



Université Sultan Moulay Slimane
Faculté des Sciences et Techniques
Béni-Mellal



Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques
Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Santé

THÈSE

Présentée par

OUIGMANE Abdellah

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : Ingénierie de l'environnement

Gestion durable et valorisation énergétique des déchets solides (RDF) comme combustible alternatif dans les fours à ciment : étude des aspects techniques, économiques, environnementaux et sociaux. Cas de la province de Khénifra.

Soutenue le 20/03/2021 à 10h00 devant la commission d'examen composée de :

Président :	– Pr. Abdelali BOULLI	FST- Béni Mellal
Examineurs :	– Pr. Aziz OUATMANE	FST- Béni Mellal
	– Pr. Otmane BOUDOUCHE	FST- Béni Mellal
	– Pr. Abderrahim JAOUAD	Faculté des sciences Semlalia Marrakech
Rapporteurs :	– Pr. Abderrahmane EL GHMARI	FST-Béni Mellal
	– Pr. Khalid HABBARI	FST- Béni Mellal
	– Pr. Mohamed BERKANI	FST- Béni Mellal
Directeurs de thèse :	– Pr. Aziz HASIB	FST- Béni Mellal

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Ce travail est dédié :

*Aux êtres les plus chers que j'ai au monde : mes
parents, source d'amour.*

A ma chère femme

*A mes frères Salah Eddine, Abdelaziz et sa petite
famille Fatima, Med Adnane et Saad*

A toute ma famille et à tous mes amis et amies.

A tous les agents de propreté au Maroc.

A tous ceux qui m'ont aidé de près et de loin.

Remerciements

Ce projet de thèse a été réalisé en collaboration entre l'équipe des Procédés Agro-industriels et Environnementaux, et l'équipe de Spéctro-chimométrie et Environnement de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, Université Sultan Moulay Slimane.

*Je remercie avec beaucoup de reconnaissance et de considération les Professeurs **Aziz HASIB** et **Mohamed BERKANI**, mes Directeurs de thèse, pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en m'accueillant au sein de leurs laboratoires pendant ces années de recherche, pour leurs disponibilité, leurs encouragements et leurs conseils très utiles et fructueux, qu'ils n'ont pas hésité à m'accorder.*

*Je remercie également tous les membres de l'équipe des Procédés Agro-industriels et Environnementaux, particulièrement Professeur **Otmane BOUDOUCHE**, qui m'a apporté son expérience et pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail.*

Mes sincères remerciements vont aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir juger ce travail, et d'assister à la soutenance de ma thèse.

*Mes sincères remerciements s'adressent à Mr. **Adil GUELZIM** qui m'a accordé favorablement un stage au sein du laboratoire des combustibles et des déchets à la cimenterie CIMAT Ben Ahmed.*

Mes remerciements vont également à Monsieur le directeur régional de l'ONEE branche eau à Khénifra qui m'accorder un stage au sein de laboratoire de la STEP de Khénifra.

Je remercie également tous les membres de la société ECO ATBIR pour leur aide lors de la campagne de caractérisation et le projet de tri à la source.

Mes plus vifs remerciements vont à mes collègues et mes amis qui m'ont encouragé et soutenu pour mener avec succès ce travail.

Avant-Propos

Nom et prénom de l'auteur : Abdellah OUIGMANE

Intitulé du travail : « Valorisation énergétique des déchets solides (RDF) comme combustible alternatif dans les fours à ciment : étude des aspects techniques, économiques, environnementaux et sociaux. Cas de la province de Khénifra »

Directeurs de thèse :

- **Mohamed BERKANI**, l'équipe Spéctro-chimométrie et Environnement. Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mellal, Maroc.
- **Aziz HASIB**, Equipe des Procédés Agro-industriels et Environnementaux. Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mellal, Maroc.

Laboratoires où les travaux ont été réalisés :

- Laboratoire des procédés Agro-industriels et Environnementaux. Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Technique, Béni-Mellal, Maroc.
- Laboratoire des déchets et combustibles, ciment de l'Atlas CIMAT usine Ben Ahmed.
- Laboratoire de la station d'épuration des eaux usées Khénifra.

Date du commencement des travaux de recherche : Janvier 2015.

Articles scientifiques:

- **Abdellah Ouigmane** et al.(2017). The size effect in the distribution of combustible components in the municipal solid waste produced in the summertime. Case of the city of Beni Mellal- Morocco. *Journal of Materials and Environmental Science* 8(8): 2807-2815.
- **Abdellah Ouigmane** et al. (2018). Management of Municipal Solid Waste in Morocco: The Size Effect in the Distribution of Combustible Components and Evaluation of the Fuel Fractions. *Handbook of Environmental Materials Management*, 1st ed. 2018 edition edited by Chaudhery Mustansar Hussain,; chapter HAZARDOUS WASTE MANAGEMENT: pages pp 1-13; Springer.
- **Abdellah Ouigmane** et al. (2020). Landfill site selection using GIS and multicriteria decision-making. Case study of a region in Morocco. Accepté pour publication dans le journal :*International Journal of Environment and waste management*
- **Abdellah Ouigmane** et al. (2021). Characterization of dry fractions contained in municipal solid waste in developing countries: a case study of a region in Morocco. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01183-x>
- **Abdellah Ouigmane** et al. (2021). The impact of RDF valorization on the leachate quality and on emissions from cement kiln. Case study of a region in Morocco. *Pollution*. 7(2):293-307. DOI: 10.22059/poll.2021.309346.890
- **Abdellah Ouigmane** et al. (2021). Effect of COVID-19 on the generation of different types of waste in the city of Marrakech; Morocco. Accepté pour publication dans le journal “*Journal of health and pollution*” Vol. 11, No. 30 - (210606)
- Aziz Hasib, **Abdellah Ouigmane**, Otmane Boudouch, Rida El Kacmi, Mustapha Bouzaid. Mohamed Berkani (2020) Sustainable Solid Waste Management in Morocco: Co-Incineration of RDF as an Alternative Fuel in Cement Kilns. Chapter in book, Solid Waste Management, ISBN 978-1-83962-560-2.

