

ORIGINAL RESEARCH PAPER  
**EVALUATION OF POLLUTION GENERATED BY LANDFILL  
LEACHATE PUBLIC OF THE CITY OF MOHAMMEDIA AND ITS  
IMPACT ON THE GROUNDWATER QUALITY**

**EVALUATION DE LA POLLUTION GENEREE PAR LES  
LIXIVIATS DE LA DECHARGE PUBLIQUE DE LA VILLE DE  
MOHAMMEDIA ET SON IMPACT SUR LA QUALITE DES EAUX  
SOUTERRAINES**

**Abderrahim Idlahcen<sup>1</sup>, Salah Souabi<sup>1\*</sup>, Abdessalem Taleb<sup>1</sup>, Khadija  
Zahidi<sup>1</sup>, Mohammed Bouezmarni<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Université Hassan II Mohammedia, Faculté des Sciences et Techniques,  
Laboratoire de Génie de l'Eau et de l'Environnement, BP 146,  
Mohammedia, Maroc*

<sup>2</sup>*Laboratoire des Ressources Hydriques, Université de Liège, Belgique*

\*Corresponding author: [salah.souabi@gmail.com](mailto:salah.souabi@gmail.com)

Received: April, 04, 2014

Accepted: May, 25, 2014

**Abstract:** The diagnosis of the leachate has shown a strong no biodegradable (COD/BOD5 varies between 3 and 50) organic pollution. High NTK concentrations vary between 2296 and 490 mg·L<sup>-1</sup> have been observed which can induce a nuisance of surface water near the discharge and receiving of leachate. The analysis of metallic elements of leachate showed a high concentration in chrome 1598 μg·L<sup>-1</sup> as maximum value and 27 μg·L<sup>-1</sup> as minimum and maximum high in As, Cu, Ni, Pb and Zn which testifies to the pollution of leachate from the discharge gross receiving every type of waste (management waste and industrial waste). The results showed that P1, P3, P5, P6, P8, P9, and P10 have high concentrations in NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (389 and 111 mg·L<sup>-1</sup>) exceeding the standards of potability (50 mg·L<sup>-1</sup>). Sinks P1, P5, P7, P8, P9 and P10 are highly mineralized since the conductivity varies between 5990 and 1480 μS·cm<sup>-1</sup>, while the organic matter remains higher than the standard of 2 mg·L<sup>-1</sup>. The analysis of metallic element in groundwater have shown significant concentrations in Ni (175 and 59 μg·L<sup>-1</sup>), Zn (266 and 6 μg·L<sup>-1</sup>) and Pb (165 and 30 μg·L<sup>-1</sup>) confirming the degradation of groundwater. These results show that the public discharge has a considerable impact on the groundwater near the discharge.

**Key words:** *groundwater, landfill leachate, metallic element, pollution, public discharge*

## INTRODUCTION

Au Maroc, face à la production croissante des ordures ménagères et des déchets industriels, les problèmes de pollution sont de plus en plus ressentis. Leur nature qui devient de plus en plus complexe et hétérogène fait que la nocivité de ces déchets est plus marquée et que leur élimination, valorisation ou traitement deviennent plus difficiles. La grande partie des déchets solides au Maroc est mise en décharge sauvages (décharge de Mesbahiat) ce qui constitue une réelle et permanente menace à l'environnement [1-2].

La décharge de la commune de Mohammedia reçoit en moyen 180 tonnes par jour [3] de déchets de toute nature (ordures ménagères et déchets industriels).

Durant ces dernières décennies, les décharges publiques ont causé beaucoup de problèmes à l'environnement [4-5]. La pollution des eaux souterraines par les métaux lourds ou par des polluants organiques souvent non biodégradables au voisinage des décharges a été souvent signalée dans la littérature [6]. Cela crée ainsi la nécessité de connaître l'état de pollution de lixiviat et la migration des métaux lourds vers les eaux souterraines. La fermentation de ces déchets génère une grande quantité de lixiviat noirâtres pouvant contenir des éléments indésirables organiques et minéraux. En conséquence, les polluants (polluants organiques et métalliques) vont porter atteinte tant à la santé publique qu'aux réserves halieutiques puisqu'au niveau de certaines communes les eaux souterraines sont utilisées comme source d'alimentation en eau potable. Un autre problème qu'il faut soulever est celui du devenir des eaux d'infiltration qui percolent à travers les déchets solides enfouis dans les décharges sauvages. Ces eaux se chargeant en matières nuisibles polluent tant les eaux souterraines (cas de la décharge de Médiouna, Casablanca) que les eaux de surface et les eaux souterraines (cas de la décharge de Mohammedia). Des études antérieures ont indiqué que la nappe phréatique de Mohammedia est soumise à de multiples sources de pollution [2, 7].

Une partie de ces lixiviats s'infiltré dans le sol et pollue les eaux souterraines. Une autre partie est rejetée dans les eaux de surface d'Oued El Maleh qui se situe à proximité de la décharge. Ces lixiviats sont trop chargés en matières organiques et minérales ayant un impact considérable sur le milieu récepteur.

L'étude de la qualité physico-chimique [8] des eaux souterraines proches de la décharge de Casablanca a décelé des teneurs élevées en éléments majeurs et en éléments métalliques émanant des lixiviats de la décharge du grand Casablanca. La percolation des lixiviats vers la nappe est favorisée par la présence des failles qui affectent l'aquifère sous-jacent. En plus de ces effets néfastes sur l'eau s'ajoute la pollution de l'air provoquée par les mauvaises odeurs ainsi que les risques de propagation de maladies contagieuses dans l'agglomération de bidonvilles avoisinants.

Compte tenu de la charge polluante minérale et organique produite, la qualité des eaux souterraines se trouve donc menacée par les différentes formes de polluants. Les métaux lourds, associés aux divers rejets, représentent les polluants les plus redoutés pour ces milieux en raison de leur concentration par certains organismes vivant [9] et de leur implication dans les phénomènes de bioaccumulation et bioamplification dans les chaînes alimentaires.

En effet, il a été montré par Kouame et al. (2006) [10] que les métaux des rejets de lixiviats constituent une menace pour les eaux de proximité et en particulier pour la

nappe d'Abidjan. Cependant, les dangers que peuvent présenter des sols fortement contaminés en métaux traces, ne correspondent pas forcément à un risque de migration des métaux dans le sol [11]. Les rejets de lixiviats des décharges publiques doivent être traités avant rejet dans le milieu récepteur. Au Maroc l'osmose inverse est la seule technique actuellement utilisée pour minimiser les nuisances des polluants de lixiviats. Ces rejets sont difficiles à traiter et le coût est plus élevé pour la plupart des techniques utilisées [12-15].

