

Evolution des déchets solides sous climat méditerranéen semi-aride : Cas du Centre d'Enfouissement Technique (CET) de la ville d'Essaouira - Maroc

[Evolution of solid waste in a semi-arid Mediterranean climate : Case of the Technical Landfill Centre (CET) of Essaouira city - Morocco]

Abdelouahab ZALAGHI¹, Fatima LAMCHOURI¹, Hamid TOUFIK¹, and Mohammed MERZOUKI²

¹Laboratoire Matériaux, Substances Naturelles, Environnement et Modélisation (LMSNEM), Faculté Polydisciplinaire de Taza, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc

²Laboratoire de Biotechnologie, Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This work focuses on the use of the integrated management system and its main descriptors for monitoring the evolution of household and similar waste from landfills, essentially: water content, temperature and impact of water on waste evolution. These descriptors, which reflect the good design and management of TECs, are measured *in situ* during filling or after closing the traps, in two stages: excavation of a volume of waste obtained by cubing an excavation and then weighing the removed waste on the weighbridge. The search is carried out in old traps of different ages (operated between 1996 and 2008) and at different depths. The water content of the buried waste is measured directly by drying a sub-sample at a temperature of 96°C until the mass is constant (after 72 hours of drying).

The results obtained show that the municipal solid waste buried at the Essaouira CET is evolving in a coherent and predictable way. The temperature of landfilled waste varies between 32 and 45°C depending on the depth of landfill, and the water content of landfilled waste increases with depth. During the dry season, it increases from 30% (1m) to 71% (2m), while during the rainy season, the variation in water content according to depth is more marked (57% to 1m and 81% to 3m) for one-year-old waste. The field capacity of waste after drying in the oven (313%) is higher than that of fines, cardboard and paper, but it is less important (53%) if the waste is dried in the oven.

In relation to the initial objective, the results obtained make it possible to develop an appropriate evolution model for household and similar waste and thus to optimize the design and management of landfills taking into account the interaction between water and waste. Indeed, these descriptors ensure continuous monitoring and detect any potential failures of the CET and therefore ensure its sustainability.

KEYWORDS: Essaouira-Morocco, Landfill, Solid waste, Evolution, Descriptors, Semi-arid Mediterranean Climate.

RÉSUMÉ: Ce travail porte sur l'utilisation du système de management intégré et ses principaux descripteurs pour le suivi de l'évolution des déchets ménagers et assimilés des Centres d'Enfouissement Technique (CET), essentiellement : la teneur en eau, la température et l'impact de l'eau sur l'évolution des déchets. Ces descripteurs, témoins de la bonne conception et gestion des CET, sont mesurés *in situ* au cours du remplissage ou après fermeture des casiers, et ce en deux étapes : l'excavation d'un volume de déchets obtenu par le cubage d'une fouille et ensuite la pesée au pont bascule des déchets enlevés. La fouille est effectuée dans les anciens casiers de différents âges (exploités entre 1996 et 2008) et à des profondeurs différentes. La teneur en eau des déchets enfouis est mesurée directement par séchage d'un sous-échantillon à une température de 96°C jusqu'à ce que la masse soit constante (après 72h de séchage).

Les résultats obtenus, montrent que les déchets solides municipaux enfouis au CET d'Essaouira évoluent de manière cohérente et prévisible. La température des déchets enfouis varie entre 32 et 45°C en fonction de la profondeur d'enfouissement, et la teneur en eau des déchets enfouis augmente avec la profondeur. Pendant la saison sèche, elle passe de 30% (1m) à 71% (2m),

alors que lors de la saison des pluies, la variation de la teneur en eau suivant la profondeur est plus nette (57% à 1m et 81% à 3m) pour les déchets âgés d'un an. La capacité au champ des déchets fermentescibles sur sec (313%) est supérieure à celle des fines, cartons et papiers, par contre, il est moins important (53%) si les déchets sont à l'état brut.

Par rapport à l'objectif initial, les résultats obtenus permettent d'élaborer un modèle de l'évolution appropriée pour les déchets ménagers et assimilés et donc d'optimiser la conception et la gestion des sites d'enfouissement en tenant compte de l'interaction eau / déchets. En effet, ces descripteurs garantissent une surveillance permanente et détectent toutes défaillances potentielles du CET et assurent par conséquent sa durabilité.

MOTS-CLEFS: Essaouira-Maroc, Décharge contrôlée, Déchets solides, Evolution, Descripteurs, Climat Méditerranéen Semi-aride.

1 INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies, gérer des déchets municipaux, minimiser les risques sanitaires engendrés par les déchets solides, maîtriser les sous-produits de ces déchets (Lixiviat, Biogaz, Envoles, Odeurs...), respecter les contraintes environnementales, garantir les performances des installations de stockage et de traitement, restreindre les impacts des lixiviats sur les milieux naturels [1], [2], [3], [4], [5], sont devenus des défis auxquels sont confrontées les villes, avec une tendance de consommation plus grande et plus diversifiée de la société [6], [7].

La multiplication des décharges non contrôlées dans les pays en développement (PED), qui contribue de façon négative à la pollution et à la dégradation des eaux souterraines par des lixiviats et à la pollution de l'air par les fumées issues de l'incinération spontanée des déchets solides. Ces fumées contiennent souvent d'importantes teneurs en polluants toxiques de différentes natures [8], [9], [10], inhalés sous formes particulaire et gazeuse, peuvent causer des affections respiratoires comme l'asthme, mais aussi engendrer des réactions cutanées et des cancers [11], [12], [13].

A ce jour, le Maroc n'est pas parvenu à atteindre son objectif de convertir toutes ses décharges sauvages urbaines en décharges contrôlées ou centre d'enfouissement technique (CET) conformément aux normes environnementales. Les statistiques du ministère chargé de l'environnement, compte au Maroc plus de 300 décharges sauvages non contrôlées [14], [15]. Pourtant, seulement 35% des déchets générés au total sont déposés dans des CET, bien que ce chiffre ait augmenté, il était de 10% en 2008 [16].

Face à cet enjeu majeur, l'enfouissement des déchets ménagers et assimilés municipaux reste la méthode la plus privilégiée et la moins onéreuse dans les PED. Toutefois, la gestion de ces CET, ne réussit pas toujours à respecter la conformité aux réglementations et législations en vigueur [17], [18], [19], à cause de très nombreuses difficultés rencontrées, technique, économique, méthodologique et organisationnelles [20], [21], [22], [23]. Le suivi de l'évolution et du comportement des déchets solides mis en enfouissement technique s'avère donc essentiel afin d'atténuer les nuisances portées à l'environnement : pollution des sols et des eaux souterraines.

En effet, ce type de traitement des déchets pose plusieurs problèmes au niveau des CET marocains du fait de l'insuffisance du contrôle, des aménagements fonctionnels inadaptés ou inexistantes et des difficultés d'encadrement. Ces CET constituent des menaces sérieuses pour l'environnement et la santé publique. Selon le programme Re-Sources, la gestion des décharges dans les PED pose d'énormes difficultés [24].

Dans ce cadre, s'inscrit le CET de la ville d'Essaouira, l'un des trois CET qui sont suivis et analysés dans le cadre d'un programme international de l'ADEME (Agence Française de l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie), en vue de proposer une méthode globale de traitement des déchets en décharge dans les pays en voie de développement [25].

Cependant, ces projets s'intéressent peu aux problèmes de dysfonctionnement des décharges contrôlées et n'incluent pas suffisamment de budgets d'analyses et d'expérimentation qui permettraient de mieux connaître le comportement des gisements des déchets solides, au cours et après fermetures des zones d'enfouissements techniques. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude dont l'objectif est de déterminer le comportement et l'évolution des gisements de ces CET en se basant sur des descripteurs du Système de Management Intégré ; Qualité-Sécurité-Environnement (SMI-QSE), permettant le suivi de ces sites d'enfouissement technique. Les descripteurs utilisés dans cette étude sont : la teneur en eau, la température et l'impact de l'eau sur l'évolution des déchets.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le suivi de l'évolution du gisement des déchets enfouis en CET d'Essaouira, étalé sur deux ans, repose sur l'utilisation des descripteurs du SMI-QSE, outil technique développé au cours de nos travaux ultérieurs [26], [27], [28], détaillés dans le tableau

1, ci-dessous. Ils sont classés soit comme « descripteur d'enquête » soit comme « descripteur de suivi » (mesuré *in situ*), soit enfin comme « descripteur évalué par calcul ». Le matériel et méthodes préconisés dépendent du descripteur étudié. Chaque fiche technique identifie un descripteur, avec des considérations scientifiques et la présentation de l'intérêt qu'il représente. Les méthodes expérimentales, trouvées dans la littérature sont ensuite répertoriées et nous présentons à chaque fois les adaptations qui ont été faites pour rendre les mesures possibles sur notre site d'étude.