- M. Aadraoui, M. Elbaghdadi, J. Rais, A. Barakat, W. Ennaji, L.A. Karroum, H. Oumenskou, **A. Ouigmane**, M. Mechadi, S. Didi, “Characteristics of sewage sludge produced from wastewater treatment plant in the Moroccan city Khouribga” ,*Desalination and Water Treatment*, Vol. 112, pp. 179-185, 2018.
- M. Aadraoui, J. Rais, M. Elbaghdadi, **A. Ouigmane**, M. Mechadi, “Characterization of sludge waste products from wastewater treatment plant of Khenifra city in Morocco”, *Environmental Research & Technology*, Vol. 2 (2), pp. XXXX, 2019
- O. Ouhsine, **A. Ouigmane**, El. Layati, B. Aba, R.J. Isaifan, M. Berkani. Impact of COVID-19 on the qualitative and quantitative aspect of household solid waste. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 6(SI): 41-52, Autumn 2020
- Elhoucein Layati, **Abdellah Ouigmane**, Marcelo de Carvalho Alves, Bagyaraj Murugesan ,Mohamed El Ghachi. Spread Mapping of Covid-19 in Morocco Using Geospatial Approach. *J. Geographical Studies*, 4(1), 35-43, 2020.
- Elhoucein Layati, **Abdellah Ouigmane**, Omar Ouhsine, Abdelaziz Moujane, Marcelo de Carvalho Alves, Bagyaraj Murugesan, Anirudh V. Mutalik, Mohamed El Ghachi. Modeling of Coronavirus Spread in Morocco using Statistical Approach: SIR Model. *Journal of Environmental Treatment Techniques* 2021, Volume 9, Issue 3, Pages: 594-600
- Olusola JA, Shote AA, Isaifan RJ, **Ouigmane A.** 2021. The impact of COVID-19 pandemic on nitrogen dioxide levels in Nigeria. *PeerJ* 9:e11387 <https://doi.org/10.7717/peerj.11387>

Articles soumis :

- **Abdellah Ouigmane** et al. (2020). Energetic valorization of municipal solid waste in Morocco: Financial feasibility of RDF production. Soumis au Journal *Environnemental sciences and pollution research*
- **Abdellah Ouigmane** et al. (2020) Separation at source of waste: a key step for the production of alternative fuels from household waste in Morocco. Soumis au journal *International Journal of Sustainable Society*

Communications :

- **A.Ouigmane** et al. Economic and environmental benefits of using RDF from household waste in cement kilns, case study in a province in Morocco. 1ère Journée scientifique sur « Environnement et Climat ». Béni Mellal, Maroc 14-Juin-2019
- **A.Ouigmane** et al. Towards an energy recovery approach for household waste in the province of Khenifra – Morocco. *5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management*. **21-24 June 2017**. Athens- Grèce.
- **A.Ouigmane** et al. Composition des déchets ménagers et assimilés générés par la ville de Béni Mellal. *Première conférence Méditerranéenne sur la méthanisation, le biogaz et la valorisation énergétique des déchets*. **1-2 Juin 2016**. Béni Mellal
- **A.Ouigmane** et al. Potentiel en fractions combustibles dans les ordures ménagères au Maroc : Cas des villes de Béni Mellal et Temara. *Première conférence Méditerranéenne sur la méthanisation, le biogaz et la valorisation énergétique des déchets*. **1-2 Juin 2016**. Béni Mellal
- **A.Ouigmane** et al. Combustibles solides de récupérations contenus dans les déchets ménagers- cas de la ville de Béni Mellal. *2èmes journées des procédés pour l'énergie et l'environnement*. **24-25 Octobre 20**

Résumé

Au Maroc, les municipalités et les centres communaux rencontrent plusieurs problèmes liés à l'élimination finale des déchets ménagers et assimilés. La valorisation énergétique est considérée comme une solution durable permettant la réduction des impacts liés à la mise en décharge. Cette recherche a porté sur l'étude des aspects techniques, sociaux, environnementaux et économiques de la production de RDF à partir des fractions sèches incinérables contenues dans les ordures ménagères.

Premièrement, une étude a été menée sur le comportement des citoyens avec les ordures ménagères en réalisant des enquêtes des citoyens (générateurs des déchets) et des services communaux (responsables de l'élimination des déchets). Puis, un projet pilote de tri à la source en deux fractions (sèche et humide) a été fait. Les résultats ont montré qu'il y a un vide et notamment en matière de formation des agents communaux avec l'absence d'une communication entre les municipalités et les citoyens. Les résultats de l'efficacité de séparation du projet pilote de tri ont atteint un pourcentage de 96% pendant deux mois de suivi.

Ensuite, une étude des caractéristiques des fractions sèches incinérables a été réalisée. En premier lieu, une étude de distribution des déchets secs en fonction de la taille granulométrique a été menée en tenant en compte le type de la zone (urbaine et rurale) et la période saisonnière (hivernale et estivale). Puis, six combinaisons de RDF ont été formées dont une représente le RDF de la zone d'étude et les pourcentages massiques des fractions sèches des autres combinaisons ont été modifiés. Les résultats ont montré que les fractions sèches constituent 29% des déchets produits dans la zone d'étude avec une quantité élevée en textiles et en déchets hygiéniques. Ainsi, l'étude a montré que les saisons et le type de zone pourraient avoir un impact sur la distribution de certaines fractions combustibles comme le papier, les textiles, les déchets hygiéniques et le bois. Les analyses des RDF issus des déchets secs ont montré des résultats encourageants avec une valeur du pouvoir calorifique de l'ordre de 18 MJ kg^{-1} , la composition élémentaire (C : 44,32% ; O : 43,75% ; H : 4,27% ; N : 1,11% ; S : 0,07%), la teneur en cendre (6,48%), la teneur en chlore (0,21%) et les métaux lourds (Pb : 229,55ppm, Cd : 0,63 ppm, As : 2,72 ppm).

Finalement, une étude environnementale et économique a été réalisée afin d'évaluer les avantages de la production de RDF. Les résultats du test de lixiviation ont montré que le lixiviat généré par un déchet dépourvu des fractions sèches pourrait être biodégradable avec des taux faibles de salinité. Ainsi, la substitution de coke de pétrole par 15% de RDF afin de produire 1million de tonne de clinker par ans, pourrait réduire 29523 teqCO_2 par ans émis par une cimenterie. Concernant l'étude financière, le délégataire de la décharge pourrait produire un RDF de bonne qualité et le vendre aux cimenteries avec des prix compétitifs aux combustibles fossiles.

Mots clés : Valorisation énergétique, Maroc, déchets ménagers, RDF, cimenterie.

Abstract

Municipalities in Morocco face several problems related to the management of household waste, particularly in the final disposal phase. Energy recovery is considered as a sustainable solution to reduce the impacts of landfilling. The present research focused on the study of technical, social, environmental and economic aspects of the production of dry fractions contained in municipal solid waste generated in the communes of the province of Khenifra.

First, a study was made on the behavior of citizens with household waste by conducting surveys of citizens (waste generators) and communal services (responsible for waste disposal). Afterwards, a pilot project of source separation in two fractions (dry and wet) was carried out. The results showed that there is a gap, especially in terms of training of municipal staff and the lack of communication between municipalities and citizens. The results of the separation efficiency of the sorting pilot project reached a percentage of 96% during two months of follow-up.

A study of the characteristics of dry fractions was conducted. First, a study of the distribution of dry waste according to particle size was carried out, taking into account the type of area (urban and rural) and the seasonal period (winter and summer). Then, six combinations of RDF were formed, one of which represents the RDF of the study area and the mass percentages of the dry fractions of the other combinations were changed. The results showed that the dry fractions constitute 29% of the waste generated in the study area with a high amount of textiles and hygienic waste. Thus, the seasons and the type of area have an impact on the distribution of certain dry fractions such as paper, textiles, sanitary waste and wood. The analyses of RDF from dry waste showed encouraging results with a calorific value of about 18 MJ kg⁻¹, elemental composition (C: 44.32%; O: 43.75%; H: 4.27%; N: 1.11%; S: 0.07), ash content (6.48%), chlorine content (0.21%) and heavy metals (Pb: 229.55ppm, Cd: 0.63 ppm, As: 2.72 ppm).