Pour se débarrasser des produits indésirables contenus dans les eaux des lixiviats et réduire les risques de pollution des ressources hydriques, les décideurs doivent recourir à la création des décharges contrôlées, et à la valorisation des déchets solides.

Le but de cette étude est de réaliser un diagnostic des rejets de lixiviats et d'évaluer par la suite le risque de contamination de la nappe phréatique de Mohammedia par les métaux issus de la décharge.

### **Situation géographique de la décharge et cadre géologique et hydrogéologique**

La décharge de Mohammedia exploitée depuis 1987, se situe à 5 km au sud de la ville juste après le pont enjambant l'oued El Maleh. C'est une ancienne carrière de calcaire de 6 ha 50 dont le sol est caractérisé par des schistes, représentant des fissures [16]. La décharge reçoit tous les déchets de la ville et ceux des communes d'Ain Harrouda et Chellalate. Ces déchets sont entassés au fond du site de la décharge et forment un front d'environ 3 mètres. En partie basse s'écoulent les lixiviats avec un débit important, générant un lac d'environ 30 m de diamètre. Ces lixiviats s'écoulent gravitairement vers l'Oued El Maleh situé à 30 m de la décharge (Figure 1) ou s'infiltrent dans la nappe phréatique dont le niveau piézométrique est à quelques mètres de profondeur.



*Figure 1. Accumulation du lixiviat proche de la décharge*

La moyenne pluviométrique annuelle est de  $404 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$  [17]. La proximité de l'océan Atlantique donne à cette région un climat tempéré et humide avec un hiver doux et un été rafraîchi par l'action atténuante exercée par la brise de mer (température maximale  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , température minimale  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Le réseau hydrographique est formé par deux oueds et leurs affluents qui traversent la ville en diagonale (oued Nfifikh, oued Mellah) et des *dayas* temporaires et permanents [18].

La zone de Mohammedia fait partie d'un plateau constitué d'un ensemble de plaines littorales correspondant soit à des zones agricoles, soit à des dépressions submergées temporaires ou permanentes [19].

Le secteur de la ville de Mohammedia fait partie de l'unité géologique appelée plaine de la basse Chaouia. Ce bassin est constitué de Schistes et de Quartzites de l'ère primaire dans lesquels viennent s'insérer une série psammitique violine au niveau de la basse Chaouia. On estime l'épaisseur visible des Schistes et psammites à 1000 m et les quartzites à 170 m. Les formations de l'ère secondaire sont peu présentes dans ce bassin et ne semble pas avoir un rôle dans l'hydrologie, dans ces formations. On rencontre tout d'abord le permo-trias (argiles pélitiques, grés rouges, conglomérats et coulées basaltiques) associés à des niveaux gypsifères importants.

Ces terrains n'affleurent que sur les bordures, notamment au nord de vallée de l'Oued El Malleh. Au dessus, on trouve des terrains transsifs de l'infra cénomanien (argiles rougeâtre riches en gypse) placés en discordance. Le sol est connu par sa texture fine et sa composition marneuse argileuse, compte tenu de la nature lithologique aluminosilicatée du sous-sol à savoir des schistes et des quartzites, et les argiles-conglomérats du quaternaire.

La nappe principale située entre Casablanca et Mohammedia est nommée la nappe de la basse Chaouia. Le secteur nord-est, la basse Chaouia constitue un relais hydraulique des nappes plioquaternaires de la plaine, qui circuleraient dans les formations cénomaniens. En règle générale, la nappe circule du sud-est vers le nord-ouest, mais la piézométrie très perturbée, témoigne d'une hétérogénéité du complexe aquifère Schiste-Quartzite, les quartzites fissurées jouent un rôle de drain vis-à-vis de l'eau souterraine des autres formations. Les fluctuations de la nappe varient généralement de 4 à 10 m.

## MATERIELS ET METHODES

### Prélèvements des échantillons

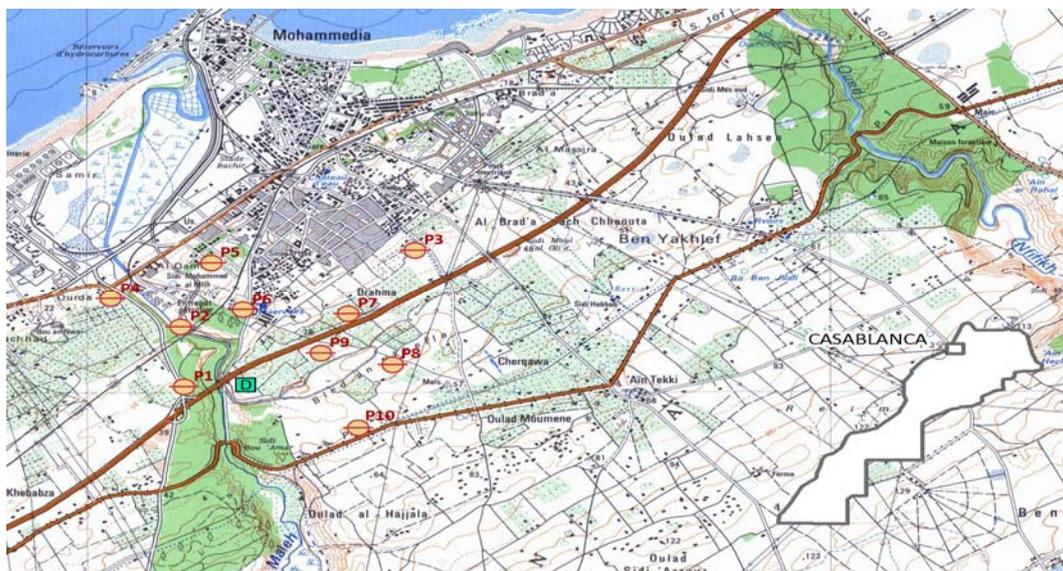
Dans le but de caractériser les lixiviats, des échantillons ont été prélevés en différents points (E1 à E10, Figure 2).



**Figure 2.** Situation des points de prélèvements (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9 et E10) des lixiviats de la décharge publique

Dans le but de déterminer l'impact des lixiviats sur les eaux souterraines, des points de prélèvement sont choisis de façon à ce que l'échantillonnage soit représentatif suivant sa situation par rapport aux sources de pollution.

