage exprimé en déformation, c'est-à-dire rapportés à la hauteur initiale de chaque couche de déchets juste après le compactage [voir équation 1a et 1b].

Les résultats sont consignés dans le tableau 4.

Le coefficient de compression primaire est donc donné par la relation [2] [voir équation 2a et 2b] :

En développant pour chacune des quatre couches et en appliquant le principe de conservation de la masse à une couche i de déchet, nous avons la relation : $\gamma_o h_o = \gamma_i(t) h_i(t)$,

La figure 6 présente l'évolution de σ_c en fonction de C_R^* pour la phase 1. La valeur de s_c est interprétée graphiquement comme au point de jonction des 3 courbes (en excluant la couche D qui n'a pas subi un tassement représentatif).

Tableau 4. Déformation des couches A, B, C, D

Couche	$h(\sigma_c)$ (m)	ε_p	ε'_p
A	1,10	18,18 %	9,27 %
B	1,13	15,56 %	13,10 %
C	1,05	14,29 %	15,24 %
D	1,08	3,72 %	7,41 %

Tableau 5. Valeurs de σ_c en fonction de C_R^*

	Valeur de σ_c (kPa)					
	$C_R^* = 0,1$	$C_R^* = 0,2$	$C_R^* = 0,3$	$C_R^* = 0,4$	$C_R^* = 0,5$	$C_R^* = 0,6$
Couche A	0,57	2,48	4,98	7,06	8,71	10,01
Couche B	0,43	2,56	4,65	6,27	7,50	8,46
Couche C	0,41	2,11	3,65	4,80	5,66	6,31

Tableau 6. Détermination de $(C_R^*)_{\text{phase1}}$ en fonction de σ_c

	$\sigma_c = 1$ kPa	$\sigma_c = 2$ kPa	$\sigma_c = 3$ kPa
Couche A	0,14	0,18	0,22
Couche B	0,13	0,18	0,22
Couche C	0,14	0,19	0,25
Moyenne	0,14	0,18	0,23

Avec ces données, on trace le diagramme figure 6.

On obtient $1 \text{ kPa} < \sigma_c < 3 \text{ kPa}$. Cette valeur est plutôt faible comme on s'y attendait car le compactage a été effectué avec une pelle excavatrice.

3.3.2. Détermination de C_R^*

À partir des relations du tableau 5 et des valeurs probables de σ_c , nous calculons pour chaque couche C_R^* pour la phase 1 (tableau 6 et pour la phase 2 (tableau 7), en négligeant toujours la couche D lors de la phase 1.

Nous avons donc $0,1 < (C_R^*)_{\text{phase1}} < 0,23$

Nous avons donc $0,11 < (C_R^*)_{\text{phase2}} < 0,20$

En résumé nous avons :