Tableau 1. Noms, catégories et types de descripteurs du modèle du SMI-QSE [28]

Catégorie	N°	Descripteurs	Types de descripteurs	Fréquence de mesure par an
Conditions extérieures	1	Contexte général du stockage des déchets	Enquête	Une fois
	2	Environnement humain et réglementaire	Enquête	Une fois
	3	Milieu souterrain	Enquête	Une fois
	4	Milieu naturel et hydrographie	Enquête	Une fois
Exploitation	5	Aménagements fonctionnels et suivi d'exploitation	Enquête	Une fois
	6	Coûts d'exploitation	Calcul	Une fois
Entrants	7	Flux et origine des déchets	Mesure	2 fois
	8	Caractérisation physique des déchets	Mesure	2 campagnes
	9	Densité	Mesure	3 campagnes
	10	Teneur en eau	Mesure	2 fois
	11	Impact de l'eau sur l'évolution des déchets	Mesure	2 fois
	12	Potentiel méthanogène	Mesure	2 fois
	13	Caractérisation chimique de base	Mesure	2 fois
Déchets enfouis	9	Densité	Mesure	2 campagnes
	10	Teneur en eau	Mesure	Plusieurs fois
	14	Température	Mesure	Plusieurs fois
	15	Tassement	Mesure	12 fois
	16	Perméabilité	Mesure	2 fois
Sortants	17	Composition des lixiviats	Mesure	2 fois
	18	Bilan hydrique et production des lixiviats	Mesure	Une fois
	19	Mesure de la production du gaz : flux surfacique	Mesure	Une fois
	20	Calcul de la production du gaz	Calcul	Une fois
	21	Composition du gaz	Mesure	Une fois

2.1 PRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE D'ENFOUISSEMENT TECHNIQUE (CET) D'ESSAOUIRA

2.1.1 MILIEU SOUTERRAIN

Avant chaque implantation d'un CET, il est important d'effectuer des études géologiques (lithographie et stratigraphie) du site. Cette étude a pour but l'identification des caractéristiques de la barrière passive du site. Pour ce faire, nous avons utilisé les données générales sur la géologie et l'hydrologie régionale disponibles [26], [29].

2.1.2 MILIEU NATUREL ET HYDROGRAPHIE

Afin d'évaluer l'impact du CET d'Essaouira, il est indispensable de caractériser le milieu naturel et le contexte hydrographique, en effectuant des enquêtes de terrain afin de remplir une grille thématique appropriée, essentiellement : (1) la végétation, (2) la pédologie (type de sol, perméabilité, granulométrie), (3) le régime des cours d'eau (débits, vitesses, usages de l'eau) et (4) la présence ou non de zone humide autour du site.

2.2 CARACTÉRISTIQUES DES DÉCHETS ENFOUIS

La caractérisation des ordures ménagères est indispensable pour leur bonne gestion. Elle permet de choisir les techniques et le mode de traitement ou d'élimination : ceci permettrait un gain d'efficacité et une meilleure maîtrise des coûts au niveau local.

La méthode proposée par le modèle du SMI-QSE repose en grande partie sur la méthode MODECOM [30]. L'objectif est de caractériser les déchets du CET d'Essaouira en portant l'attention sur les deux grandes catégories qui provoquent des nuisances majeures :

- Déchets biodégradables (putrescibles, papiers, cartons), générant des émanations de biogaz et des lixiviats très chargés en matière organique ;
- Déchets dangereux, générant des molécules toxiques entraînées par le biogaz et des lixiviats chargés en molécules organiques ou minérales toxiques ou écotoxiques.

Les descripteurs utilisés dans cette étude sont : la température, la teneur en eau et l'impact de l'eau sur l'évolution des déchets enfouis (tableau 1), ces descripteurs sont mesurés directement sur les déchets *in situ*.

2.2.1 TEMPÉRATURE

Pour comprendre l'évolution des déchets, il est important de suivre les valeurs de température aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur du massif de déchets. Pour cette raison, nous avons utilisé le modèle du SMI-QSE que nous avons développé [27], [26] qui consiste en la mesure de la température extérieure et la température des déchets enfouis.

MESURE DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE

La mesure de la température ambiante se fait parallèlement au suivi des descripteurs 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

La mesure de la température lors de chaque fouille a été faite aux différentes profondeurs du massif de déchets et à la surface et ce pour la caractérisation des différents descripteurs : perméabilité, échantillonnage des déchets, balle expérimentale pour évaluer le comportement à l'eau.

Pour la mesure de ce descripteur au CET d'Essaouira, nous avons mesuré les températures des déchets enfouis avec un thermomètre électronique, alors que la température ambiante était mesurée par un thermomètre extérieur au mercure.

2.2.2 TENEUR EN EAU DES DÉCHETS ENFOUIS

Dans les PED, du fait que les bennes de collecte sont rarement fermées, l'humidité des ordures ménagères dépend essentiellement du climat, de la saison et de la composition des déchets [31]. Cette eau participe au bilan hydrique du CET et sa détermination est donc importante.

Dans le cas des déchets, la notion de teneur en eau est plus complexe par rapport au cas du sol, car les éléments du déchet, à commencer par la matière organique, sont constitués d'une proportion importante d'eau.

Nous distinguons donc dans le cas du déchet :

- **L'eau « constitutive »** interne aux éléments constitutifs du déchet, incluse dans la mesure du poids volumique solide est l'un des constituants du déchet ;
- **L'eau de « mouillage »** qui remplit les interstices entre les constituants du déchet. Cette eau de mouillage peut elle-même être divisée en trois sous catégories, à savoir l'eau adsorbée sous forme de fines pellicules à la surface des constituants, l'eau capillaire distribuée dans les micropores (et plus particulièrement aux points de contact entre particules) et enfin l'eau gravitaire distribuée dans les macropores. En régime non saturé, seule cette dernière est libre de circuler au travers du déchet.

A partir des deux types d'eau définis précédemment, nous pouvons définir trois états du matériau déchet, à savoir :

- **Etat sec** (sans eau);
- **Etat solide ou brute** (incluant l'eau constitutive);
- **Etat humide** (incluant à la fois l'eau constitutive et l'eau de mouillage).

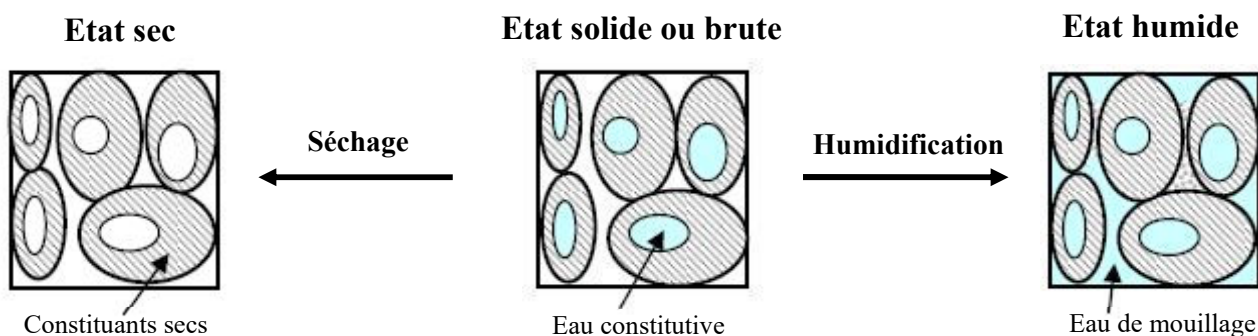


Fig. 1. Description des états solide, sec et humide du déchet

La mesure standard de la teneur en eau appliquée pour les sols est inappropriée pour distinguer la teneur en eau de l'eau constitutive de l'eau de mouillage (lixiviats) dans la mesure où elle entraîne une perte d'eau constitutive. Le modèle du SMI-QSE propose deux méthodes :

- Pour la première, la teneur en eau est évaluée après séchage à 96 °C, jusqu'à poids constant, à l'aide d'une étuve (ceci peut durer une semaine) [30] ;
- La deuxième méthode peut être envisagée dans le cas où l'on ne dispose pas d'étuve : c'est le séchage naturel à l'air libre. Les échantillons sont prélevés et conditionnés dans une bâche perméable ou un filet. Ils sont pesés, suspendus au soleil et ensuite régulièrement pesés à l'aide d'un « crochet peseur » jusqu'à la stabilisation du poids.