Finally, an environmental and economic study was conducted to evaluate the benefits of RDF production. The results of the leaching test showed that the leachate generated by a waste without the incinerable fractions is biodegradable with low salinity levels. Thus, for a cement plant that uses 15% of RDF to produce 1 million tons of clinker per year, it could reduce 29523 teqCO₂ per year. Concerning the economic study, with efficient waste separation, the landfill operator could produce an RDF with high quality and sell it to cement plants at prices competitive with fossil fuels.

Keywords: Energy recovery, Morocco, household waste, RDF, cement plant

ملخص

تواجه الجماعات الترابية في المغرب العديد من المشاكل المتعلقة أساسا بتدبير النفايات المنزلية و المشابهة لها. يعتبر التثمين الطاقى حلا مستداما لتدبير هذا القطاع حيث يحد من الآثار السلبية للنفايات على الأوساط الطبيعية. و يدخل هذا البحث في إطار الدراسة التقنية، البيئية، الاجتماعية و الاقتصادية للتثمين الطاقى للنفايات و ذلك بإنتاج وقود بديل للوقود الأحفوري انطلاقا من الاجزاء الجافة القابلة للاحتراق في النفايات المنزلية.

في المرحلة الاولى تمت دراسة سلوك المواطنين و تعاملهم مع تدبير النفايات الصلبة من خلال إجراء مقابلات و توزيع استمارات على المواطنين (منتجي النفايات) و الجماعات (المسؤولة عن معالجة النفايات). بعد ذلك، تم تنفيذ مشروع تجريبي لفرز النفايات من المصدر إلى جزئيين (الجاف و الرطب). و أظهرت النتائج فراغا كبيرا على مستوى تكوين المسؤولين عن تدبير النفايات في الجماعات الترابية و كذلك قلة التواصل بين المواطنين و الجماعات. كما بلغت نتائج مردودية الفرز نسبة 95% خلال شهرين من المتابعة.

في المرحلة الثانية ثم إجراء دراسة لخصائص الأجزاء الجافة القابلة للاحتراق؛ في الأول تمت دراسة توزيع الأجزاء الجافة بدلالة القد الحبيبي للنفايات مع الأخذ بعين الاعتبار المناطق الحضرية و الشبه الحضرية و كذلك الفترة الموسمية (خلال فصلي الشتاء و الصيف). بعد ذلك تم تشكيل ست عينات من RDF، أحدها يمثل RDF المنطقة المدروسة و تم تغيير النسب المئوية للأجزاء الأخرى. أظهرت النتائج أن الأجزاء الجافة من النفايات تشكل 29% من النفايات المنزلية مع كميات هامة من الاثواب والمخلفات الصحية. كما بينت الدراسة أن الفصول و نوع المنطقة يمكن أن يكون لها تأثير على توزيع بعض الأجزاء كالورق والمخلفات الصحية والخشب. أظهرت تحاليل RDF نتائج جيدة حيث وصلت القيمة الحرارية ل RDF المنطقة المدروسة 18MJ/kg ؛
التركيب الكيميائي؛ N : 1,11% ; H :4,27% ; O :43,75% ; C :44,32%
S:0,07%؛نسبة الرماد(6,48%)؛ الكلور (0,21%) و المعادن الثقيلة؛ Pb : 229,55ppm ; Cd : 0,63ppm ; As : 2,72 ppm

في الأخير تم إجراء دراسة بيئية و اقتصادية لتقييم فوائد إنتاج RDF. أظهرت نتائج الاختبار أن العصاراة الناتجة عن النفايات بدون الأجزاء الجافة يمكن أن تتحلل بيولوجيا مع مستويات منخفضة من الملوحة. بالإضافة إلى ذلك، فإن إضافة 15 % من الوقود البديل إلى الوقود الأحفوري يمكن أن يقلص حجم انبعاثات CO₂ في معامل الاسمنت. فيما يخص الدراسة المالية؛ يمكن للشركة المفوض لها تدبير المطرح إنتاج RDF نو جودة عالية و بأسعار منافسة للوقود الأحفوري.

الكلمات المفتاح: التثمين الطاقى؛ المغرب؛ النفايات المنزلية؛ الوقود البديل؛ معامل الاسمنت.

Liste des abréviations

AMC	Analyse multicritère
BRF	Besoin en fonds de roulement
CAF	Capacité d'autofinancement
CDD	Combustibles dérivés des déchets
CE	Conductivité électrique
CEV	Centre d'enfouissement et de valorisation
CF	Cash-flow
CSR	Combustible solide de récupération
DBO5	Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours
DCO	Demande chimique en oxygène
DEEE	Déchets d'équipements électriques et électroniques
DMA	Déchets ménagers et assimilés
DMP	Déchets médicaux et pharmaceutiques
DT	Déchets totaux
GES	Gaz à effet de serre
IP	Indice de profitabilité
ONG	Organisation non gouvernementale
PC	Pet coke
PCDD	Polychlorodibenzo-p-dioxines
PCDF	Polychlorodibenzofuranes
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PD	Pays développés
PED	Pays en voie de développement
PIB	Produit intérieur brut
PNDM	Plan national des déchets ménagers
HT	Hors taxe
RDF	Refuse derived fuel
SIG	Système d'information géographique
SNDD	Stratégie nationale de développement durable
STEP	Station d'épuration des eaux usées
TL	Test de lixiviation
TMB	Traitement mécano-biologique
UE	Union européen
VAN	Valeur actuelle nette
ZE	Zone d'étude

Sommaire

Remerciements.....	iii
Avant-Propos	iv
Résumé	vi
ملخص.....	viii
Liste des abréviations	ix
Répertoire des figures	xviii
Répertoire des tableaux	xxi
INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
CHAPITRE I: GENERALITES SUR LA GESTION DES DECHETSMENAGERS DANS LES PED	5
I Généralités sur la gestion des déchets dans quelques régions dans le monde	5
I.1 Gestion des déchets en Europe	5
I.2 Gestion des déchets en Asie.....	6
I.3 Gestion des déchets en Amérique Latin.....	6
II Chaîne de gestion des déchets dans les PED et les modes de traitement	7
II.1 Génération des déchets dans les PED	7
II.1.1 Aspect quantitatif	7
II.1.2 Aspect qualitatif des déchets ménagers	9
II.1.2.1 Composition physique des déchets.....	9
II.1.2.2 Caractérisation physico-chimique et chimique des déchets.....	11
II.1.2.2.1 Humidité	11
II.1.2.2.2 Densité.....	11
II.1.2.2.3 Pouvoir calorifique inférieure (PCI)	12
II.1.2.2.4 Paramètres chimiques globaux	12
II.2 Tri des déchets.....	13
II.3 Pré-collecte des déchets ménagers.....	13
II.4 Collecte des déchets.....	14
II.5 Elimination des déchets ménagers.....	14
II.5.1 Mise en décharge	15
II.5.1.1 Décharges sauvages	15
II.5.1.2 Décharges contrôlées	15
II.6 Valorisation matière des déchets.....	16
II.6.1 Compostage des déchets.....	17