$$0,14 < (C^*R)_{\text{phase1}} < 0,23$$

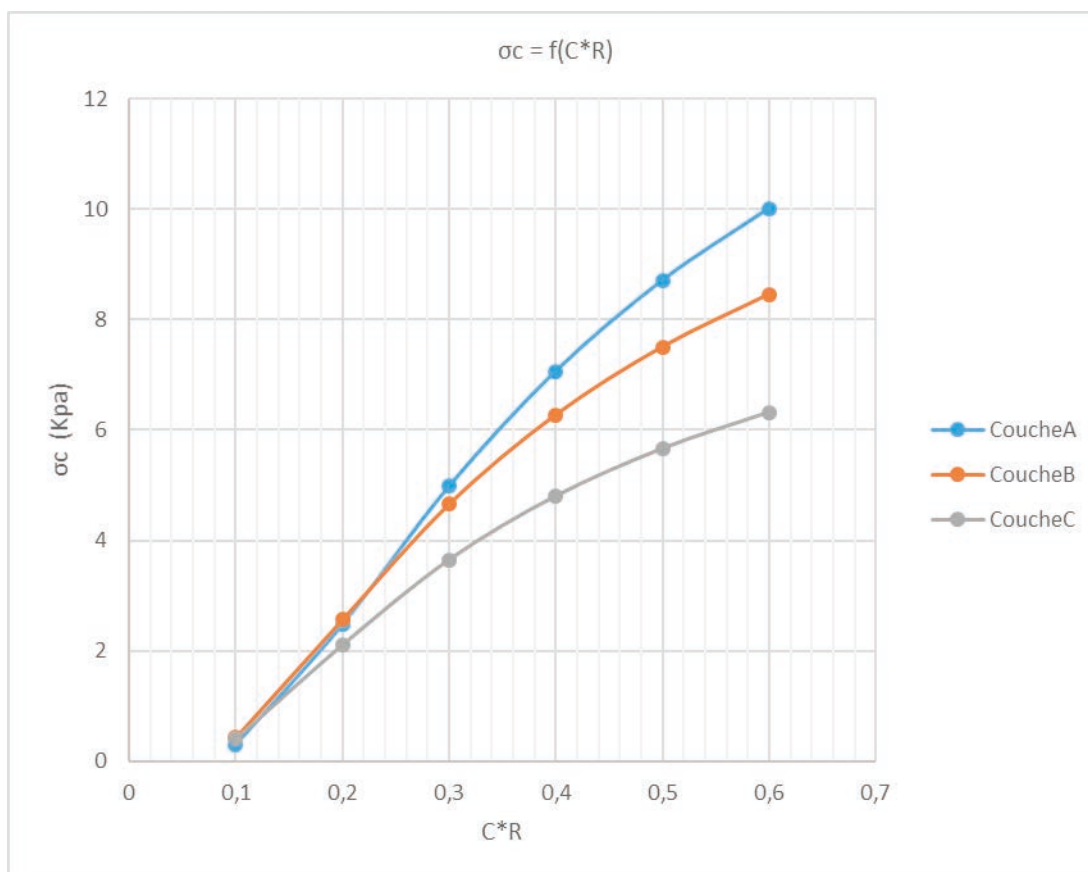
$$0,11 < (C^*R)_{\text{phase2}} < 0,20$$

Nous prendrons en moyenne les valeurs de C_R^* dans l'intervalle :

$$0,13 < C_R^* < 0,22$$

Bien que cette détermination présente une forte incertitude, les valeurs de C^*R obtenues sont tout à fait compatibles avec

Figure 6. Détermination graphique de σ_c



les données disponibles dans la littérature [Olivier, 2003], qui stipule que $0,18 < C^*_R < 0,24$.

Nous prendrons donc :

$$C^*_R = 0,20$$

Cette valeur nous sera utile lors de l'étude des tassements secondaires, pour la détermination du coefficient de compression secondaire. En effet, à un instant t quelconque,

en mesurant le tassement secondaire relatif d'une colonne de déchets et ayant l'historique de remplissage, on peut calculer le coefficient de compression secondaire.

3.4. Résultats des tassements secondaires

Les mesures de tassements 7 mois après la phase primaire a donné les résultats spécifiés dans le tableau 8.

Tableau 7. Détermination de $(C^*_R)_{\text{phase2}}$ en fonction de σ_c

	$\sigma_c = 1 \text{ kPa}$	$\sigma_c = 2 \text{ kPa}$	$\sigma_c = 3 \text{ kPa}$
Couche A	0,07	0,09	0,11
Couche B	0,11	0,15	0,18
Couche C	0,15	0,21	0,27
Couche D	0,09	0,15	0,23
Moyenne	0,11	0,15	0,20

Tableau 8. Tassement secondaire à J218

tassement secondaire à J218 (cm)			
Couche A	Couche B	Couche C	Couche D
3,65	4,2	4,25	4,8

Tableau 9. Coefficient de compression secondaire à 7 mois

Coefficient de compression secondaire			
Couche A	Couche B	Couche C	Couche D
0,020	0,023	0,025	0,027

Ces données nous permettent d'avoir une première approximation du coefficient de compression secondaire $C_{\alpha\varepsilon}$ qui varie entre 0,02 et 0,027 (tableau 9)

Soit une moyenne

$C_{\alpha\varepsilon} = 0,024$ pour l'ensemble de la colonne des déchets.

Au bout de 228 jours, nous constatons que le tassement secondaire enregistré est de 24,3 cm pour l'ensemble des 4 couches des déchets. Soit un tassement relatif « ε'_p » de

$$\varepsilon'_p = \frac{e}{H} = \frac{0,243}{3,785}$$

Nous constatons qu'on est encore loin de la fin du tassement secondaire. D'où la nécessité de poursuivre ces mesures.