La Figure 3 présente la répartition des différents points de prélèvements des eaux souterraines choisis pour l'étude.



*Figure 3. Répartition des différents points de prélèvements des eaux souterraines*

Par ailleurs, le collecteur principal permettant de rassembler l'ensemble des rejets de lixiviats rejetés par la décharge publique de Mohammedia est illustré sur la Figure 4.



*Figure 4. Collecteur principal des rejets de lixiviats de la décharge publique de Mohammedia*

Pour l'analyse des métaux traces, Pb, Zn, Cu, Fe et Cd, l'échantillonnage a été effectué dans des flacons en polyéthylène spécialement lavés à l'acide chlorhydrique (10 %) puis

rincés à l'eau distillée. Pour l'analyse du mercure, les prélèvements ont été effectués dans des flacons en verre préalablement lavés à l'acide nitrique (dilué au demi) et rincés à plusieurs reprises à l'eau bi-distillée. Les échantillons sont par la suite fixés par l'acide nitrique à 2 % (65 % supra pur Merck) et transportés à basse température (+ 4°C) jusqu'au laboratoire.

### **Techniques d'analyse**

Les différents paramètres physico-chimiques (pH, turbidité, conductivité électrique, TAC, dureté totale, DCO, DBO5, NTK, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, oxydabilité par KMnO<sub>4</sub>) ont été déterminés par les méthodes normalisées [20].

Les éléments métalliques dans le lixiviat et dans les eaux de puits ont été analysés par ICP après minéralisation par l'eau régale.

### **Méthodes de minéralisation des eaux [21]**

- A 50 mL d'échantillon de lixiviats ou d'eau de puits, on a ajouté 10,5 mL d'acide chlorhydrique concentré et 3,5 mL d'acide nitrique concentré.
- Les échantillons de lixiviats et des eaux de puits ont été laissés au repos pendant 16 heures, puis ont été portés à ébullition pendant 2 heures jusqu'à l'apparition de fumées blanches.
- Après refroidissement, la solution acide a été filtrée sur membrane 0,45 µm et stockée pour être analysée par ICP.

## **RESULTAT ET DISCUSSIONS**

### **Constituants des déchets solides reçus par la décharge**

La connaissance de la composition du déchet permet d'évaluer les risques de percolation à travers le sol (lixiviation). Lors de la solubilisation par les eaux pluviales de substances chimiques, souvent hautement toxiques que contient les déchets passent dans les eaux de lixiviat. La société qui s'occupe de la gestion des déchets solides a collecté en 2008 au niveau de Mohammedia 62317 tonnes de déchets ménagers et industriels acheminées vers l'unique décharge de Mesbahiat. Sur le plan écologique la sonnette d'alarme est déjà tirée, car en plus de la pollution de l'air, les eaux de l'Oued Al Maleh (Figure 3) présentent une forte pollution à cause des lixiviats produits par la décharge [2].

Les analyses bactériologiques et toxicologiques ont montré une multitude de germes. Le triage a été réalisé pour une masse d'environ 200 kg de déchet durant trois campagnes pour évalués les constituants de différents déchets en % (Tableau 1).

Les résultats montrent que les déchets sont riches en matières biodégradables et que les décharges publiques constituent des sources de matières premières non négligeables. Ces déchets triés présentent un taux d'humidité variant autour de 58 % ce qui facilite le choix d'une technique de traitement biologique en particulier le compostage naturel le plus utilisé dans les pays en soleillé.

Les pourcentages des matières organiques et des matières minérales sont respectivement de 74% et 26% et restent très proches des valeurs (73% et 27%) [22]. Ceci correspond à 43654 T/an de matières organiques et 16146 T/an de matières minérales produites en 2007.

**Tableau 1.** Pourcentages des différents constituants triés en trois périodes 2006, 2008 et 2009

	éléments triés en %Avril 2006	éléments triés en % Mars 2008	éléments triés en % Avril 2009	Valeur moyenne
Matières biodégradables	65	76	73	71,3
Plastiques	7,5	8	8,8	8,1
Papiers Carton	9	6	4,8	6,6
Verre	1	2	0,5	1,17
Métal	3	1,5	2	2,17
Bois	1	1	2,1	1,37
Divers	13,5	5,5	8,8	9,27

La Figure 5 montre le triage des déchets à la décharge publique de Mohammedia par les chiffonniers.



**Figure 5.** Triage et valorisation des déchets de verreries

### Caractérisation de lixiviat de la décharge de Mohammedia

Pour évaluer l'impact d'une décharge sur l'environnement, il est nécessaire de caractériser les effluents qu'elle génère. En effet, quel que soit le mode d'exploitation d'une décharge, les lixiviats constituent, s'ils ne sont pas traités avant leur rejet, une source de nuisance qui vient s'ajouter aux nombreux problèmes de contamination du milieu environnant. Ces liquides chargés en substances minérales et organiques issues de la décomposition des déchets peuvent ruisseler et atteindre les eaux superficielles, ou s'infiltrer à travers le substratum de la décharge et contaminer les eaux de la nappe phréatique située à 3-15 m de profondeur.

Les caractéristiques physico-chimiques des rejets des lixiviats sont illustrées sur le Tableau 2. La demande chimique en oxygène (DCO) mesurée dans cette étude varie

entre 5058 mg·L<sup>-1</sup> et 69805 mg·L<sup>-1</sup>. Ces valeurs restent supérieures à la norme marocaine qui est de l'ordre de 500 mg·L<sup>-1</sup>. Quant à la demande biochimique en oxygène, elle oscille entre 1254 et 2745 mg·L<sup>-1</sup>, alors que la norme est de 100 mg·L<sup>-1</sup>. Cette fraction organique est fortement liée à la dégradation incomplète de la matière organique des déchets. Ces jus de lavage et de décomposition des ordures se révèlent très toxiques et difficiles à traiter [23].