II.6.2	Recyclage des déchets.....	17
II.7	Valorisation énergétique des déchets.....	17
II.7.1	Incinération	17
II.7.2	Pyrolyse	18
II.7.3	Gazéification.....	19
II.7.4	Méthanisation	19
III	Gestion des déchets au Maroc.....	20
III.1	Cadre législatif de la gestion des déchets au Maroc.....	20
III.2	Aperçu sur la gestion des déchets au Maroc.....	21
III.2.1	Production des déchets ménagers au Maroc.....	21
III.2.2	Composition des déchets ménagers au Maroc	21
III.2.3	Collecte des déchets au Maroc	22
III.2.4	Elimination des déchets au Maroc	22
III.3	Coût de dégradation de l'environnement lié la gestion des déchets au Maroc	23
III.3.1	Coût de dégradation de l'environnement.....	23
III.3.1	Coût de dégradation lié à la gestion des déchets.....	24
CHAPITRE II: LES FRACTIONS INCINERABLES DANS LES DMA (RDF/CSR)		25
I	Généralités sur le RDF	25
I.1	Différence entre RDF et CSR.....	26
I.2	Sources de RDF/CSR	26
I.3	Production de RDF.....	26
I.4	Management de la qualité RDF / CSR	27
I.4.1	Importance du management de la qualité des RDF/CSR.....	27
I.4.2	Normes et assurances de qualité de RDF/CSR	28
I.4.3	Classification et spécification des CSR par le CEN	28
I.4.4	Normes de qualité des produits de CSR pour des utilisations finales	29
II	CARACTERISATION DES RDF/CSR.....	30
II.1	Paramètres de caractérisation de RDF/CSR.....	30
II.1.1	Pouvoir calorifique	30
II.1.1.1	Définition.....	30
II.1.1.2	Méthode de détermination du PCI des déchets	30
II.1.1.2.1	Méthodes expérimentales	30
II.1.1.2.2	Modèles empiriques.....	31
II.1.2	Humidité	32

II.1.3	Taux du cendre	32
II.1.4	Métaux lourds	32
II.1.5	Composition élémentaire	32
II.1.6	Récapitulatif.....	33
II.2	Caractérisation des RDF dans divers pays	33
II.2.1	Présentation des études.....	33
II.2.2	Paramètres caractérisant un RDF	35
II.2.3	Comparaison des caractéristiques des divers RDF	35
II.2.3.1	Pouvoir calorifique inférieur et humidité.....	35
II.2.3.2	Taux du cendre et matière volatile.....	36
II.2.3.3	Métaux lourds	37
II.2.3.4	Composition élémentaire en C, H, N, O, S et Cl.....	37
II.2.4	Discussion des résultats.....	38
II.2.4.1	PCI et humidité	38
II.2.4.2	Taux des cendres	39
II.2.4.3	Métaux lourds	39
II.2.4.4	Composition élémentaire	39
II.2.5	Classification selon la CEN 15359	40
III	Utilisation des RDF/CSR dans le secteur cimentier	41
III.1	Généralités sur le secteur cimentier	41
III.1.1	Historique	41
III.1.2	Composition minéralogique et fabrication du ciment	41
III.1.3	Production et consommation du ciment.....	42
III.2	Consommation énergétique dans le secteur cimentier	42
III.3	Secteur cimentier au Maroc	44
III.3.1	Données sur le secteur cimentier au Maroc	44
III.3.2	Secteur cimentier et le développement durable	45
III.4	Valorisation des déchets dans le secteur cimentier.....	45
III.4.1	Généralités	45
III.4.2	Faisabilité technique de l'utilisation de RDF/CSR en cimenteries.....	47
III.4.2.1	Problèmes liés au procédé	47
III.4.2.2	Effet sur la qualité du clinker.....	48
III.4.3	Faisabilité environnementale de l'utilisation des RDF/CSR.....	48
III.4.3.1	Emission du CO ₂	48

III.4.3.2	Dioxines et Furane.....	48
III.4.3.3	Oxyde d'azote NOx et le dioxyde de soufre SO ₂	49
III.4.3.4	Métaux lourds	50
III.4.4	Faisabilité économique de l'utilisation des RDF.....	50
III.5	Le RDF dans les pays développés	51
III.5.1	Politique de gestion des déchets en Europe	51
III.5.2	Marché de RDF en Europe.....	51
III.5.2.1	Production en Europe.....	51
III.5.2.2	Utilisation des RDF en Europe	52
PARTIE 2 : LA GESTION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES DANS LA PROVINCE DE KHENIFRA ..		53
CHAPITRE 1 : MONOGRAPHIE DE LA PROVINCE DE KHENIFRA		54
I	Situation géographique et cadre administratif de la zone d'étude.....	54
I.1	Situation géographique	54
I.2	Cadre administratif.....	54
I.3	Cadre physique et ressources naturelles.....	57
I.3.1	Géologie de la zone d'étude.....	57
I.3.2	Topographie de la zone d'étude.....	57
I.3.3	Ressources en eaux	58
I.3.3.1	Eaux superficielles	58
I.3.3.2	Eaux souterraines	59
I.3.3.3	Lacs et sources dans la province de Khénifra.....	59
I.3.4	Cadre climatologique.....	60
I.3.4.1	Pluviométrie	60
I.3.4.2	Température.....	60
I.3.4.3	Vent	60
I.3.5	Forêts.....	61
I.4	Cadre socio-économique de la zone d'étude	61
I.4.1	Aspect démographique dans la zone d'étude	61
I.4.2	Réseau routier	63
I.4.3	Eau potable et assainissement liquide	63
I.4.3.1	Eau potable.....	63
I.4.3.2	Assainissement	64
I.4.4	Electrification.....	64
I.4.5	Secteur agricole	64