Dans le CET d'Essaouira, nous avons testé les deux méthodes de séchage des déchets proposées dans le modèle du SMI-QSE : séchage à l'air libre et séchage à l'étuve. Les mesures de teneur en eau des déchets entrants ont été réalisées en parallèle avec les mesures de densité des déchets entrants et leur caractérisation. Les fractions qui ont subi un séchage à l'étuve et à l'air libre sont : les matières fermentescibles, les fines, les papiers et cartons. Cette méthode nous a permis de comparer le séchage à l'air libre avec le séchage à l'étuve et d'optimiser les temps de séchage.

Dans les deux méthodes, nous avons prélevé les échantillons lors des fouilles à l'aide du godet de la pelle. L'échantillonnage était fait de la manière suivante : prélèvement tous les mètres sans tri et ce sur 4 à 5 mètres de profondeur.

2.2.3 COMPORTEMENT DES DÉCHETS À L'EAU

Le comportement des déchets à l'eau est considéré comme descripteur clé pour la détermination et le calcul du bilan hydrique d'un CET. L'objectif est de comprendre le comportement des déchets vis-à-vis de l'eau apportée par les précipitations dans les conditions normales de stockage, c'est-à-dire leur capacité au champ de rétention et de relargage de l'eau. La capacité au champ est définie comme étant la capacité de rétention maximale en eau du sol, elle correspond plus précisément à la quantité d'eau retenue, après 48 heures d'égouttement de l'eau libre vers la nappe phréatique, par un sol préalablement gorgé d'eau (par des pluies ou un arrosage intensif) [31].

La méthode recommandée par le modèle du SMI-QSE pour la mesure de cette capacité au champ consiste à isoler une balle de déchets sur un sol étanche permettant la collecte des eaux de percolation. Le volume varie entre 0,5 et 1 m³ de déchets qui sont entourés d'une membrane géotextile et sont confinés dans une cage constituée d'une armature et de treillis métalliques permettant la pesée. Le déchet est confiné dans une bâche plastique, le géotextile, des armatures métalliques renforcent la balle pour éviter sa déformation pendant la pesée. Le tout repose sur un sol pentu et étanche permettant la collecte des eaux. Le but est de simuler les conditions de stockage et d'exercer différentes pressions afin que l'on puisse récupérer le maximum de percolât [32].

La difficulté de cette manipulation réside dans la disponibilité du matériel nécessaire. En effet, cette méthode est « lourde » par rapport aux moyens des équipes locales dans les PED. La réalisation de deux balles de différentes épaisseurs, de l'ordre de 1 m³, nécessite un crochet peseur capable de supporter une masse de 500 Kg au minimum : matériel rarement disponible dans les CET des PED.

Notre objectif est de proposer une méthode plus simple et qui ne demande pas beaucoup de moyens et matériel coûteux. Dans le CET d'Essaouira, nous avons fabriqué un dispositif simple. Il s'agit de :

- Un cylindre métallique d'une capacité de 250 litres (hauteur 0,96 m, diamètre 0,57 m, et une section égale à 0,255 m) formé de 2 compartiments séparés par une grille, ouverte sur sa partie supérieure ;
- Un robinet soudé à la partie inférieure du cylindre afin de collecter l'eau reléguée ;
- Un tamis amovible : de 4 mm de maille, soudé à une couronne circulaire, qui permet de retenir les particules fines. Ce tamis a la même section que le tonneau, et repose sur la base du compartiment supérieur perforé. La couronne entourant le tamis permet de limiter les fuites de déchets fins sur les côtés ;
- La partie haute du tonneau est munie d'un couvercle amovible de diamètre inférieur à celui du tonneau (0,5 m). Plusieurs charges sont appliquées sur le couvercle afin de simuler les conditions de stockage.

Le principe consiste à introduire l'échantillon de déchets dans le fût dans lequel nous injectons l'eau jusqu'à immersion complète. Après quelques heures de contact entre l'eau et les déchets, nous avons mesuré la quantité d'eau reléguée naturellement.

La formule retenue pour calculer la capacité de rétention des déchets, par rapport à la masse brute est la suivante [32] :

$$\text{Capacité de rétention} = \frac{[(Q \text{ injectée (Kg)} - Q \text{ restituée (Kg)})] \times 100}{\text{Masse brute des déchets (Kg)}}$$

3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 CONTEXTES D'EXPLOITATION DES SITES DE DÉCHARGE

3.1.1 CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE DU SITE

Le centre de stockage des déchets (CET) de la ville d'Essaouira est situé à environ 12 kilomètres de la ville, en zone forestière (Figure 2). Ce CET dispose d'une part, de quatre anciens casiers totalement exploités et un nouveau grand casier en cours exploitation et d'équipements tels que : pont bascule, local du gardien, local administratif, pistes, clôtures et barrières [27], [33]. D'autre part, le site est conçu pour recevoir l'implantation ultérieure de nouveaux casiers complémentaires afin d'avoir une durée de vie supérieure à celle des casiers à construire ou à mettre à niveau. Ces extensions complémentaires permettent d'envisager une durée de vie du site supérieure à 50 ans. Les équipements concernant les casiers actuels ne doivent pas nuire ou limiter cette implantation future.

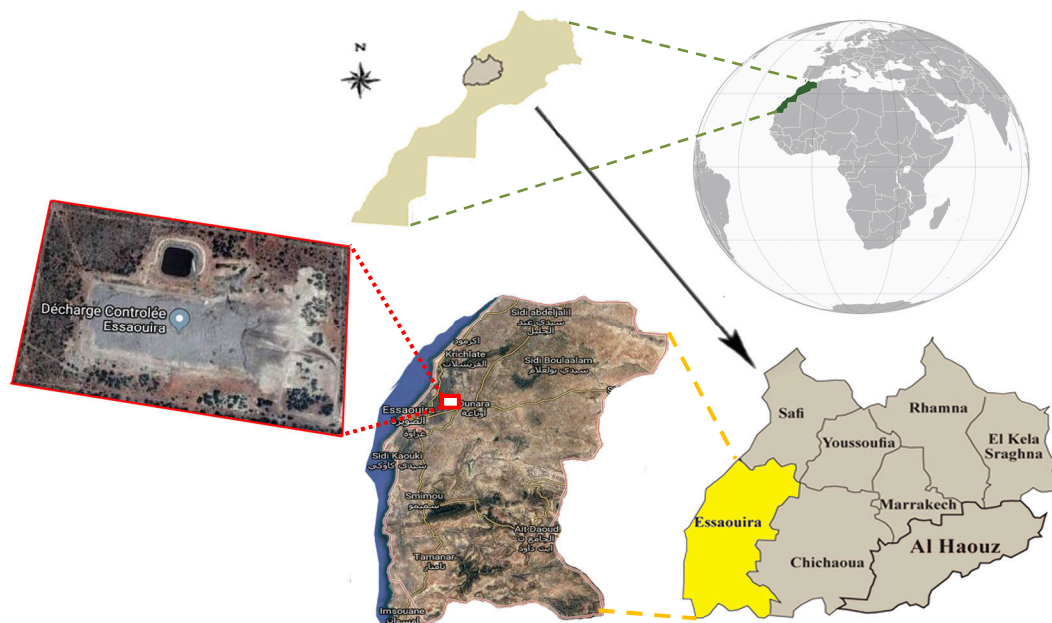


Fig. 2. Situation géographique du CET de la ville d'Essaouira, Maroc

3.1.2 CADRE PHYSIQUE ET ENVIRONNEMENTAL

La province d'Essaouira s'étend sur deux unités : le Bassin de Chichaoua-Essaouira et le Haut Atlas Occidental. Le Bassin d'Essaouira-Chichaoua forme un vaste synclinorium délimité au Nord par la colline de Mouissate et l'oued Tensift, à l'Est par la bordure occidentale du Haouz de Marrakech, au Sud par le Haut Atlas Occidental et à l'Ouest par l'Océan Atlantique. La ville d'Essaouira fait partie de ce grand synclinorium et présente un affleurement de terrains diversifiés [34].

3.1.2.1 GÉOLOGIE

Sur le plan géologique, la zone d'étude présente une grande diversité. A l'Ouest, ce sont les formations récentes de dunes, grès dunaires et calcaires coquilliers qui prédominent. Le centre est dominé par des formations calcaires et marno-calcaires du Cénomanien et du Turonien. Dans les bordures Nord et Sud affleurent les marnes du Crétacé inférieur, les marnes et marno-calcaires du secondaire et tertiaire et enfin, les calcaires du Jurassique et les formations rouges du Permo-trias. Cette panoplie stratigraphique donne aussi une grande variété de formes topographiques où alternent dépressions, plateaux, relief en cuesta et vallées encaissées [34].

Du point de vue hydrogéologique, la province d'Essaouira est caractérisée par l'existence d'une nappe phréatique à caractère discontinu, ainsi que par l'existence d'une nappe profonde. En général, les systèmes aquifères sont liés aux formations plio-quaternaires de la frange côtière et du Crétacé.