**Tableau 2. Paramètres physico-chimiques de lixiviat**

Prélèvement	pH	Turbidité [NTU]	Conductivité [mS·cm <sup>-1</sup> ]	DCO [mg O <sub>2</sub> ·L <sup>-1</sup> ]	DBO5 [mgO <sub>2</sub> ·L <sup>-1</sup> ]	DCO/DBO5	NTK [mg·L <sup>-1</sup> ]	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg·L <sup>-1</sup> ]	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg·L <sup>-1</sup> ]	P totale [mg·L <sup>-1</sup> ]
E1	8	68,00	32,80	13151,8	1980	6,7	1392,20	224,6	266,30	9,3
E2	7,93	87,30	37,30	12140	2745	5	1448,30	45,8	188,65	3,3
E3	8	87,33	38,50	7081,7	2346	3,03	1308	306	113,4	1,9
E4	8,1	26,4	37,60	11634,2	2240	5,26	1280	402,5	82	3,2
E5	7,9	38,5	35,9	5058,4	1432	3,6	490	133,5	68,90	2,2
E6	8	36,8	28,30	13657,6	1520	9,1	2296	198,2	359,05	5,6
E7	7,74	37,9	23,00	48560,3	2000	25	1961	92,5	115,6	6,5
E8	6,6	60,2	28,50	69805,4	1645	50	1232,80	46,6	122,40	6,4
E9	8,1	36,30	24	9610,9	1254	7,7	1681,20	41,2	64,45	3,8
E10	7,9	55,4	31,40	13151,8	1900	7,15	924,60	71,6	183,90	6,6
Normes Marocaines*	6,5-9	-	2,7	500	100		30	-	-	10

\* Valeurs limites générales de rejet dans le milieu naturel

Les valeurs du rapport DCO/DBO5 (3 à 50) montrent ainsi que les lixiviats sont riches en matières organiques non biodégradables ce qui peut causer plusieurs impacts sur les eaux de surface (Oued El Maleh) milieu récepteur de lixiviats [2] ont montré que le rapport DCO/ DBO5 varie entre 5 et 7,5 pour les rejets de lixiviats de Mohammedia (collecteur principal). Ce qui montre que le lixiviat n'est pas facilement biodégradable et peut donc causer plusieurs impacts sur les eaux de surface (Oued El Maleh) et sur la nappe phréatique. Les mêmes auteurs ont montré que les valeurs de la DCO obtenues varient entre 2301 et 2750 mg·L<sup>-1</sup> et restent largement inférieures à la teneur de la DCO de lixiviat détectée [24] déversées en mer. Par ailleurs, le rapport DBO5/DCO qui témoigne du caractère biodégradable de la pollution carbonée, est de l'ordre de 0,5 pour les lixiviats jeunes et décroît jusqu'à 0 pour les lixiviats stabilisés [25]. On en déduit que les lixiviats étudiés sont soit intermédiaires soit stabilisés. En effet, il a été montré que le lixiviat présente des variations considérables aussi bien en flux qu'en composition chimique [26]. Par ailleurs Mizier (1998) [23] a montré que le rapport DCO/DBO5 du lixiviat choisi pour l'étude varie autour de 7 alors que le rapport DCO/DBO5 <0,1 au cours d'une étude réalisée sur le lixiviat d'un centre d'enfouissement technique d'ordure ménagère et industrielle [27]. Ce qui montre que les lixiviats sont riche en matière biodégradable. Selon les mêmes auteurs la nature des déchets stockés influence fortement les caractéristiques physico-chimiques du lixiviat et la biodégradabilité des matières organiques. Ceci montre que le lixiviat pose de sérieux problèmes aux exploitants (dans les pays en voie de développement comme dans les pays développés) de centres d'enfouissements. Il faut retenir un procédé efficace de traitement tout en tenant compte des contraintes économiques.

Par ailleurs, il a montré qu'un vieux lixiviat est riche en substances humiques et fulviques et présente un pH supérieur à 7,5, un DCO < 4000 mg·L<sup>-1</sup> et un DCO/DBO5

>10 [28]. L'auteur conclut ainsi que le lixiviat analysé est peu biodégradable. Ceci montre que le jus de la décharge de la ville de Mohammédia choisis pour l'étude et analysé durant plusieurs campagnes de prélèvements est un lixiviat chargé en matières organiques non biodégradables puisque le rapport DCO/DBO5 varie entre 3 et 50.

En outre, la concentration en NTK reste très importante et varie entre 490 et 2296 mg·L<sup>-1</sup> ce qui peut avoir plusieurs effets néfastes sur la vie aquatique dans l'Oued El Maleh milieu récepteur. Il a été montré que la concentration en NTK détectée au niveau du collecteur principal de la décharge de Mohammédia [2], varie entre 1289 et 1400 mg·L<sup>-1</sup>. Par ailleurs, la teneur en nitrate détectée dans les différents points de prélèvement de la décharge varie entre 41 et 402 mg·L<sup>-1</sup>, montrant, ainsi que les lixiviats peuvent provoquer une pollution considérable des eaux souterraines et des eaux souterraines par les nitrates.

L'étude réalisée par Morier et al. (1998) [29] sur le traitement des rejets des lixiviats dont le débit varie autour de 300 m<sup>3</sup>/jour a montré que la DCO varie autour de 3000 mg/L, la conductivité autour de 25 mS·cm<sup>-1</sup> tandis que la concentration en azote réduite (NTK) est de 3000 mg·L<sup>-1</sup>. Les mêmes auteurs estiment que le volume du lixiviat qui sature les couches profondes de la décharge du centre d'enfouissement technique de Brasseux France varie autour de 300000 m<sup>3</sup>.

En outre, les teneurs des polluants organiques et minéraux des lixiviats issus des centres d'enfouissements techniques de classe I ou classe II sont relativement faibles et ne constituent pas un facteur inhibiteur des microorganismes intervenant dans le traitement biologique de lixiviat [30]. Les mêmes auteurs ont signalé que les caractéristiques physico-chimiques des lixiviats peuvent changer au cours du temps avec l'apparition des métaux et que la composition variait pour un même point de prélèvement au cours du pompage et au cours du temps et variait d'un point de prélèvement à un autre. Par ailleurs, la composition des lixiviats de décharges est fonction de plusieurs paramètres tel que la nature de déchets, les conditions climatiques, l'âge de la décharge, le mode d'exploitation et l'épaisseur de la couche des déchets [24]. Pour évaluer les impacts de lixiviat riches en éléments métalliques, certains éléments (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg) ont été analysés dans le rejet.

Les résultats d'analyse des métaux dans les lixiviats sont illustrés sur le Tableau 3.