I.4.6	Secteur industriel.....	64
I.4.7	Secteur commercial.....	65
I.4.8	Secteur touristique.....	65
CHAPITRE 2 : ETAT DES LIEUX DE LA GESTION DES DECHETS DANS LA ZONE D'ETUDE		66
I	Collecte des déchets dans la zone d'étude	66
I.1	Gestion dans les zones urbaines	66
I.1.1	Collecte des déchets dans la ville de Khénifra.....	66
I.1.2	Collecte des déchets dans la ville de M'irt.....	68
I.2	Collecte des DMA dans les centres ruraux	69
I.3	Synthèse sur le service de la collecte des déchets dans la zone d'étude.....	71
II	Mode d'élimination des déchets dans la zone d'étude.....	72
PARTIE 3 : COMPORTEMENTS DE LA POPULATION VIS A VIS LA GESTION DES DECHETS DANS LA ZONE D'ETUDE.....		75
CHAPITRE 1 : ENQUETES ET QUESTIONNAIRES.....		76
I	Matériels et méthodes	76
I.1	Enquête de la population	76
I.1.1	Echantillon enquêté.....	76
I.1.2	Choix des questionnes.....	76
I.1.3	Totalité des questions posées dans l'enquête	78
I.2	Enquêtes des communes.....	79
I.2.1	Communes enquêtées.....	79
I.2.2	Principales questions.....	80
I.2.3	Autres questions.....	80
II	Résultats et discussion	81
II.1	Résultats de l'enquête de la population.....	81
II.2	Résultats de l'enquête des communes.....	86
II.3	Interprétation des résultats des enquêtes.....	88
II.3.1	Enquête de la population	88
II.3.2	Enquête des communes	89
II.3.3	Récapitulatif.....	91
CHAPITRE 2 : PROJET PILOTE DE TRI A LA SOURCE DES ORDURES MENAGERES		93
I	Matériels et méthodes	93
I.1	Description.....	93
I.2	Echantillon	93

I.3	Méthodologie	93
II	Résultats et discussion	95
II.1	Efficacité de séparation	95
II.2	Résultats de l'enquête après le tri.....	96
PARTIE IV : ETUDE DES CARACTERISTIQUES QUANTITATIVES ET QUALITATIVES DES FRACTIONS		
COMBUSTIBLES ISSUES DES DMA..... 100		
CHAPITRE 1 : CARACTERISATION DES FRACTIONS COMBUSTIBLES DANS LA ZONE D'ETUDE 101		
I	Matériels et méthodes	101
I.1	Méthode de caractérisation des déchets de la ville de Béni Mellal.....	101
I.2	Méthode de choix des communes de la province de Khénifra	102
I.2.1	Production des ordures ménagères dans la ZE	103
I.2.2	Eloignement des communes du barycentre de production des déchets.....	104
I.3	Méthode de caractérisation	105
II	Résultats et discussion	106
II.1	Caractérisation des déchets de la ville de Béni Mellal	106
II.2	Résultats de l'étude éliminatoire des communes	107
II.3	Résultats de caractérisation des déchets de la zone d'étude	108
II.3.1	Résultats de caractérisation en fonction de la taille granulométrique	108
II.3.1.1	Impact de la saison	108
II.3.1.2	Impact du type de zone	109
II.3.2	Résultats de caractérisation des fractions combustibles	110
II.3.2.1	Impact de la saison	110
II.3.2.2	Impact du type de zone.....	111
III	Discussion des résultats.....	111
III.1	Taille granulométrique des déchets	111
III.2	Distribution des catégories des combustibles.....	112
III.2.1	Distribution en fonction des saisons	112
III.2.2	Distribution en fonction des zones.....	114
CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES FRACTIONS COMBUSTIBLES CONTENUES DANS LES DMA DE		
LA ZONE D'ETUDE..... 117		
I	Matériels et méthodes	117
I.1	Constitution des combinaisons	117
I.2	. Préparation des échantillons	118
I.3	Analyse des échantillons	118
II	Résultats et discussion	119

II.1	PCI.....	119
II.2	Humidité.....	120
II.3	Taux des cendres.....	121
II.4	Composition élémentaire.....	121
II.5	Chlorures.....	122
II.6	Métaux lourds.....	123
III	Comparaison des résultats expérimentaux avec les modèles empiriques.....	124
PARTIE V : ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DE LA VALORISATION DES FRACTIONS COMBUSTIBLES ISSUES DES DMA.....		127
CHAPITRE 1 : ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE.....		128
I	Données générales sur la co-incinération de RDF et la cimenterie de la zone d'étude..	128
I.1	Présentation de la cimenterie.....	128
I.2	Consommation des combustibles fossiles.....	129
I.3	Approche de l'étude.....	129
I.4	Taux de substitution.....	130
I.5	Besoin en RDF dans la cimenterie.....	130
I.5.1	Besoin en énergie.....	130
I.5.2	Besoin en quantité massique.....	131
I.6	Consommation des combustibles en fonction du temps.....	131
II	Faisabilité économique de la production de RDF.....	132
II.1	Méthodologie.....	132
II.1.1	Valeur actuelle nette.....	132
II.1.2	Approche de l'étude.....	133
II.1.3	Estimation des coûts.....	135
II.1.3.1.	Estimation du prix de RDF.....	135
II.1.3.2.	Coûts d'investissement.....	135
II.1.3.3.	Coûts d'exploitation.....	136
II.1.4	Scénario 1.....	136
II.1.5	Scénario 2.....	137
II.1.6	Scénario 3.....	138
II.2	Résultats et discussion.....	139
II.2.1.	<i>Coûts d'investissement et d'exploitation.....</i>	139
II.2.2.	<i>Estimation du prix de RDF.....</i>	140
II.2.3.	<i>Chiffre d'affaire.....</i>	141

II.2.3. VAN et IP	142
CHAPITRE II : AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX DE LA VALORISATION DE RDF.....	149
I Matériels et méthodes	149
I.1 Test de lixiviation.....	149
I.1.1 Préparation des échantillons.....	150
I.1.2 Les paramètres de lixiviation.....	151
I.1.3 Procédure d'analyse	151
I.1.3.1 Séparation des phases.....	151
I.1.3.2 Analyse du liquide filtré.....	151
I.2 Réduction des émissions des GES.....	152
I.2.1 Formules de calcul	152
I.2.2 Données utilisées dans le calcul	154
II Résultats et discussion	155
II.1 Test de lixiviation.....	155
II.1.1 pH et CE	155
II.1.2 DCO et DBO5	156
II.2 Réduction en CO ₂	157
CONCLUSION GENERALE	160
Références bibliographiques.....	162
Annexe 1.....	178
Annexe 2.....	180