Le site du CET est localisé sur des versants de faible pente, généralement de l'ordre de 4 %. Vu ces faibles pentes et la faible sismicité de cette région, le problème de stabilité des talus ne se pose pas. Cependant, le problème de la pollution des eaux souterraines mérite d'être examiné de près, étant donné la grande perméabilité du site du CET d'Essaouira [34].

3.1.2.2 CLIMATOLOGIE

La ville d'Essaouira surnommée "La cité du vent", se caractérise par un climat spécifique tempéré, avec une grande diversité des températures et des précipitations. C'est la ville la plus tempérée du Maroc, la plus fraîche en été. La température moyenne est de 17,3°C avec des écarts faibles [26].

La pluviométrie moyenne est de 280 mm/an. L'hygrométrie est forte durant toute l'année et particulièrement durant les mois les plus chauds. Juillet est le mois le plus humide, alors que décembre est le moins humide.

3.1.2.3 MILIEU NATUREL

La région d'Essaouira comprend deux zones bioclimatiques :

- Zone bioclimatique méditerranéenne-aride ;
- Zone bioclimatique méditerranéenne-semi-aride.

L'existence de ces zones bioclimatiques, engendre l'apparition de deux étages de végétation :

- Etage de végétation méditerranéen-aride ;
- Etage de végétation semi-aride.

Etage de végétation méditerranéen-aride :

Cet étage est le résultat d'un climat à faible pluviométrie (environ 250 mm par an) combiné à des températures élevées et par conséquent, une forte évaporation. Etant donné ces caractéristiques climatiques, la vie végétale dans cet étage n'est pas facile. Cependant, malgré ces conditions, nous remarquons l'apparition d'une forêt claire et un tapis herbacé quasi continu pendant les années de pluviométrie normale. Cet étage est représenté par l'arganier (*Argania spinosa*) et étant donné l'exploitation économique de la forêt d'arganier, celle-ci étant à l'état climax (Etat d'équilibre d'une communauté ou d'un écosystème) [35] qui présente un niveau de dégradation élevé.

🌿 Etage de végétation semi-aride :

La deuxième zone phytoclimatique de superficie importante est constituée par l'étage de végétation semi-aride. Le climat qui caractérise cet étage de végétation est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle > 350 mm et des températures moyennes maximales moins élevées.

Dans la province d'Essaouira, cet étage entoure la zone aride au Nord et au Sud et apparaît également sous forme de tâches au milieu du domaine aride, en occupant les points élevés ainsi que la frange côtière autour d'Essaouira où il est représenté par le thuya de barbarie (*Tetraclium articulata*), en particulier dans une vaste zone au Sud de la ville d'Essaouira.

Bien que la distribution du thuya soit très importante, son espace écologique a été l'objet d'une forte pression anthropique. Cette espèce présente un degré de dégradation élevé là où elle persiste encore, en raison des coupes abusives.

Dans les zones où le climat devient plus aride et continental, le thuya est remplacé par le genévrier rouge (*Juniperus phonicea*). Dans les voisinages d'Essaouira, nous rencontrons une tache de genévrier rouge qui se développe plus librement dans les sols sableux plus favorables aux environs de la ville d'Essaouira.

Le genévrier rouge présente une distribution géographique potentielle plus vaste. Ces forêts ont été détruites sur de grandes étendues pour se procurer du bois pour les toitures des maisons de l'ancienne médina de la ville (toitures encore visibles dans les maisons et ruelles de la médina) [35].

3.1.3 CONDITIONS D'EXPLOITATION

En 2000, le CET d'Essaouira possède quatre grands casiers, d'une superficie de 8 400 m² chacun, construits pour le stockage des déchets et sont équipés d'une géo-membrane en polypropylène de 1mm, de drains pour les lixiviats [36].

En 2006 et dans le cadre des travaux d'extension du CET de la ville d'Essaouira, un nouveau casier de 1 200 m² est construit, son exploitation a débuté en 2009. Ces extensions complémentaires permettent d'envisager une durée de vie du site supérieure à 50 ans [36].

Les lixiviats ont pour origine l'eau contenue dans les déchets et également le lessivage de ces derniers par les eaux de pluie. Le SMI-QSE limite autant que possible les infiltrations excessives d'eau dans les déchets pendant la période d'exploitation, par une réduction des surfaces exploitées et une bonne organisation de l'exploitation et surtout, au terme de l'exploitation d'une alvéole. La couche de recouvrement finale doit permettre une réduction des volumes de lixiviats, facilitant ainsi la gestion post-exploitation et réduisant le risque de pollution. Dès le comblement d'une alvéole, le SMI-QSE procédera à la mise en place rapide de la couverture finale, afin de limiter les infiltrations ainsi que les envols. La couverture doit nécessairement satisfaire sur une période relativement longue à de nombreuses exigences, parmi lesquelles :

- La résistance aux phénomènes d'érosion (eau et vent) et d'abrasion ;
- Le contrôle du ruissellement des eaux pluviales pour éviter l'accumulation d'eau ;
- La stabilisation des surfaces en tolérant des déformations ;
- La non - intrusion d'animaux dans les déchets ;
- L'esthétique du site.

L'ensemble de la couverture sommitale est terrassé avec une pente de 3 à 6% pour permettre le ruissellement de ces eaux propres vers un fossé et un bassin de décantation.

3.2 CARACTÉRISTIQUES DES DÉCHETS ENFOUIS

3.2.1 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. Pour le casier expérimental, la valeur moyenne est de l'ordre de 39 °C. Ces résultats permettraient de faire le lien entre la température et la biodégradation : la température diminue avec l'âge des déchets. Plusieurs études rapportent que les températures assez basses, comprises entre 18°C et 20°C [37], [38], inhibent les processus de fermentation et limitent par la suite le rendement des procédés biologiques de traitement d'où l'importance de la température pour la valorisation de la partie biodégradable des déchets urbains comme compost [39], [40].

En effet, des études [41], [42], ont pu montrer que l'élévation de la température est liée à l'augmentation de la production du méthane. Selon les travaux de Mottet [43], la digestion anaérobie (fermentation) peut se réaliser sous trois gammes de

température, de 15 à 25 °C, une fermentation psychrophile, de 20 à 32°C, une fermentation mésophile et pour des températures variant entre 37 et 45 °C, la fermentation est thermophile. La fermentation pour le cas des déchets du CET d'Essaouira pourrait être donc de type méso/thermophile [44].

3.2.2 TENEUR EN EAU DES DÉCHETS ENFOUIS

L'humidité des ordures ménagères est un paramètre essentiel à déterminer car elle conditionne l'évolution biologique et physico-chimique des produits stockés et intervient dans le bilan hydrique d'un CET. Elle n'est pas toujours facile à déterminer, souvent à cause du manque de matériel (étuve).

Pour déterminer ce descripteur, nous avons essayé les deux méthodes proposées dans le SMI-QSE: les séchages à l'étuve et à l'air libre. Ceci devrait nous permettre de tester l'efficacité du séchage à l'air libre avec pour perspective de proposer cette méthode comme moyen simple, économique, accessible et adapté au contexte local d'une ville comme Essaouira.

Nous avons donc suivi l'évolution de la teneur en eau de l'échantillon global et des principaux constituants jusqu'à une masse constante. Le "séchage à l'étuve" a été effectué à une température de 96 °C pendant 80h et les masses des échantillons varient entre 4 et 8 kg. Le séchage à l'air libre a eu lieu dans le centre de transfert des déchets de la société Garage Maroc France (GMF) et a été conduit sur une période de 160h. Les déchets ont été pesés, sans être compactés, dans un filet très perméable ne gênant pas les échanges avec l'atmosphère, mais retenant les fines (maille=1mm). Les mesures de la masse ont été effectuées à intervalles réguliers. Les masses des déchets initiales étaient de l'ordre de 10 kg. L'humidité a été mesurée sur 3 fractions principales en plus de l'échantillon global, matières organiques, fine, papiers et cartons. Les résultats sont présentés dans la figure 3 ci-dessous.