D'après ces résultats on observe que les concentrations du chrome, du zinc, du nickel, et du plomb sont au-delà de la norme admissible. La teneur en Pb dans le lixiviat pour les différents points de prélèvements varie d'un point à l'autre. Ceci dépend essentiellement des déchets qui peuvent être homogènes (ordures ménagères) ou hétérogènes (déchets industriels + ordures ménagères) fermentés au cours du temps.

La concentration en Pb atteint 640 µg·L<sup>-1</sup> pour le prélèvement E8 qui est en relation avec les huiles de vidanges rejetées à la décharge. En conséquence, ces polluants vont porter atteinte tant à la santé publique qu'aux ressources hydriques et halieutiques.

Il a été montré que certains éléments métalliques peuvent s'adsorber par le sol [10], et par la suite ils se trouvent mobiliser dans la couche saturée du sol. Ceci permettra d'éviter la pollution de la nappe. Les mêmes auteurs ont signalé que le mécanisme géochimique qui gouverne la migration des métaux est influencé par plusieurs facteurs: le pH, la concentration de l'élément concerné, la perméabilité du sol, la profondeur de la nappe, la forme de l'élément métallique.

**Tableau 3. Concentration des éléments métalliques analysés dans le lixiviat**

Prélèvement	As [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Cd [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Cr [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Cu [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Ni [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Pb [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Zn [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Hg [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]
E1	161	<20	1197	730	128	143	587	<10
E2	161	<20	1229	660	137	200	381	<10
E3	59	<20	735	46	92	20	255	<10
E4	56	<20	725	18	72	81	98	<10
E5	<40	<20	27	<20	<20	234	93	<10
E6	361	<20	1598	335	197	32	357	<10
E7	131	<20	184	237	73	277	408	<10
E8	98	<20	162	73	392	640	510	<10
E9	9	<20	601	12	43	<40	190	<10
E10	358	<20	1295	266	239	182	363	<10
NORMES Marocaines*	100	200	2000	500	500	500	500	50

\* Valeurs limites générales de rejet dans le milieu naturel

La spéciation des métaux dans les rejets de lixiviats réalisé par Baum *et al.*, (2004) [31] a permis de montrer que les polluants métalliques se présentent sous différents degrés d'oxydation et sous différentes formes (complexe labile, complexe non labile, sous formes colloïdales, sous formes solubles). Ces formes influencent considérablement l'infiltration des métaux à travers le sol.

Les résultats pour certains éléments métalliques obtenus durant cette étude ont été comparés à ceux obtenus au niveau d'autres décharges (Tableau 4). La composition métallique des lixiviats de la décharge de Mohammedia est typique d'une décharge qui reçoit un mélange de déchets d'ordures ménagers et industriels (Tableau 4).

**Tableau 4. Comparaison des teneurs moyennes en métaux lourds dans des lixiviats de décharges**

	Décharge d'El Jadida (Maroc) [32]	Décharge de Rabat (Maroc) [33]	Décharge d'Etueffont (France) [34]	Décharge d'Alger (Algérie) [35]	Décharge Mohammadia (Maroc) [2]
Cr [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	156,33	517	270	500	780
Cu [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	157,8	118	270	450	260
Ni [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	133,8	133,6	210	250	150
Cd [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	34	8,38	10	-	<20
Zn [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	747,2	-	740	700	320

En effet, les concentrations des éléments métalliques du percolât étudié sont globalement identiques à celles des lixiviats générés par d'autres décharges d'ordures ménagères, à l'exception de certains éléments tels que le chrome. En outre, la concentration du chrome dans les rejets de lixiviats de la décharge de la ville de Mohammedia varie entre 27 et 1598  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Dans les sols, le chrome existe principalement sous forme de chrome III et un peu de chrome VI [10]. Selon ces auteurs, le chrome VI est largement transformé en chrome III dans les sols et les sédiments, dans les conditions anaérobies et de pH faible ( $\text{pH} < 5$ ). En plus le chrome III

s'absorbe plus facilement sur le sol que le chrome VI [36]. D'après le même auteur le chrome VI est plus hydrosoluble et par ce fait, plus biodisponible et potentiellement toxique. Cela pourrait faciliter la mobilité du chrome dans les sols de la décharge.

### Etude de l'impact de la décharge sur les eaux souterraines

Les eaux souterraines sont soumises, de plus en plus intensivement, aux rejets volontaires d'effluents polluants, eaux usées ou eau de ruissellement pluvial en milieu urbanisé [37-38]. L'analyse de quelques paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans 10 puits proche de la décharge est donnée dans le Tableau 5.

Ces résultats montrent que les conductivités électriques (proportionnelle à la minéralisation) varient entre un minimum de  $1790 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  et  $5990 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  dépassant les normes de potabilité. Les concentrations en nitrate des puits étudiés sont très importantes dépassant largement la valeur admissible par les normes marocaines.

Le nitrate présent dans les eaux de puits peut avoir comme origine soit les rejets de lixiviats ou les engrais utilisés en agriculture.

La matière organique déterminée par l'oxydabilité par  $\text{KMnO}_4$  a montré des valeurs variant entre 2,2 et  $6,4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  dépassant ainsi les normes marocaines de potabilité ( $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

**Tableau 5. Caractérisation physico-chimiques des eaux souterraines**

Puits	Niveau d'eau par rapport au sol	pH	Turb. [NTU]	Cond. [ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ]	TAC [°F]	$\text{NO}_3^-$ [ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	TH [°F]	Oxy [ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	$\text{Cl}^-$ [ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	$\text{PO}_4^{3-}$ [ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Distance approx. puits – décharge
P1	12	7,09	0,61	3600	49,5	111	104	6,4	870	4,4	800 m
P2	8	6,98	0,412	2410	34	8,6	77,6	2,2	290	<0,01	1000 m
P 3	4	7,04	0,093	2640	32,5	360,7	84	2,9	590	<0,01	2000 m
P 4	10	7,42	0,381	1790	27,3	21,85	66	2,9	240	<0,01	1600 m
P 5	12	7,16	0,152	3180	32,5	173,6	84	3,1	600	<0,01	1600 m
P6	8	7,19	0,95	1480	26,8	252,3	52,8	2,5	200	3,2	1000 m
P 7	7	7,66	1,0	5990	46	38,65	34,4	3,8	1670	<0,01	1000 m
P8	5	7,65	0,132	3580	25,5	389	92	2,8	900	<0,01	600 m
P 9	7	7,41	0,305	4790	22	276,5	120	4,2	1270	<0,01	400 m
P10	9	7,5	0,614	3570	27	201,9	80	2,8	840	<0,01	400 m
Normes Marocaines Admissibles		9,2	5	2700	-	50	-	2	750	5	

Le Tableau 6 illustre les résultats d'analyse des métaux.