Répertoire des figures

<i>Figure 1: Déchets ménagers par mode de traitement en UE-27 entre 1995-2016 (%)</i> . (Castillo-Giménez et al., 2019).....	6
<i>Figure 2: Pyramide de Lansink de l'héarchie de la gestion des déchets</i>	14
<i>Figure 3: Sources d'impacts liés à la mise en décharges sauvages</i>	15
<i>Figure 4: Schéma d'un casier d'une décharge contrôlée en cours d'exploitation</i>	16
<i>Figure 5: Le diagramme traditionnel utilisé pour évaluer la combustibilité (zone ombrée) des déchets ménagers lors de l'incinération</i> (Tanner, 1965)	18
<i>Figure 6: Composition moyenne des déchets ménagers au Maroc</i> (Sweep-net, 2014).....	22
<i>Figure 7: Comparaison du coût de dégradation de l'environnement en 2000 et en 2014 au Maroc</i> (Banque Mondiale 2017).....	23
<i>Figure 8: Normalisation européenne des combustibles solides de récupération (CSR)</i> (Frankenhaeuser, 2011).....	26
<i>Figure 9: Photo d'une bombe calorimétrique</i> (Melhyas, 2015).....	31
<i>Figure 10: Comparaison des résultats de PCI et d'humidité des RDF et des combustibles fossiles</i>	38
<i>Figure 11: Comparaison de la composition élémentaire des RDF avec celle des combustibles fossiles</i>	40
<i>Figure 12: Production mondiale du ciment et d'énergie fossile jusqu'à 2016</i> (USGS, 2014; Mohr et al., 2015).....	42
<i>Figure 13: Evolution des sources d'énergie dans le secteur cimentier</i> (IEA, 2019).....	43
<i>Figure 14: Consommation globale d'énergie thermique pour la production de ciment par combustible</i> (IEA, 2018).....	43
<i>Figure 15: Distribution des usines de production de ciment au Maroc</i>	44
<i>Figure 16: Mode d'élimination des déchets dans les pays développés dans le monde et le nombre d'unité de valorisation énergétique dans chaque contient</i> (Govanta, 2015).....	50
<i>Figure 17: Production de RDF non normalisé et de RDF normalisé (CSR) en Europe</i> (RECORD, 2018).....	52
<i>Figure 18: Comparaison des quantités de RDF produites et des quantités de RDF utilisées par pays</i> (Record, 2018).....	52
<i>Figure 19: Localisation géographique de la zone d'étude</i>	55
<i>Figure 20: Découpage administratif de la zone d'étude</i>	56
<i>Figure 21 : Carte géologique de la zone d'étude</i> (Hamdouni, 2014).....	57
<i>Figure 22: Carte des altitudes de la zone d'étude</i>	58
<i>Figure 23 : Carte de réseau hydrographique dans la zone d'étude</i>	59
<i>Figure 24: Photos de quelques zones humides dans la zone d'étude: du droit à gauche ; Source Oum Errabia, Lacs Tigalmamine, Lac aguelmam Azegza</i>	59
<i>Figure 25: Diagramme Ombro-thermique de la zone d'étude entre 1984 et 2016</i>	60
<i>Figure 26: Répartition de la population dans la zone d'étude</i>	62
<i>Figure 27: Evolution de la population dans la province de Khénifra entre 1996 et 2018</i>	63
<i>Figure 28: Collecte en mode porte à porte dans le quartier Amalou par une benne satellite</i> (photo prise en 2016).....	67
<i>Figure 29: Collecte des déchets d'abattoir par un caisson métallique</i> (photo prise en 2016).....	67
<i>Figure 30: Collecte des déchets en mode porte à porte dans le quartier Asaka à l'aide d'une benne tasseuse</i> (photo prise en 2016).....	68
<i>Figure 31: Localisation de la décharge provinciale de khénifra</i> (Image satellite 2018)	73

<i>Figure 32:</i> Travaux d'aménagement des casiers de la décharge (Photo prise en 2016)	73
<i>Figure 33:</i> Distribution des échantillons enquêtés dans la zone d'étude	76
<i>Figure 34:</i> Les communes de la zone d'étude choisies pour l'enquête des services communaux	79
<i>Figure 35:</i> Nombre de membre par famille.....	82
<i>Figure 36:</i> Modes d'élimination des ordures par les enquêtés	82
<i>Figure 37:</i> Fréquence d'élimination des ordures par les enquêtés	83
<i>Figure 38:</i> Les enquêtés ayant une idée sur le tri des déchets.....	83
<i>Figure 39:</i> Les enquêtés ayant exercés un tri	84
<i>Figure 40:</i> Fractions triées par les enquêtés	84
<i>Figure 41:</i> Mode de collecte favorable des déchets par les enquêtés.....	85
<i>Figure 42:</i> Les enquêtés ayant une idée sur l'économie circulaire	85
<i>Figure 43:</i> Les enquêtés ayant une volonté de faire un tri à la source	86
<i>Figure 44:</i> Nombre de fractions pouvant être triées par les enquêtés	86
<i>Figure 45:</i> Points de faiblesse et points pour amélioration de la gestion des déchets dans la zone d'étude	92
<i>Figure 46:</i> a ; Rencontre avec les familles pour expliquer l'objectif du projet. b ; Flyer distribué par l'association.....	94
<i>Figure 47:</i> Schéma explicatif de la procédure de tri.....	94
<i>Figure 48:</i> Résultats de calcul de l'efficacité de tri pour les fractions combustibles et non combustibles	95
<i>Figure 49:</i> Taux de satisfaction des familles du tri à la source	96
<i>Figure 50:</i> Problèmes rencontrés lors de l'opération de tri.....	97
<i>Figure 51:</i> Solutions proposées par les familles pour améliorer la qualité du tri.....	98
<i>Figure 52:</i> Classification granulométrique des déchets ménagers	101
<i>Figure 53:</i> Carte de distribution du tonnage journalier dans la zone d'étude	104
<i>Figure 54:</i> Barycentre de production des déchets dans la province de Khénifra	104
<i>Figure 55:</i> Circuit de camion de repasse dans la ville de Khénifra 2016.....	105
<i>Figure 56:</i> Méthode de caractérisation des fractions combustibles contenues dans les DMA de la zone d'étude.....	106
<i>Figure 57:</i> Distribution des fractions combustibles en fonction de la taille granulométrique. A : Fractions de la catégorie 1 ; B : Fractions de la catégorie 2 ; C : Fractions de la catégorie 3 ; D : Fractions de la catégorie 4.....	107
<i>Figure 58:</i> Carte des communes sélectionnées pour la caractérisation des DMA.....	108
<i>Figure 59:</i> Résultats de caractérisation des fractions combustibles dans les diverses communes en fonction de la taille granulométrique en été et en hiver.....	109
<i>Figure 60:</i> Résultats de caractérisation des fractions combustibles dans les diverses communes en fonction de la taille granulométrique dans les zones urbaines et rurales.....	109
<i>Figure 61:</i> Résultats de caractérisation des quatre catégories des fractions combustibles en été et en hiver.....	110
<i>Figure 62:</i> Résultats de caractérisation des quatre catégories de combustibles dans le milieu urbain et rural	111
<i>Figure 63:</i> Distribution des fractions constituant la catégorie 1 en période hivernale et estivale ...	112
<i>Figure 64:</i> Distribution des fractions constituant la catégorie 3 en période hivernale et estivale ...	113
<i>Figure 65:</i> Distribution des fractions de la catégorie 1 dans les zones urbaines et rurales	114
<i>Figure 66:</i> Distribution des fractions constituant la catégorie 3 dans les zones urbaines et rurales	115
<i>Figure 67:</i> Composition en pourcentage massique de chaque combinaison.....	117