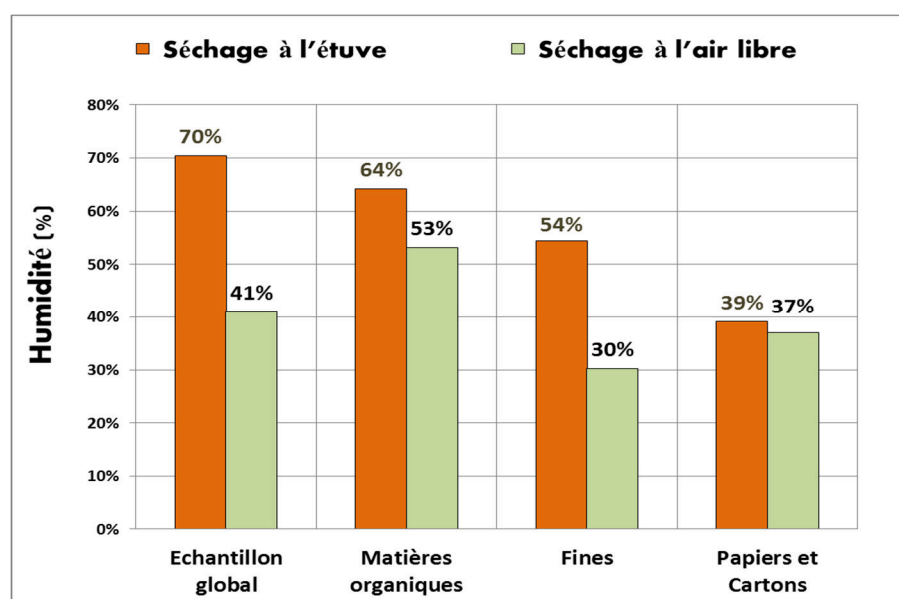


Fig. 3. Comparaison de l'humidité mesurée par séchages à l'étuve et à l'air libre

Après séchage à l'étuve, l'échantillon global montre le pourcentage d'humidité le plus élevé (70%), en comparaison avec les autres principaux constituants dont les pourcentages sont de : matière organique (64%), fines (54%) et papiers et cartons (39%). Toutes ces valeurs restent supérieures à celles obtenues par séchage à l'air libre et qui sont respectivement de 41%, 53%, 30% et 37%. Les fermentescibles et les fines, constitués principalement de matière organique, ont des pourcentages d'humidité voisins. Nous pouvons supposer que l'écart entre les deux méthodes de séchages est dû à la présence d'eau « constitutive » avec des quantités différentielles dans les composantes testées (figure 1), cet écart reste moins important pour la composante matière organique. Tandis que, le pourcentage d'humidité élevé observé pour l'échantillon global avec le séchage à l'étuve peut être expliqué par la présence d'eau de « mouillage » (figure 3). La suspension utilisée dans la deuxième méthode de séchage pourrait expliquer aussi l'écart observé.

Les figures 4 et 5 ci-dessous montrent l'évolution du poids des différents constituants des ordures ménagères ainsi que les pourcentages des taux de réduction de la Teneur en Eau (TE) lors des séchages à l'étuve et à l'air libre.

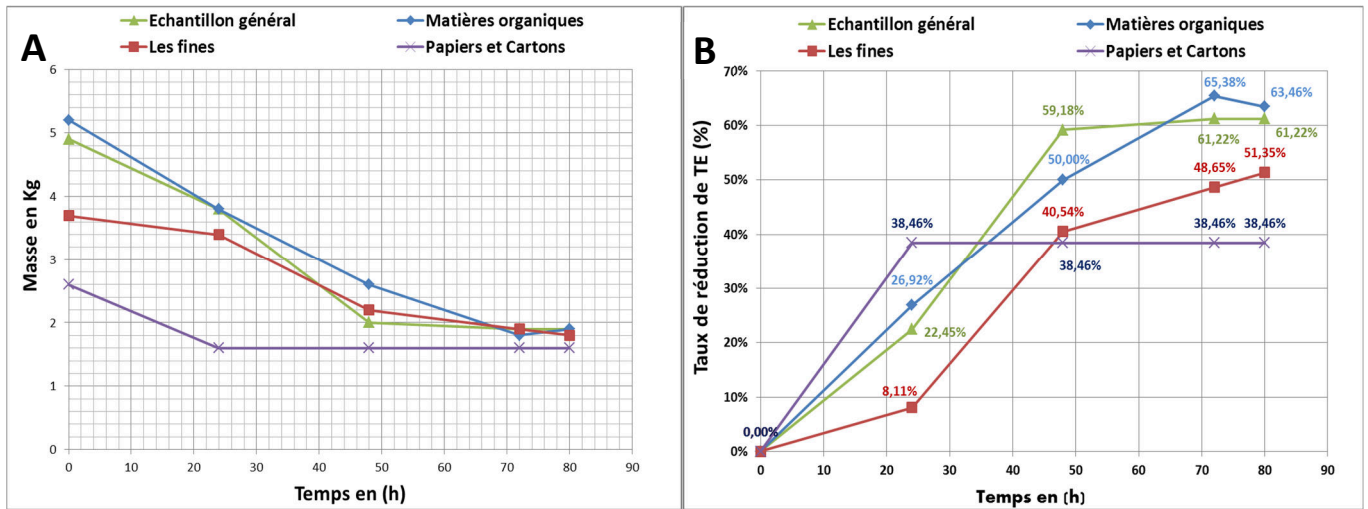


Fig. 4. Evolution des poids des déchets séchés à l'étuve
A : Evolution de la masse en fonction du temps, B : Taux de réduction de la teneur en eau

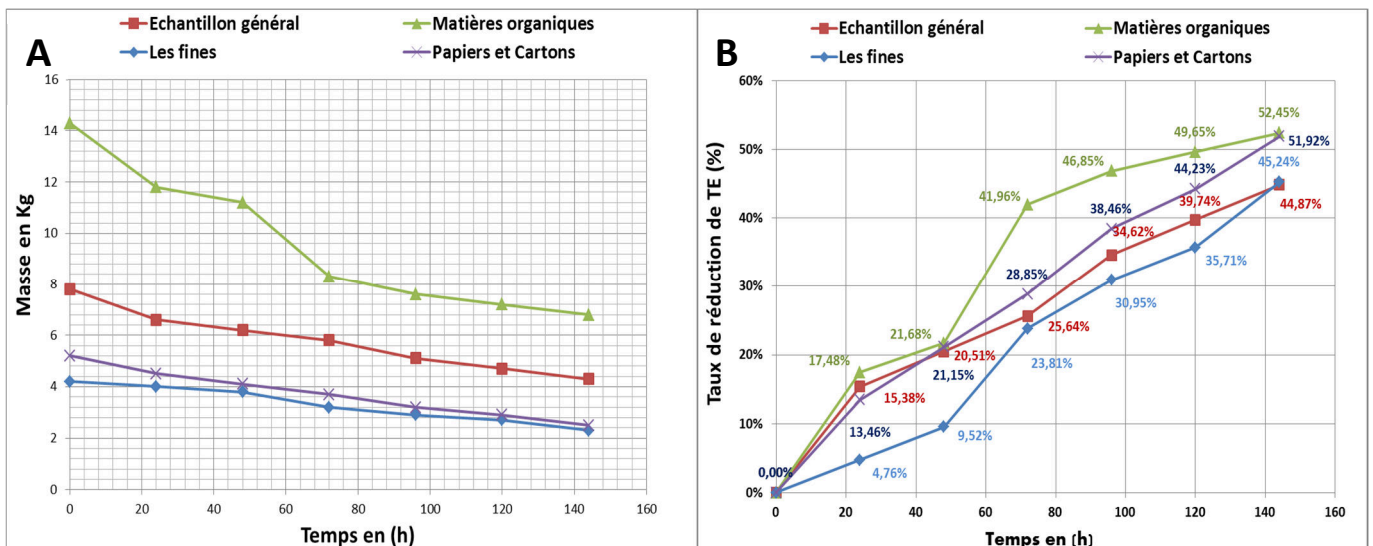


Fig. 5. Evolution des poids des déchets séchés à l'air libre
A : Evolution de la masse en fonction du temps, B : Taux de réduction de la teneur en eau

Les résultats du suivi de la masse des déchets étudiés en séchage à l'air libre (naturel) ou à l'étuve (forcé), montrent que la masse des quatre catégories de déchets (Echantillon général, matières organiques, les fines, papiers et cartons) diminue de façon différente entre les deux méthodes de séchage. En effet, la diminution de la masse est plus rapide pour le cas du séchage forcé en comparaison avec le séchage naturel (figures 4A et 5A). La masse se stabilise après les 72 heures en séchage à l'étuve (figure 4A), alors que pour le séchage à l'air libre, la masse continue à diminuer de façon moins importante après les 92 heures (figure 5A). Cette diminution de masse est corrélée négativement avec le taux de relargage ou de libération des eaux interstitielles (figures 4A/4B et 5A/5B).