Trois paramètres influencent la mobilité des métaux lourds (matière organique, texture du sol, pH du milieu). La variation du pH est celle qui modifie facilement le comportement des métaux [39]. Les éléments métalliques ont toujours tendance à s'accumuler dans les horizons de surface riches en matières organiques et dans les couches argileuses [11]. Au niveau des sols proches des décharges les métaux sont adsorbés préférentiellement sur les couches riches en matières organiques et sur les couches argileuses.

**Tableau 6.** Analyse des éléments métalliques des eaux souterraines  
(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg)

Puits	As [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Cd [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Cr [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Cu [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Ni [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Pb [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Zn [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]	Hg [ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ]
P1	<40	<20	<20	<20	134	165	61	<10
P2	<40	<20	<20	<20	<20	61	6	<10
P3	<40	<20	<20	<20	<20	44	205	<10
P4	<40	<20	<20	<20	<20	30	122	<10
P5	<40	<20	<20	70	<20	121	104	<10
P6	<40	<20	<20	<20	<20	<40	196	<10
P7	<40	<20	<20	<20	175	83	84	<10
P8	<40	<20	79	40	59	57	266	<10
P9	<40	<20	<20	<20	134	165	61	<10
P10	<40	<20	<20	<20	<20	61	6	<10
Normes Marocaines Admissibles	50	50	50	1000	50	50	5000	10

En effet, au niveau de la matière organique, la charge des substances humiques est toujours négative ou nulle, d'intensité variable suivant le *pH* du milieu et provient de la dissociation des groupements fonctionnels [11]. Ce sont donc ces groupements fonctionnels carboxyliques (COOH), phénolique et/ou alcooliques (OH), carbonyles (C=O) et amines (NH<sub>2</sub>) qui sont fortement impliqués dans la complexation des cations métalliques ce qui minimise l'infiltration des polluants métalliques vers la nappe.

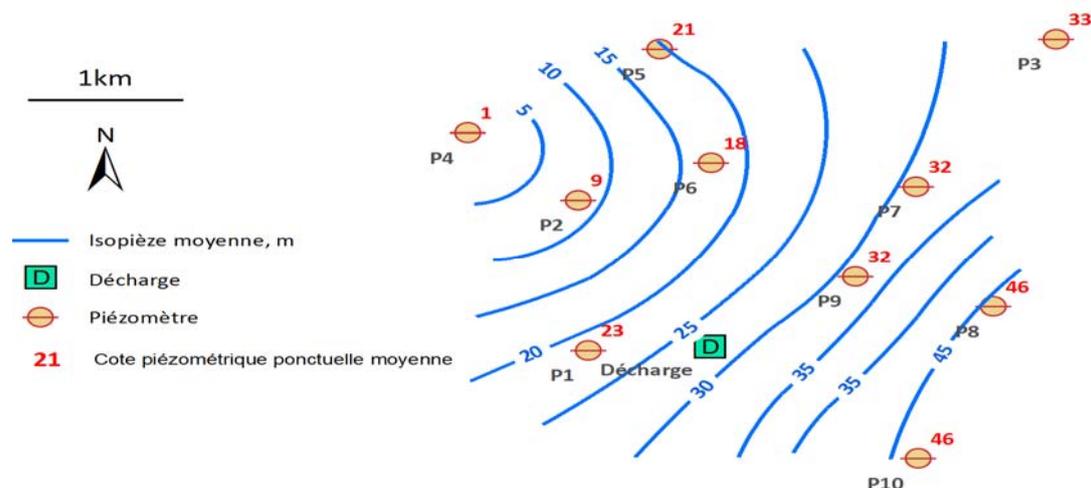
Dans notre étude, les résultats montrent que certains éléments sont fortement adsorbés par le sol alors que d'autres migrent (dans le sol qui présente des fissures) vers les couches profonde ce qui entraîne la pollution de la nappe qui n'est pas profonde (cas de la ville de Mohammedia).

Les concentrations détectées des éléments As, Cd et Cr restent inférieures à la limite de détection de l'ICP (méthode d'analyse utilisée pour les métaux lourds) à part le Cr analyse dans l'eau de puits P8 (79  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) qui reste supérieure à la norme (50  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

Les valeurs des concentrations relevées au niveau de point P8 témoignent d'une contamination importante par le Cr, Ni et Pb respectivement 79, 59 et 57  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  ce qui montre les impacts de lixiviat de décharge sur les eaux souterraines proche de la décharge (600 m). Ces résultats montrent que la pollution des eaux de puits par le Pb peut être liée à :

- La profondeur de la nappe
- Les lixiviats de décharge publiques chargés en Pb
- La pollution industrielle
- La pollution agricole
- Perméabilité du sol de Mohammedia

Il est à remarquer que les puits P1, P5 et P9 sont les puits les plus contaminés par le Pb. Le puits 9 se trouve proche de la décharge publique alors que les puits P1, P5 sont intégrés au niveau d'une zone industrielle. La carte de la surface piézométrique est illustrée sur la Figure 6.



**Figure 6.** Carte de la surface piézométrique

Par ailleurs, d'après ces résultats la nappe phréatique présente des risques graves liés au plomb (P1, P2, P5, P7, P8, P9, P10) et nickel (P1, P7, P8, P9). En effet, les points de prélèvements (P1, P2, P5, P7, P8, P9 et P10) présentent des concentrations en Pb dépassant la norme marocaine admissible dans les eaux de consommation. La valeur minimale de  $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  est enregistrée au niveau du puits P4 alors que la valeur maximale de  $165 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  est enregistrée au niveau du puits P9 (zone de forte influence besoin de sa localisation exacte et celles des autres points). Cependant, l'analyse détaillée des teneurs en Pb montre que les faibles valeurs ont été enregistrées au niveau des stations situées dans la ville basse et les quartiers d'habitation, loin de toute source de pollution, tandis que les concentrations les plus élevées ont été relevées au niveau des stations situées à proximité de la décharge publique. En effet, il a été montré par Pichard *et al.*, (2002) [36] qu'un pH supérieur à 5 et un sol ayant une teneur en matière organique d'au moins 5%, favorisent l'accumulation du plomb dans le sol et minimise l'infiltration tout en évitant la pollution de la nappe. Dans ce cas, le plomb qui existe dans des conditions environnementales, au degré d'oxydation II, s'incorpore lentement dans les minéraux d'argile et la matière organique.