Un suivi des tassements secondaires a été effectué entre le 21^{ème} et le 25^{ème} mois après la couverture de notre casier expérimental (tableau 10). Les résultats suivants ont été observés :

Le coefficient de compression secondaire tend à se stabiliser vers une valeur de **0,068** pour toute la colonne des déchets
 $C_{\alpha\varepsilon} = 0,068$

Pour un tassement relatif à 759 jours soit 2 ans et 29 jours :

$$\varepsilon'_p = \frac{e}{H} = \frac{0,573}{3,785} = 0.1514$$

$$\varepsilon'_p = 15,14\%$$

Cette courbe de consolidation globale (figure 7) montre que le tassement secondaire démarre presque à la fin du tassement primaire et reste légèrement stable jusqu'à sept mois. Après la colonne des déchets subi un tassement important avant d'atteindre une stabilité au bout du 21^{ème} mois. On attendrait qu'après 7 mois la variation du tassement secondaire reste faible. Dans le cas de notre expérimentation, le faible compactage des déchets dans le casier expérimental est à l'origine de ce phénomène.

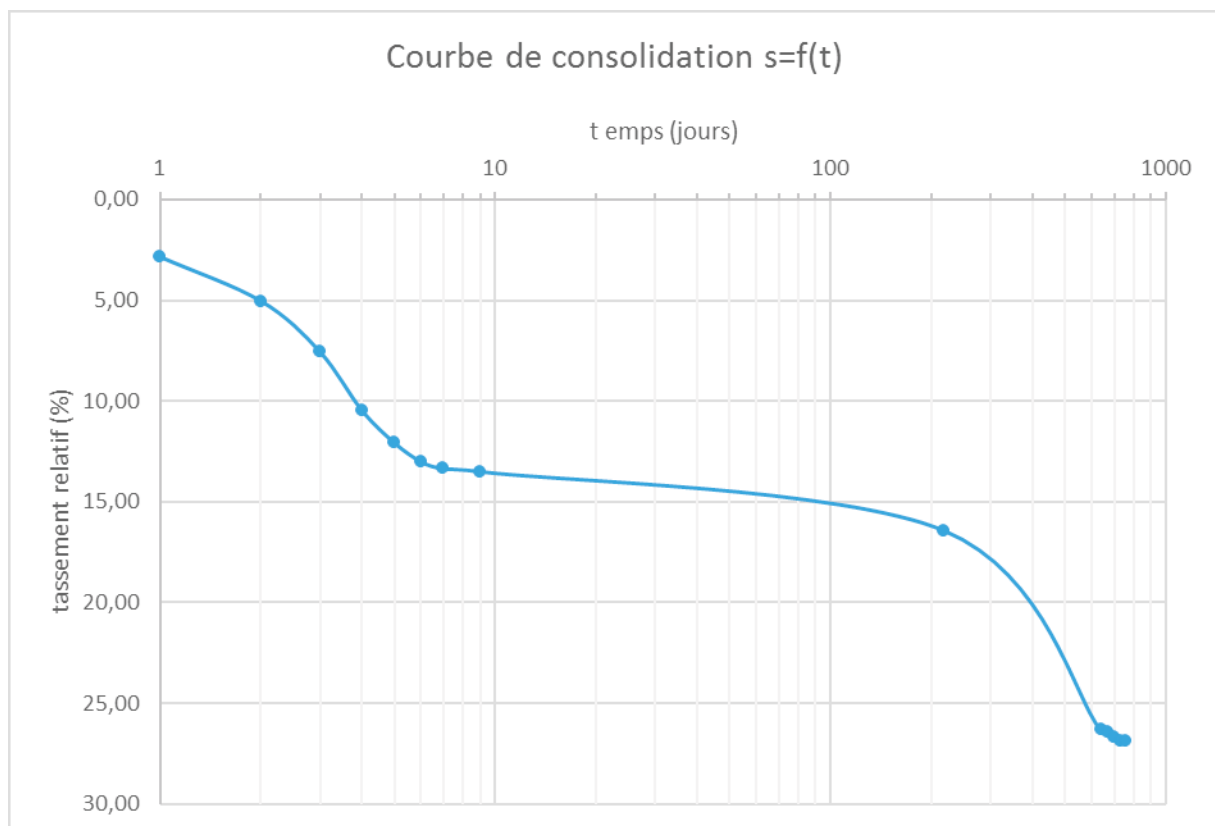
**Figure 7. Courbe de consolidation finale**