Ces résultats peuvent être expliqués par une contribution importante de l'humidité des déchets dans le bilan hydrique du site d'enfouissement du CET d'Essaouira. La teneur en eau (Eau de « mouillage » figure 3) semble constituer, plus que la température, le facteur clé qui conditionne et influence la biodégradation des déchets enfouis. En effet, l'eau a un multiple rôle : elle est à la fois un réactant (hydrolyse), un vecteur de colonisation bactérienne et de diffusion des enzymes, des nutriments et des métabolites extracellulaires [45]. De nombreux auteurs ont montré que pour des teneurs en eau comprises entre 25 et 35 % (rapportée à la masse du déchet humide), les populations microbiennes ne peuvent se développer correctement. Cette teneur en eau minimale traduit la mobilité nécessaire des bactéries, dont la diffusion est assurée essentiellement par l'eau capillaire et l'eau adsorbée (sous forme de fines pellicules entourant les particules solides). Nous pouvons donc conclure que pour le cas du CET d'Essaouira, les teneurs en eaux enregistrées sont favorables pour la

biodégradabilité, et que la méthode de séchage à l'air libre peut donner certains renseignements intéressants pour la gestion des effluents, dont la quantité des lixiviats produite, l'intensité des processus de biodégradation et donc la production du biogaz. Ces informations sont primordiales pour la bonne manipulation des déchets, surtout pour leur valorisation par compostage [40], mais qu'elle ne peut être préconisée comme méthode de détermination de l'humidité standard [46], [47].

Le taux de rétention d'eau en cas de séchage à l'air libre représente la quantité maximale d'eau capillaire (et adsorbée) que le milieu est capable de retenir à l'équilibre. Elle correspond donc à la teneur en eau totale au-dessus de laquelle l'eau est drainée sous l'influence de la gravité. Tandis que l'écart entre les taux de rétentions d'eau après séchage à l'étuve et à l'air libre (figure 4B et 5B) témoigne sur la qualité des modes de gestion des zones d'enfouissement. Pour le mode de compactage et tassement de ces déchets, la qualité et le rendement des modes de gestion augmentent lorsque l'écart entre les deux méthodes de séchage est petit.

Il est difficile d'avancer une teneur en eau optimale car celle-ci dépend de la composition du déchet. En cas du CET Essaouira, la proportion importante de papier, dont les capacités d'absorption sont élevées, augmenterait sensiblement la teneur en eau optimum [33]. Toutefois, il semblerait que les teneurs en eau ou capacité de rétention (après séchage à l'étuve -figure 4B-) sont proches de la capacité au champ sur brut (Etat brute), avec une concordance entre la variation de l'humidité et la variation de la capacité au champ (figure 6), cela qui nous permet de conclure que l'activité microbienne et par la suite la biodégradabilité du gisement de déchets enfouis dans ce CET seraient satisfaisantes.

3.2.3 IMPACT DE L'EAU SUR L'ÉVOLUTION DES DÉCHETS

Après avoir déterminé l'humidité des ordures ménagères de la ville d'Essaouira, et pour avoir plus d'informations relatives à l'impact de l'eau sur les déchets et sur le mode de gestion, nous avons procédé à l'étude de l'évolution des déchets à l'eau. Nous avons appliqué la même méthode que celle citée dans le SMI adopté, car elle est pratique. Durant cette expérience, nous avons suivi l'évolution de la cinétique de relargage des eaux dans les fûts. Nous n'avons pas pu appliquer de charges sur les fûts à cause de leur fragilité. Ceux-ci ne peuvent pas supporter une charge supérieure à 6 kPa. Les engins de tassement et de compactage appliquent des charges 12 fois supérieures.

Nous avons effectué ce test à la fois sur des déchets en mélange (déchets banals) et sur les différentes classes des déchets, afin d'avoir des données aussi complètes que possible sur ce paramètre. La figure 6, présente les résultats des tests effectués.

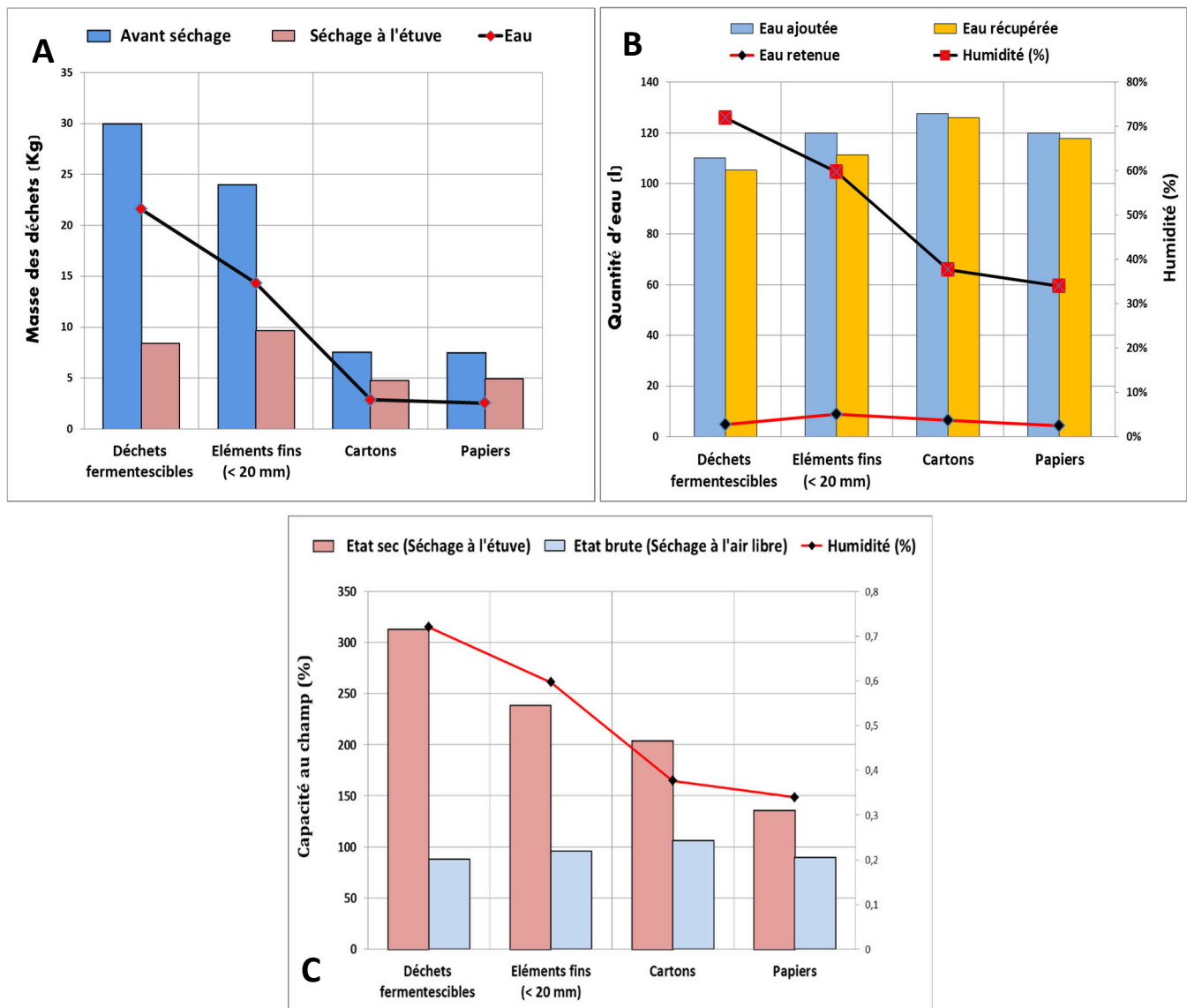


Fig. 6. Impact de l'eau sur l'évolution des différentes classes de déchets enfouis dans le CET d'Essaouira. A : Masse des déchets, B : Quantité d'eau retenue, C : Capacité au champ.

Les facteurs environnementaux influençant la biodégradabilité sont nombreux et présentent des interactions complexes (entre eux et avec les modes de gestion) comme nous l'avons illustré sur les figures 4 et 5. La teneur en eau est reconnue comme l'un des plus importants. Bien que l'analyse de son influence indépendamment d'autres facteurs soit délicate, il a été possible d'évaluer son impact dans des conditions spécifiques. Comme cela a été démontré par différents travaux et confirmé dans cette étude, la teneur en eau a des conséquences sur la biodégradation car, au-delà d'un certain seuil d'humidité, la matière n'est pas accessible aux micro-organismes. Afin de vérifier l'existence d'une corrélation au CET d'Essaouira entre la teneur en eau représentée par les descripteurs, du modèle spécifique (SMI-QSE) intégrant ces aspects, suivis dans cette étude et l'influence de cette teneur en eau sur l'évolution des déchets, nous avons déterminé la quantité d'eau retenue par les échantillons frais (avant séchage) (figure 6B) et nous avons comparé l'évolution de la masse et de la capacité au champ entre des déchets de différentes catégories, avant et après séchage forcé (à l'étuve) (figures 6A et 6C).