Les teneurs en zinc indiquent des faibles concentrations particulièrement au niveau des puits P3, P4, P5, P6, P7, P8 et P9 avec des valeurs respectives de:  $205 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $122 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $104 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $196 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $84 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $266 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  et  $61 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  alors que la concentration minimale a été détectée au niveau des puits P2 et P10 ( $6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

L'adsorption du Zn dans le sol peut se faire selon deux mécanismes: soit par échanges de cations en milieu acide, soit par chimiosorption sous l'influence de ligands organiques en milieu alcalin [40]. Dans cette étude, le mécanisme qui prévaut serait celui de la chimiosorption puisque les pH varient de 6 à 10. D'après les mêmes auteurs de tels pH permettent une meilleure adsorption du zinc au niveau du sol. Le zinc ne présente pas de danger, les teneurs enregistrées au niveau de toutes les stations restent inférieures à la concentration maximale admissible (CMA) recommandée par l'OMS à savoir ( $5000 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

Tenant compte des faibles concentrations des autres éléments As, Cd et Hg aucune mobilité n'a été observée au niveau de la nappe ce qui indique que ces éléments migrent peu en profondeur.

L'étude de la pollution de la nappe phréatique de la ville de Mohammedia (19 points) par les métaux lourds réalisée [7] a montré que deux stations témoignent d'une présence importante en Hg dans les eaux souterraines proches. Les concentrations détectées varient autour de  $3,41 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0,25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  pour le premier puits et  $5,26 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0,20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  pour le deuxième puits, dépassent de 3 à 5 fois la valeur maximale admissible préconisée par l'OMS pour les eaux de boisson. Dans notre étude les concentrations en Hg restent inférieures à la limite de détection de l'ICP ( $\text{Hg} < 10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

Ainsi, l'ensemble des résultats d'analyse des éléments métalliques effectués au niveau des 10 puits, montre une contamination métallique moyenne à forte de certains éléments au niveau des sites situés dans la zone proche de la décharge, contrairement aux sites de prélèvements localisés dans la zone d'habitation.

## CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont mis en évidence la pollution générée par le lixiviat et les nuisances que représente ce rejet notamment pour les eaux souterraines. Les résultats ainsi obtenus marquent une forte teneur en DCO variant entre 5058,4 et 69805,4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  dont la matière polluante est difficilement décantable et non biodégradable puisque le rapport DBO5/DCO est de 3 à 50.

La concentration en NTK varie entre 490 et 2296  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  tandis que la concentration en nitrate est très importante.

La présence des éléments métalliques détectée dans les eaux des lixiviats montre que les ordures ménagères sont mélangées avec les rejets industriels à caractères minéraux.

L'analyse des paramètres physico-chimiques dans les puits proche de la décharge montre une forte pollution par les nitrates puisque les concentrations pour les 10 puits variant entre 8,6 et 389  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  dépassent largement la norme de potabilité (50  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

Les teneurs en éléments métalliques détectées ont montré que la nappe proche de la décharge est polluée par le Nickel (59 et 175  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) et le Plomb (30 et 165  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Ceci pourra causer de nombreux problèmes pour la santé publique sachant que certains puits sont utilisés comme source d'alimentation en eau potable.

## RÉFÉRENCES

1. Chofqi, A., Younsi, E., Lhadi, K., Mania, J., Mudry, J., Veron, A.: Environmental impact of an urban landfill on a coastal aquifer (El Jadida, Morocco), *Journal of African Earth Sciences*, **2004**, 39 (3-5), 509-516;
2. Souabi, S., Tawzare, K., Digua, K., Chtioui, H., Khalil, F.: Problématiques du chrome et du plomb dans les décharges publiques: cas de la ville de Mohammedia et de Fès, *Déchets Sciences et Techniques Revue Francophone d'Ecologie Industrielle*, **2010**, 58, 37-43;
3. Souabi, S., Tawzare, K., Digua, K., Chtioui, H., Khalil, F., Tahiri, M.: Triage et valorisation des déchets solides à la décharge publique de la ville de Mohammedia, *Les technologies de Laboratoire*, **2011**, 6 (25), 121-130;