<i>Figure 68:</i> a- Echantillon avant broyage; b- Echantillon après broyage	118
<i>Figure 69:</i> Résultats des analyses de PCI pour les six combinaisons	119
<i>Figure 70:</i> Résultats des analyses de taux des cendres pour les six combinaisons	121
<i>Figure 71:</i> Résultats des analyses de la composition élémentaire des six combinaisons.....	122
<i>Figure 72 :</i> Résultats des analyses des chlorures dans les six combinaisons	123
<i>Figure 73:</i> Comparaison des résultats prédictifs et des résultats mesurés de PCI pour les combinaisons constituées des quatre catégories des fractions combustibles.....	125
<i>Figure 74 :</i> Comparaison des résultats prédictifs et des résultats mesurés de PCI pour les six combinaisons	125
<i>Figure 75:</i> Localisation de la cimenterie par rapport à la province de Khénifra.....	129
<i>Figure 76:</i> Les scénarios proposés pour la production du RDF.....	134
<i>Figure 77:</i> Scénario de production et de valorisation de RDF	137
<i>Figure 78:</i> Résultats de calcul des chiffres d'affaire des trois scénarios	141
<i>Figure 79:</i> Comparaison des VAN des trois scénarios	146
<i>Figure 80:</i> Impact du prix de vente de RDF sur la VAN et sur le gain économique de la cimenterie	147
<i>Figure 81:</i> Les deux scénarios proposés pour l'étude de la lixiviation des déchets.....	149
<i>Figure 82:</i> Principe du test de lixiviation selon la norme AFNOR NF EN 12457-4	150
<i>Figure 83:</i> Schéma simplifié du protocole expérimental du TL sans renouvellement.....	151
<i>Figure 84:</i> Résultats de suivi du pH.....	155
<i>Figure 85:</i> Résultats de suivi de la conductivité électrique	155
<i>Figure 86:</i> Résultats d'analyse de la DBO5	156
<i>Figure 87:</i> Résultats d'analyse de la DCO	156
<i>Figure 88:</i> Rapport de DCO/DBO5 dans les TL des deux types de déchets.....	157
<i>Figure 89:</i> Evolution de la réduction du CO ₂ en fonction des années.....	159

Répertoire des tableaux

<i>Tableau 1:</i> Ratio de production des déchets dans quelques PED	8
<i>Tableau 2:</i> Composition moyenne des déchets ménagers dans quelques PED.....	10
<i>Tableau 3:</i> Teneur en humidité des DMA dans quelques PED.....	11
<i>Tableau 4:</i> Teneur en paramètres chimiques globaux dans les déchets ménagers	12
<i>Tableau 5:</i> Avantages et inconvénients des principaux procédés de valorisation énergétique des déchets (Chakraborty et al.,2013 ; Chen et Hu, 2010 ; KACARE 2012 ; Lal et Reddy, 2005 ; Marie et Henrik, 2010).....	20
<i>Tableau 6:</i> Aspect quantitatif des déchets solides au Maroc.....	21
<i>Tableau 7:</i> Détails des coûts relatifs à la dégradation de l'environnement par le secteur des déchets (Banque Mondiale, 2017).....	24
<i>Tableau 8:</i> Classification des RDF selon ASTM (Alter, 1987)	25
<i>Tableau 9:</i> Code de classification des CSR établie par CEN 345	28
<i>Tableau 10:</i> Propriétés permettant une caractérisation suffisante des RDF/CSR conformément aux spécifications d'utilisation finale (Beckman et Thomé-Kozmiensky. 2006)	29
<i>Tableau 11:</i> Différents modèles utilisés pour la détermination du pouvoir calorifique des déchets (Abu-Qudais et al., 2000 ; Kathiravale et al., 2003 ; Khan et al. 1991 ; Lie et a. 1996 ; Morau, 2006)	31
<i>Tableau 12:</i> Série des normes utilisées pour caractériser les CSR	33
<i>Tableau 13:</i> Les études choisies pour une analyse comparative des caractéristiques des RDF dans le monde	33
<i>Tableau 14:</i> Valeurs de l'humidité et du PCI des RDF de différentes études	35
<i>Tableau 15:</i> Résultats de l'analyse de la matière sèche et du taux des cendres.....	36
<i>Tableau 16:</i> Taux des métaux lourds trouvés dans les différentes études	37
<i>Tableau 17:</i> Résultats de la composition élémentaire des RDF dans les différentes études	37
<i>Tableau 18:</i> Classification des RDF/CSR en fonction de la valeur de PCI	38
<i>Tableau 19:</i> Classification des déchets en fonction du taux des cendres	39
<i>Tableau 20:</i> Application de la classification élaborée par le CEN 15359.....	40
<i>Tableau 21:</i> Données sur le secteur cimentier au Maroc (APC, 2018)	45
<i>Tableau 22:</i> Normes de qualité pour l'utilisation des CSR dans les fours des cimenteries en quelques pays européens	47
<i>Tableau 23:</i> Résultats d'analyses de dioxine et furane lors de la substitution de la coke de pétrole par le RDF (Kara,2012).....	49
<i>Tableau 24:</i> Variation des émissions des NOx et de SO ₂ en fonction de la substitution de la coke de pétrole par le RDF (Kara, 2012).....	49
<i>Tableau 25:</i> Réparation des espèces des arbres dans les forêts de la zone d'étude	61
<i>Tableau 26:</i> Projection de la population dans la zone d'étude.....	61
<i>Tableau 27:</i> Les principales unités industrielles dans la zone d'étude	65
<i>Tableau 28:</i> Le secteur commercial dans la zone d'étude	65
<i>Tableau 29:</i> Organisation de la collecte actuelle au niveau de la commune urbaine de M'riirt	69
<i>Tableau 30:</i> Caractérisation du service de la gestion des déchets dans les centres des communes rurales	69
<i>Tableau 31:</i> Questionnaire dédié aux citoyens.....	78
<i>Tableau 32:</i> Résultats de l'enquête des communes	87
<i>Tableau 33:</i> Estimation du tonnage journalier des DMA dans la zone d'étude.....	103
<i>Tableau 34:</i> Données sur les communes choisies pour la caractérisation des DMA	108