La capacité de rétention est souvent remplacée par la capacité au champ, calculée suite à un essai de ressuyage par le bas (vidange non forcée), l'équilibre étant ou non atteint [48]. Cette dernière représente donc une valeur approchée de la capacité de rétention par excès d'eau provenant d'un écoulement gravitaire lent. Dans le cas du CET d'Essaouira, la capacité au champ mesurée sur les déchets à l'état sec (séchés à l'étuve), enregistre les valeurs les plus élevées pour les déchets fermentescibles (>300%), supérieures à celles des fines, cartons et papiers. Par contre, ces mesures effectuées sur les déchets fermentescibles bruts (séchés à l'air libre), la capacité au champ a une valeur moins importante (53%) (Figure 6C). Nous expliquons ce phénomène par le fait que le séchage à l'étuve de l'échantillon modifie la structure des cellules végétales de façon quasi

irréversible, l'eau interstitielle (**eau « constitutive »**) ne peut pas reprendre sa place dans les constituants secs (figure 1) même après un long contact avec l'eau. Cela nous permet de conclure, que le compactage excessif des déchets enfouis dans des climats secs pourra entraver la biodégradabilité du gisement du déchet et par suite sa stabilisation à long terme.

Cependant, dans les conditions d'enfouissement au niveau du CET d'Essaouira, l'eau influence la biodégradation davantage par les transferts de matière que produisent ses mouvements au sein d'un massif de déchets. Ces transferts vont augmenter la biodégradation, en humidifiant des zones sèches, puisque le gisement de déchets est dominé par la fraction organique [33] et par la fraction fermentescible, qui présente une grande teneur en eau interstitielle ou capillaire (figure 6A). Cette constatation est confirmée par le taux le plus élevé d'humidité enregistré sur la figure 6B. Les déchets fermentescibles sont donc, les plus appropriés pour toute bio-valorisation [49], surtout pour la production du biogaz puisque les taux de production sont directement proportionnels aux teneurs en eau lorsque celles-ci sont comprises entre 20 % et la saturation [47], [50]. En dessous de 20 % d'humidité, il n'y a pas suffisamment d'eau pour que les bactéries produisant du biogaz soient actives. Par contre, les déchets fins sont les plus adaptés pour la valorisation dans les domaines agricoles, comme fertilisants ou sols de fixation pour les cultures hors-sol, puisqu'ils libèrent plus d'eau que les déchets fermentescibles (figure 6B).

Au-delà d'un seuil minimal, la production de biogaz augmente avec la teneur en eau jusqu'à atteindre un second seuil proche du degré de saturation au-delà duquel l'ajout d'eau semble pouvoir inhiber la dégradation par lessivage des déchets et un déséquilibre des bactéries méthanogènes au profit des bactéries acidogènes comme rapportés par Lanini [51] et Aran [52].

L'influence de la teneur en eau sur l'évolution des déchets enfouis dans le CET d'Essaouira est donc globalement similaire à celle rapportée par Pommier et ses collaborateurs [53] en ce qui concerne l'activité microbienne et la biodégradation. Nous remarquons également, que les trois descripteurs étudiés sont influencés par la typologie des échantillons utilisés. De plus, les résultats présentés sur la figure 6B, prouvent que l'humidité, la capacité au champ et la teneur en eau libre des déchets solides ne sont pas obligatoirement corrélées avec les autres descripteurs (perméabilité, tassement et composition des lixiviats) ou liés à la nature des déchets.

Enfin, sans remettre en cause le rôle prépondérant de la teneur en eau, nous pouvons néanmoins se demander dans quelle mesure le degré de saturation du déchet influence sa biodégradabilité, puisque les résultats présentés dans la figures 6, nous permettent de déduire que l'humidité, la masse et la capacité au champ sont étroitement liées et corrélées, compte tenu de la réduction de la perméabilité liée à une diminution de cette saturation.

4 CONCLUSION

Ce travail consacré au suivi de l'exploitation du Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Essaouira nous a permis de déterminer les principaux descripteurs mentionnés dans le SMI-QSE, permettant de comprendre le comportement et l'évolution des déchets enfouis dans les décharges spécialisées en déchets ménagers et assimilés (dite de classe 2) en climat méditerranéen semi-aride, et qui sont : la teneur en eau, la température et l'impact de l'eau sur l'évolution des déchets. Ces descripteurs constituent des éléments clés pour le dimensionnement des décharges qui représentent le principal exutoire des déchets solides municipaux nationaux.

Cette étude nous a permis de mettre en exergue, l'évolution de la teneur en eau des déchets enfouis en fonction de l'âge. La teneur en eau des déchets entrants (70,5%) diminue pendant le stockage (39,1%), ce qui globalement génère une potentialité d'apparition des lixiviats même dans le cas d'un bilan hydrique déficitaire. L'impact de l'eau sur l'évolution des déchets montre que la capacité au champ ne dépend pas seulement des précipitations, mais aussi de la quantité d'eau constitutive des déchets et de leur capacité de rétention. Les résultats obtenus permettent également de prévoir l'évolution à court terme (deux années) des déchets enfouis.

Au terme de ce travail et du fait que la période d'observation de deux ans est courte pour pouvoir tirer des conclusions finales, il serait important pour les prochaines études d'étendre la période de mesure sur au moins cinq années, avec des mesures annuelles pour confirmer cette tendance.

REFERENCES

- [1] P. Giudici, M.T. Guillam and C. Ségala, "Évaluation des risques sanitaires: microbiologiques: actualisation des connaissances", *Environnement, Risques & Santé*, Vol. 5, No. 12, pp. 409-421, 2013.
- [2] C. Xiaoli, H. Yongxia, L. Guixiang, Z. Xin and Z. Youcai , "Spectroscopic studies of the effect of aerobic conditions on the chemical characteristics of humic acid in landfill leachate and its implication for the environment", *Journal of Chemosphere*, vol. 7, No. 91, pp. 1058-1063, 2013.
- [3] H.M. Sohrab, A. Norulaini, V. Balakrishnan, V.R. Puvanesuaran, M.Z.I. Sarker and O. A. Mohd, "Infectious Risk Assessment of Unsafe Handling Practices and Management of Clinical Solid Waste", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 2, No. 10, pp. 556-567, 2013.
- [4] A. Idlahcen, S. Souabi, A. Taleb, K. Zahidi and M. Bouezmarni, "Evaluation de la pollution générée par les lixiviats de la décharge publique de la ville de Mohammedia et son impact sur la qualité des eaux souterraines", *Journal of Scientific Study & Research*, Vol. 1, No. 15, pp. 035 – 050, 2014.
- [5] Y.S.C. Somé, T.D. Soro, and S. Ouedraogo, "Étude de la prévalence des maladies liées à l'eau et influences des facteurs environnementaux dans l'arrondissement de Nomgr-Masson : cas du quartier Tanghin (Ouagadougou-Burkina Faso) ", *Int. J. Biol. Chem. Sci*, Vol. 1, No. 8, pp. 289-303, 2014.
- [6] MATEUH, Etude de la gestion des déchets ménagers et assimilés au Maroc. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement, de l'Urbanisme et de l'Habitat, Secrétariat d'Etat chargée de l'Environnement, Royaume du Maroc, 2004.
- [7] K. Sadiqi, L'initiative nationale pour le développement humain au Maroc : étude et perspectives. Thèse de doctorat, Université Hassan 1er, Maroc / Université d'Artois, France, 2012.
- [8] L. Bantoux, The incineration of waste in Europe: issues and perspectives. A report prepared by the institute for prospective technological studies (IPTS), Seville. European Commission Joint Research Centre, 1999.
- [9] L. Guérin, Devenir des polluants inorganiques contenus dans les résidus issus de la combustion des déchets ménagers. Spéciation et élaboration de tests de mobilité en vue de leur stockage ou de leur valorisation. Thèse de doctorat, Université de Toulon et du Var, France, 2000.
- [10] ORS, L'incinération des déchets en Île-de-France : considérations environnementales et sanitaires. Observatoire Régional de la santé d'Île-de-France (ORS), France, 2005.
- [11] R. Dales and M. Raizenne, "Residential exposure to volatile organic compounds and asthma," *J. Asthma*, No.3, pp. 259-70, 2004.
- [12] L. Elliott, M. P. Longnecker, G. E. Kissling and S.J London, "Volatile organic compounds and pulmonary function in the Third National Health and Nutrition Examination Survey, 1988-1994", *Environ. Health Perspect*, No. 8, pp.1210-4, 2006.
- [13] A. Arif, and S. Shah, "Association between personal exposure to volatile organic compounds and asthma among US adult population", *Int. Arch. Occup. Environ. Health.*, Vol. 8, No. 80, pp. 711-719, 2007.
- [14] Enda Maghreb, Options de gestion des déchets solides municipaux adaptées aux contextes des Pays du Sud. Rapport réalisé dans le cadre du programme d'appui aux initiatives de gouvernance environnementale et territoriale conduit par Enda Tiers Monde et la Direction du Développement et de la Coopération suisse (DDC). 2007.
- [15] A. Zalaghi, M. Merzouki, "Study of the physicochemical parameters of urban waste of the landfill of Bikarane, town of Agadir (Morocco) for a durable rehabilitation", *J. Mater. Environ. Sci*. Vol. 4, No. 6, pp. 905-914, 2013.
- [16] SWEEP-Net, Rapport sur la gestion des déchets solides au MAROC. Le réseau régional d'échange d'informations et d'expertises dans le secteur des déchets solides dans les pays du Maghreb et du Machreq. 2014.
- [17] S. Ferigutti, Approche: Méthodique pour la sélection des technologies de traitement des déchets dangereux pour un centre de transfert. Thèse. Université Laval, Canada, 1998.
- [18] W. Xing , L. Wenjing, Y. Zhao , X. Zhang , W. Deng , H. Thomas and D. Christensen, "Environmental impact assessment of leachate recirculation in landfill of municipal solid waste by comparing with evaporation and discharge". *Journal of Waste Management*. Vol.2, No. 33, pp. 382-389, 2013.
- [19] M. Palmiotto, E. Fattore, V. Paiano , G. Celeste, A. Colombo and E. Davoli, "Influence of a municipal solid waste landfill in the surrounding environment: Toxicological risk and odor nuisance effects", *Journal of Environment International*, No. 68, pp. 16-24, 2014.
- [20] A. LeBlanc, Une comparaison de deux régions : les comtés de Westmorland-Albert au Nouveau-Brunswick et la ville de Guelph, en Ontario, à l'égard de la gestion des déchets solides, Thèse de doctorat, Université de Moncton, Canada, 2001.
- [21] R. Lornage, Comparaison de trois filières de stockage d'ordures ménagères. Thèse de doctorat, Université de Lyon I – Claude Bernard, France, 2006.
- [22] A. Pires, G. Martinhoa and N.B. Chang, "Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques". *Journal of Environmental Management*, No. 92, pp. 1033-1050, 2010.