4. Singh, U.K., Kumar, M., Chauhan, R.J.P.K., Ramanathan, A.L., Subramanian, V.: Assessment of the impact of landfill on groundwater quality: a case study of the Pirana site in western India, *Environmental Monitoring and Assessment*, **2008**, 141 (1-3), 309-321;
5. Ying, L.A., Jinhui, L.A., Shusheng, C.B., Weihua, D.: Establishing indices for groundwater contamination risk assessment in the vicinity of hazardous waste landfills in China, *Journal of Environmental Pollution*, **2012**, 165, 77-90;
6. Zume, J.T., Tarhule, A., Christenson, S.: Subsurface imaging of an abandoned solid waste landfill site in Norman, Oklahoma, *Ground Water Monitoring and Remediation*, **2006**, 26 (2), 62- 69;
7. Serghini, A.: Diagnose du complexe zones humides de Mohammedia: étude qualitative et quantitative des composantes physique (eau – sédiment) et biologique de l'écosystème, Thèse de Doctorat d'Etat Es-Sciences, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, **2003**, N°2155, 178 p;
8. Fekri, A., Wahbi, M., Ben Bouzian, A., Souabi, S., Marrakchi, M.: Etat de la qualité des eaux souterraines en aval de la décharge de Mediouna (Casablanca Maroc), *The first international symposium on the management of liquid and solid residus (MALISORE)*, Mohammedia, Maroc, **2004**;
9. De Boer, J., Van Der Zandet, T., Pieters, H.: Organic contaminants and trace metals in flounder liver and sediment from the Amsterdam and Rotterdam harbours and off the Dutch coast, *Journal of Environmental Monitoring*, **2001**, 3, 386-393;
10. Kouame, K., Gone, D.L., Savane, I., Kouassi, E.A., Koffi, K., Goula, B.T.A., Diallo, M.: Mobilité relative des métaux lourds issus de la décharge d'Akouédo et risque de contamination de la nappe du Continental Terminal (Abidjan-Côte d'Ivoire), *Revue Internationale des Sciences et Technologie*, **2006**, 2 (1), 39-56;
11. Citeau, L.: Etude des colloïdes naturels présents dans les eaux gravitaires de sols contaminés: relation entre nature des colloïdes et réactivité vis-à-vis des métaux (Zn, Cd, Pb, Cu), Thèse de l'Institut National d'Agronomie Paris-Grignon, **2004**, 236 p;
12. Aluko, O.O., Sridhar, M.K., Application of constructed wetlands to the treatment of leachates from municipal solid waste landfill in Ibadan, Nigeria, *Journal of Environmental Health*, **2005**, 67 (10), 58-62;
13. Wiszniowski, J., Rbert, D., Surmacz-Gorska, J., Miksch, K., Webert, J.V.: Landfill leachate treatment methods: a review, *Environmental Chemistry Letters*, **2006**, 4, 51– 61;
14. Renou, S., Givaudan, J.G., Poulains, S., Dirassouyan, F., Moulin, P., Landfill leachate treatment: review and opportunity, *Journal of Hazardous Materials*, **2008**, 150, 468-493;
15. Mohr, S.M.Z., Mahyun, A.W, Tamizi, M.S., Norsyazwani, C.M.: Landfill Leachate treatment by a Coagulation flocculation process, *International conference on environment and industrial Innovation IPCBEE*, **2012**, V12, Press, Singapore;
16. Gloaquin, A., Diagnostic des déchets ménagers et des déchets professionnels de la commune de Mohammedia (Maroc), *Techniques sciences méthodes*, **1997**, 4, 58-67;
17. Ministère de l'Équipement du Maroc, Direction de l'hydraulique, Ressources en eau souterraine, note de synthèse. Rapport définitif. Rabat : Ministère de l'Équipement, **1989**, 166 p;
18. Bahhar, N.: La colline de Mohammedia : étude géomorphologique. Thèse de 3e cycle, Faculté des lettres et des sciences humaines, Rabat (Maroc), **1988**, 125 p;
19. Service de Géologie du MAROC Ressources en eau du Maroc et bassins du Maroc Atlantique, Notes et mémoires du service géologique du Maroc, **1975**, 231, 444 p;
20. Afnor la qualité de l'eau. Recueil, Environnement. Association Française de Normalisation, **1999**, Paris, France
21. Bezak-Mazur, E., Dabek, L., Gawdzik, J.: *Polish Journal of Environmental Studies*, **2001**, 10 (1), 63-66;
22. Boustani, A.: Rapport Gestion des déchets solides Mesbahiat Mohammedia Ministère de l'Environnement, **2008**;
23. Mizier, M.: Les lixiviats de décharge : des effluents difficiles à traiter. L'Eau, L'Industrie, Les nuisances, **1998**, 217, 35-40;
24. Navarro, A., Verson J.: Impact polluant des lixiviats de décharge: les stratégies de traitement, *Journée Internationale de l'Environnement*, **1992**, Poitiers, France;
25. Courant, P., Aimar, D.: Les technologies disponibles en matière de traitement des lixiviats, L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances, **1996**, 192, 46-50;

26. Tatsi, A.A., Zouboulis, A.I.: A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki, Greece), *Advances in Environmental Research*, **2002**, **6**, 207-219;
27. Trebouet, D., Malriat, J., Jaouen, P., Quemeneur, E.: Caractérisation et traitement des jus générés par un centre d'enfouissement technique d'ordures ménagères et industrielles, *Comptes rendus de colloque international sur l'environnement et catalyse, EST Fès, Maroc*, **1995**, 105-109;
28. Millot-Norbert., Les lixiviats de décharge contrôlée: caractérisation analytique, étude des filières de traitement, Thèse de doctorat, INSA, Lyon, **1986**;
29. Moriere, F., Bauchot, M., Avert, L.: L'osmose inverse met en synergie le traitement des lixiviats et l'usine, *L'Eau, L'Industrie, Les nuisances*, **1998**, **217**, 41-43;
30. Lauret, J.M., Salam, PH.: Recherche sur le traitement biologique des lixiviats de centre d'enfouissement technique, *Journée Internationale de l'Environnement*, Université de Poitiers, France, **1988**;
31. Baum, D.L., Christensen, T.H., *Speciation of heavy metals in landfill leachate: a review*, *Waste Management & Research*, **2004**, **22**, 3-23;
32. Chofqi, A.: Mise en évidence des mécanismes de contamination des eaux souterraines par les lixiviats d'une décharge incontrôlée (El Jadida Maroc): Géologie, Hydrogéologie, Géo-électrique, Géochimie et Epidémiologie, Univ-Chouaib Doukkai, Fac. des Sci. El Jadida, **2004**;
33. Amhoud, S.: Apports de la géologie et de l'hydrogéologie à l'étude de l'impact de la décharge d'oued Akrech sur les ressources en eau, Ph.D. Thèse, 3ème cycle, Univ. Mohamed V. Rabat. Maroc, **1997**, 204 p;
34. Kattabi, H.: Intérêts de l'étude des paramètres hydrogéologiques et hydrobiologiques pour la compréhension du fonctionnement de la station de traitement des lixiviats de la décharge d'ordures ménagères d'Eteffont (Belfort, France), Doc. Univ, Univ. Sci. Tech. Env. Franche Comté. Besançon. France, **2002**, 171 p;
35. Kerbachi, R., Belkacemi, M.: Caractérisation et évolution des lixiviats de la décharge de Oued Smar à Alger.T.S.M- L'eau, **1994**, **11**, 615-618;
36. Pichard, A., Bisson, M., Diderich, R., Houeix, N., Hulot, C., Lacroix, G.: Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques: Chrome et ses dérivés inorganiques, *INERIS-DRC-01-25590 – ETSC – APi/SD*, N°00df253, **2002**, 68p;
37. Pitt, R., Clark, S., Field, R.: Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices, *Urban Water*, **1999**, **1** (3), 217-236;
38. Bower, H.: Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering, *Hydrogeology Journal*, **2002**, **10**, 121-142;
39. Martinelli, I.: Infiltration des eaux de ruissellement pluvial et transfert de polluants associés dans le sol urbain–Vers une approche globale et pluridisciplinaire, Thèse de Doctorat, spécialité Conception en bâtiment et techniques urbaines, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, **1999**, 207 p;
40. Pichard, A., Bisson, M., Diderich, R., Houeix, N., Hulot, C., Lacroix, G.: Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques: Zinc et ses dérivés, *INERIS-DRC-01-25590 – ETSC–APi/SD*, N°00 df259, **2003**, 62 p.