Tableau 10. Suivi des tassements secondaires

jour	218	639	669	699	729	759
date		08/04/17	08/05/17	07/06/17	07/07/17	06/08/17
H(m)	3,785	3,785	3,785	3,785	3,785	3,785
tassement total (m)	0,636	1,02	1,025	1,035	1,04	1,04
tassement relatif	16,80 %	26,95 %	27,08 %	27,34 %	27,47 %	27,47 %
tassement secondaire (m)	0,169	0,552	0,557	0,568	0,573	0,573
tassement secondaire relatif	4,46 %	14,58 %	14,71 %	15 %	15,14 %	15,14 %

4. Discussion

La valeur de la déformation primaire obtenue (12,35 %) est bien comprise dans l'intervalle spécifié par le guide méthodologique pour le suivi des tassements des centres de stockage de classe II, qui est de 5 à 20 % [ADEME, 2005].

L'intervalle dans lequel le coefficient de compression primaire est cohérent avec celui obtenu lors de l'essai de la cuve BRE malgré une légère différence. En effet nous avons $0,13 < C^*_R < 0,22$ tandis que pour la cuve BRE on a $0,13 < C^*_R < 0,17$. Cette légère différence s'explique par le fait que les surcharges appliquées sur chaque couche lors de notre essai sont inférieures à celles de l'essai de la cuve BRE. En effet, le poids volumique solide γ_0 du déchet après pose de la couverture argileuse (50 cm) avoisine $\gamma_0 = 4,23 \text{ kN/m}^3$ dans notre cas mais vaut 5,9 dans le cas de la cuve BRE. Or sachant que le coefficient de compression primaire est inversement proportionnel à la surcharge, on comprend clairement que les valeurs obtenues soient plus grandes que dans le cas de la cuve BRE. Nous avons pu ressortir que plus le poids volumique était élevé, plus le tassement primaire décroissait. En effet, en faisant des simulations de calcul des équations [1] et [2] dans des conditions de compactage différentes : déchets moyennement compactés ($6 \text{ kN} < \gamma_0 < 9 \text{ kN}$) et déchets fortement compactés ($10 \text{ kN} < \gamma_0 < 13 \text{ kN}$), nous avons obtenu des valeurs de tassement primaire compris respectivement entre 6,50 % et 7,1 % pour les déchets moyennement compactés et entre 6,1 % et 6,4 % pour les déchets fortement compactés. Ces valeurs sont pratiquement la moitié de celles que nous avons obtenues lors de notre expérimentation avec un faible compactage. Nous nous rendons donc compte de la forte influence des conditions d'exploitation sur la valeur du tassement primaire. Les résultats obtenus ainsi permettent de couvrir tous les cas d'exploitation possible dans une décharge. Les valeurs de tassement primaire obtenues lors de notre essai sont proches des valeurs réelles pour les décharges non compactées, notamment les décharges traditionnelles qui sont plus répandues dans les villes africaines. Par contre, en conditions d'exploitation réelle sur la décharge de Nkolofoulou où le compactage est optimal, on devrait avoir un tassement primaire relatif proche de 6,5 %.

La valeur préliminaire du coefficient de compression secondaire au bout de 7 mois est en dessous de la valeur trouvée (0,024) lors de l'expérimentation de la cuve BRE (0,033). Néanmoins cette valeur n'étant pas considérée comme définitive, le tassement secondaire après un suivi sur 2 ans, a donné une valeur du coefficient secondaire de 0,068. Le guide méthodologique établi par l'ADEME pour le suivi des tassements des déchets des centres de classe II prévoit un coefficient de compression secondaire variant entre 0,03 et 0,20. La valeur du coefficient de compression secondaire obtenu dans notre étude se trouve bien dans la fourchette indiquée par l'ADEME. Le tassement secondaire dépend des conditions d'exploitation de la décharge. Pour une décharge non compactée, on peut assister pendant cette phase de tassement secondaire à une variation brusque de la colonne des déchets, entraînant le dysfonctionnement du casier.

Conclusion et recommandation

Ce travail nous a permis de mesurer le tassement primaire d'environ 13 % de la hauteur de la colonne de déchets durant une expérience pilote. Ce tassement primaire élevé est proche des valeurs observées dans les décharges non compactées qui sont généralisées dans les villes africaines. Dans les alvéoles moyennement compactées, la valeur de tassement primaire serait proche de 7 %. Ce tassement primaire constitue un gain de volume pendant l'exploitation.