- [23] A.J. Tinet, Contribution à l'étude des transferts de fluides dans les installations de stockage des déchets non dangereux. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier-Grenoble, France, 2011.
- [24] RE-Sources, 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. 2014.
- [25] Gachet C, Projet de gestion des déchets, Manuel de gestion du site selon la norme ISO 14001, Franc, 2006.
- [26] Zalaghi A., Contribution à l'élaboration et validation d'un système de management intégré et traitement physique et biologique des lixiviats, Thèse de doctorat - Faculté des sciences, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah-Fès - Maroc, 2014.
- [27] A. Zalaghi, M. Merzouki, "La gestion d'un centre d'enfouissement technique de la ville d'Essaouira au Maroc dans le cadre d'un système de management qualité, sécurité et environnement : vers une stratégie de gestion durable", TRIBUNE DE L'EAU, Vol. 4 No. 646, pp.56-64, 2008.
- [28] A. Zalaghi, F. Lamchouri, H. Toufik, M. Merzouki, "Utilisation d'un système de management intégré, Qualité-Sécurité-Environnement, pour la réhabilitation de la décharge publique non contrôlée de la ville de Taza (Maroc)", International Journal of Innovation and Applied Studies, Vol.2, No. 23, pp. 180-191, 2018.
- [29] ONEP, Manuel de gestion du site selon la norme ISO 14001, Projet de gestion des déchets urbains à Essaouira-Maroc, 2006.
- [30] ADEME., MODECOM. Méthodologie de caractérisation des ordures ménagères. Angers (France) : Agence de l'Environnement et de la Maitrise d'Energie, Connaitre pour Agir, Guides et cahiers techniques, 60 p. 1993.
- [31] S.T.S. Yuen, Q.J. Wang, J.R. Styles & T.A. McMahon, "Water balance comparison a dry and a wet landfill a full scale experiment", Journal of Hydrology, No. 251, pp. 29-48. 2001.
- [32] S.F. Menouar. Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie et limitation des impacts environnementaux. Thèse de doctorat. Université de Limoge-France, 2011.
- [33] A. Zalaghi, M. Merzouki, "Caractérisation physico-chimique de lixiviats du centre d'enfouissement technique de la ville d'Essaouira (Maroc)", J. ScienceLib, Vol. 5, No. 131122, pp. 1-14, 2013.
- [34] ONEP, Extension et mise à niveau de la décharge contrôlée actuellement exploitée, Projet de gestion des déchets urbains à Essaouira, n° 15/DAM/M/04, Maroc, 2003.
- [35] Resing, Monographie locale de l'environnement d'Essaouira. Observatoire National de l'Environnement du Maroc (ONEM), Rapport interne, p. 116, 1996.
- [36] ONEP, Gestion intégrée des déchets solides à Essaouira-Maroc, Etude d'avant-projet détaillé, 2003.
- [37] W.C. Grant, "Temperature relationships in the megascolecida arthworm", *Pheretima hupeiensis*. Ecology, Vol.3, No. 36, pp. 412-417, 1955.
- [38] O. Graff, Die Regenwiiliner Deutschlands. Schriftenreihe der Forschungsanstalt f. Landwirtschaft, Braunschweig-Volkenrode, No. 7, p. 81, 1953.
- [39] E. Compaoré, "Compostage et qualité du compost de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso", TROPICULTURA, 2010 Vol. 28, No.4, pp. 232-237, 2010.
- [40] V. Pilnáčeka, P. Innemanová, M. Šereša, K. Michalíková, Š. Stránská, L. Wimmerová, T. Cajthamlan, "Micropollutant biodegradation and the hygienization potential of biodrying as a pretreatment method prior to the application of sewage sludge in agriculture", Ecological Engineering, No.127, pp. 212-219, 2019
- [41] L.E. Marache, "La Méthanisation des Effluents et Déchets Organiques: Etat des Connaissances sur le Devenir Pathogène", Thèse de Doctorat, Université PaulSabatier de Toulouse, France, 2001.
- [42] A. Mottet, "Recherche d'Indicateurs de Biodégradabilité Anaérobie et Modélisation de la Digestion Anaérobie Thermophile: Application aux Boues Secondaires d'Épuration non Traitées et Prétraitées Thermiquement", Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, 2009.
- [43] A. Zalaghi, F. Lamchouri, H. Toufik, M. Merzouki, "Traitement par le procédé SBR (Sequencing Batch Reactor) des lixiviats de la décharge publique non contrôlée de la ville de Taza (Maroc)", International Journal of Innovation and Applied Studies, Vol. 23 No. 3, pp. 299-309, 2018.
- [44] A. Aguilar, "Analyse et modélisation des réactions biologiques aérobies au cours de la phase d'exploitation d'un casier d'un centre d'enfouissement technique", Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2000.
- [45] D. González, J. Colón, D. Gabriel, A. Sánchez, "The effect of the composting time on the gaseous emissions and the compost stability in a full-scale sewage sludge composting plant", Science of the Total Environment, No. 654, pp. 311-323, 2019.
- [46] X.F. Lou, J. Nair, "The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions", Bioresource Technology, No. 100, pp. 3792-3798, 2009.

- [47] F. Vincent, "Contribution à l'étude du fonctionnement d'une décharge – Modélisation du comportement hydrodynamique et biologique d'un déchet-type". Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1991.
- [48] T. H. Christensen, P. Kjeldsen, "Basic biochemical processes in landfills. Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact", Academic Press, San. Diego, CA, pp. 29-49, 1989.
- [49] S. Warwick, P. Durany-Fernandez, D. Sapsford, P. Cleall & M. Harbottle, "Altered chemical evolution in landfill leachate post implementation of biodegradable waste diversion", Waste Management & Research, Vol. 9, No. 369, pp. 857–868, 2018.
- [50] S. Salehpour, M. Jonoobi, M. Ahmadzadeh, V. Siracusa, "Fatemeh Rafieian, Kristiina Oksman, Biodegradation and ecotoxicological impact of cellulose nanocomposites in municipal solid waste composting", International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 111, pp. 264-270, 2018.
- [51] S. Lanini, "Analyse et modélisation des transferts de masse et de chaleur au sein des décharges d'ordures ménagères". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique des Toulouse, 1998.
- [52] C. Aran, "Modélisation des écoulements de fluides et des transferts de chaleur au sein des déchets ménagers. Application à la réinjection de lixiviat dans un centre de stockage". Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2001.
- [53] S. Pommier, D. Chenu, M. Quintard, X. A. Lefebvre, "logistic model for the prediction of the influence of water on the solid waste methanization in landfills". Biotechnology and Bioengineering, Vol. 97, N.3, pp. 473-482, 2007.