Ces données originales concernant les déchets produits en Afrique permettent de faire une avancée notable dans le domaine du dimensionnement des décharges. En effet, la mise en place d'une hauteur supplémentaire de déchets pour obtenir après tassement la hauteur du casier, permet non seulement d'augmenter la durée de vie de la décharge mais aussi de faire un gain économique non négligeable. Par exemple dans la décharge de Nkolofoulou, l'exploitation du gain de volume lié au tassement primaire, permettrait de gagner environ 6 ans sur la durée de vie de la décharge estimée à 30 ans. Cette économie permet à la ville de Yaoundé de décaler les nouveaux investissements pour une nouvelle décharge.

Le tassement secondaire a démarré dès la fin du tassement primaire. Comme attendu, il a évolué légèrement jusqu'au 7^{ème} mois. Après on a assisté à une accélération de tassement qui

s'est stabilisé au bout de 21 mois. La forte augmentation du tassement secondaire après 7 mois est liée aux conditions d'exploitation du casier expérimental (faible compactage des déchets). Ce résultat met en évidence les dysfonctionnements qu'on pourra observer dans les décharges traditionnelles dans les villes des pays en développement où les déchets sont non ou légèrement compactés. Le tassement secondaire n'est pas directement lié aux contraintes exercées sur les déchets enfouis, contrairement au tassement primaire. On observe que la valeur de tassement secondaire est très importante dans le cas de Yaoundé (15 % de la colonne des déchets), ce qui serait lié à la forte présence de matière organique biodégradable dans les déchets [Ngnikam et al, 2017]. En effet, la dégradation de la matière organique observée lors du compostage entraîne une perte de volume de 50 à 70 % lors de la fermentation et la maturation. Bien qu'en décharge, le phénomène de dégradation soit anaérobie (méthanisation), il peut entraîner des taux de biodégradation comparable. La connaissance de la valeur de ce tassement secondaire est importante pour l'exploitation des décharges. Notamment, la prise en compte du tassement secondaire permet de mieux dimensionner les installations de captage de biogaz en décharge (meilleur positionnement des puits horizontaux) afin de limiter les fuites.

Références bibliographiques

- ADEME (2005). Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de Classe II. (Déchets ménagers et assimilés). ADEME Editions, Angers 2005, 60 p. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/25168_guide_tassements.pdf
- 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. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 214 p.
- Hydroconseil/ERA-Cameroun (2016). Rapport d'enquête CAP (connaissances, attitudes, pratiques), dans le cadre de la deuxième phase du projet d'assainissement de Yaoundé (PADY2). Rapport final, 184 p.
- Ngnikam Emmanuel, Naquin Pascale, Djietcheu K. Bruno, Pagbe Peha C.A., Zahrani Fouad, (2016). Comportement des déchets en décharge sous climat tropical humide : cas de Nkolofoulou à Yaoundé. *Déchets Sciences et Techniques* n° 71. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3349>
- Ngnikam Emmanuel, Naquin Pascale, Oumbe Ritha, Djietcheu K. Bruno (2017). Évolution des caractéristiques des déchets solides ménagers dans la ville de Yaoundé au Cameroun (1995-2015). *Déchets Sciences et Techniques* n° 74. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3654>
- Ngnikam Emmanuel (2000). Évaluation environnementale et économique de systèmes de gestion des déchets solides municipaux : Analyse du cas de Yaoundé au Cameroun. Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 363 p.
- Olivier Franck (2003). Tassement des déchets en CSD de classe II : du site au modèle. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 334 p.
- Tchindjang Mesmin, Amougou Joseph Armathée, Abossolo Samuel Aimé, Bell Stanislas B. (2012). Challenges of climate change, landscape dynamics and environmental risks in Cameroon. In Runge J (Ed): *Landscape evolution, neotectonics and quaternary environmental change in Southern Cameroon. Palaeoecology of Africa*, 31, chap. 5, pp. 237-286.
- Watts K.S. Fisher A.R.J., Lewicki R.A. (2001). A large-scale instrumented test of the behavior of newly placed domestic waste. 8th International waste management and landfill symposium, II, pp. 105-114.
- ZAHRANI Fouad (2006). Contribution à l'élaboration et validation d'un protocole d'audit destiné à comprendre les dysfonctionnements des centres de stockage des déchets (CSD) dans les pays en développement. Application à deux CSD : Nkolofoulou (Cameroun) et Essaouira (Maroc). Thèse de doctorat, École doctorale de chimie de Lyon, 269 p. <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2006ISAL0075/these.pdf>