<i>Tableau 35: Comparaison des résultats de distribution des fractions combustibles dans la zone d'étude avec d'autres zones dans des PED</i>	<i>115</i>
<i>Tableau 36: Modèles théoriques pour la détermination du PCI.....</i>	<i>118</i>
<i>Tableau 37: Résultats des analyses de l'humidité des six combinaisons.....</i>	<i>120</i>
<i>Tableau 38: Résultats des analyses des métaux dans les combinaisons.....</i>	<i>124</i>
<i>Tableau 39: Données de calcul de besoin en RDF.....</i>	<i>130</i>
<i>Tableau 40: Production du clinker par ans, par jour et par heure</i>	<i>131</i>
<i>Tableau 41 : Résultats de calcul de l'économie de pet coke.....</i>	<i>132</i>
<i>Tableau 42: Facteurs pour l'estimation de l'investissement en capital de l'unité de production de RDF</i>	<i>135</i>
<i>Tableau 43: Facteurs pour l'estimation des coûts d'exploitation de l'unité de production de RDF ...</i>	<i>136</i>
<i>Tableau 44: Economie de coke pétrole par la cimenterie sur 10 ans</i>	<i>138</i>
<i>Tableau 45: Résultats d'estimation de l'investissement en capitale et d'investissement en MAD.....</i>	<i>139</i>
<i>Tableau 46 : Résultats d'estimation de l'investissement en capitale en MAD</i>	<i>139</i>
<i>Tableau 47: Résultats d'estimation des coûts d'exploitation en MAD</i>	<i>140</i>
<i>Tableau 48: Résultats d'estimation des prix de vente de RDF en MAD/tonne</i>	<i>141</i>
<i>Tableau 49 : Résultats de calcul de la VAN pour le scénario 1</i>	<i>143</i>
<i>Tableau 50: Résultats de calcul de la VAN pour le scénario 2</i>	<i>144</i>
<i>Tableau 51 : Résultats de calcul de la VAN pour le scénario 3</i>	<i>145</i>
<i>Tableau 52: Les bénéfices liés à la production et l'utilisation de RDF par la cimenterie.....</i>	<i>148</i>
<i>Tableau 53: Méthodes utilisées pour les analyses.....</i>	<i>152</i>
<i>Tableau 54: Equations utilisées pour le calcul de la réduction en CO₂.....</i>	<i>153</i>
<i>Tableau 55: Données relatives aux déchets et PC sur 10 ans en tonne</i>	<i>154</i>
<i>Tableau 56: Valeurs des paramètres utilisés dans le calcul.....</i>	<i>154</i>
<i>Tableau 57: Résultats de calcul de la réduction de CO₂ sur 10 ans.....</i>	<i>158</i>

INTRODUCTION GENERALE

Le problème de gestion des déchets solides dans les pays en voie de développement (PED) demeurent cruciaux et notamment en matière de gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA). La quantité des ordures ménagères ne cesse pas d'augmenter à cause de l'urbanisation forcée et l'amélioration de niveau de vie. Le Royaume du Maroc s'est lancé dans des politiques de gestion globale des déchets afin de bien gérer ce secteur d'une manière efficace et durable ; le plan national de gestion des déchets (PNDM) a été lancé pour mettre fin aux impacts liés à la mise en décharges sauvages en éliminant les sites non contrôlés et les remplacer par des décharges contrôlées avec la mise en place d'une filière de valorisation.

Le mode de gestion des déchets dans les PED est souvent orienté vers la mise en décharge, la quasi-totalité des déchets urbains sont évacués dans des décharges sauvages ou plus au moins contrôlées avec un faible taux de valorisation. La matière et l'énergie contenues dans les déchets sont perdues et contribuent à l'apparition des sources de pollution comme le biogaz qui contribue au réchauffement climatique et les lixiviats qui s'infiltrent dans le sol et contribuent à la pollution des nappes phréatiques.

Les déchets ménagers des PED et notamment ceux des pays maghrébins sont constitués principalement de la matière fermentescible d'où l'orientation vers un mode de valorisation biologique par compostage ou par méthanisation. Mais le problème rencontré c'est que la qualité des produits issus de la valorisation biologique est influencée par la présence des impuretés dans le compost ce qui est due à une faible efficacité de tri des déchets en amont de l'unité de valorisation. Nous supposons alors que le fait de produire un combustible alternatif à partir des fractions sèches incinérables constituant la principale source, pourrait améliorer la qualité du compost ou du biogaz.

Actuellement dans les pays développés (P.D.) et notamment en quelques pays de l'Europe de l'Ouest, la gestion des combustibles solides de récupération (CSR) et ou RDF (Refuse derived fuel) est en cours de développement étant donné que la valorisation de ces dernier à plusieurs avantages (substitution des combustibles fossiles, minimisation des surfaces de déchargement, minimisation des gaz à effet de serre, récupération de l'énergie durable,...). En PED, cette filière est peu étudiée malgré les avantages qu'elle présente. Les CSR et ou RDF sont constitués par des fractions de déchets à haut pouvoir calorifique comme le carton, le papier, le plastique, le textile, La qualité d'un CSR dépend de plusieurs paramètres comme le pouvoir calorifique inférieur (PCI), la teneur en cendre, l'humidité, la teneur en chlore, les métaux lourds, ...

Le tri des déchets en plusieurs catégories est une étape primordiale dans les systèmes de gestion durable des ordures ménagères, pour en aboutir il faut intégrer la société civile dans le système de

gestion des déchets via des programmes de sensibilisation. Les autorités responsables de ce secteur et notamment les collectivités territoriales devront s'engager dans ce processus afin d'atteindre un taux d'efficacité élevé.

L'objectif de cette étude est de développer la recherche en matière de gestion des déchets au Maroc et notamment la valorisation des fractions incinérables issues des déchets ménagers. En effet, le vide que connaît la recherche scientifique dans ce sujet dans les PED nous a motivé afin de traiter cette thématique en tenant en compte tous les aspects ; techniques, économiques, environnementaux et sociaux. Les résultats de ce travail permettront d'avoir une base de données sur les CSR/RDF et ils pourraient être utilisés par le secteur industriel consommateur de l'énergie fossile afin d'encourager la consommation des combustibles alternatifs. Ainsi, l'étude pourrait offrir aux collectivités territoriales des scénarios pour pouvoir profiter des déchets en les considérant comme source d'énergie durable et non pas des déchets à enfouir dans les décharges.

Ce rapport s'articule autour de cinq parties :

Une première partie bibliographique dont le premier chapitre traitera l'état général de la gestion des déchets ménagers dans les PED et en particulier au Maroc (cadre législatif, production, élimination,...), ainsi que la chaîne de gestion depuis la pré-collecte jusqu'à l'élimination finale par différents modes de traitement. Le deuxième chapitre de cette partie est consacré à l'état de l'art en matière de développement de la recherche dans le secteur des combustibles solides de récupération dans les pays développés.

Une deuxième partie présente la zone d'étude. Dans un premier chapitre, la monographie de la province de Khénifra sera présentée en décrivant les divers secteurs ainsi que le paysage naturel de la zone. Dans un deuxième chapitre, les résultats de l'état des lieux de la gestion des déchets dans les communes constituant le territoire de la zone d'étude seront présentés.

La troisième partie du présent travail abordera le volet social et la gestion des déchets, le premier chapitre vise à faire des enquêtes de la population et des services techniques des communes responsables sur la gestion des déchets afin de soulever les sources des problèmes liées à ce secteur. Dans le deuxième chapitre, les résultats d'un projet pilote de tri à la source en deux fractions (sèche et humide) seront présentés.

La quatrième partie est consacrée à l'étude technique des CSR/RDF. Dans un premier chapitre, les résultats de caractérisation des déchets dans la zone d'étude en fonction des saisons (estivale et hivernale) et en fonction des zones (urbaine et rurale) seront présentés. Et le deuxième chapitre traitera

la constitution des combinaisons de CSR/RDF et leur caractérisation afin d' en choisir celle qui est optimale.

La cinquième partie est consacrée dans le premier chapitre à l'étude de faisabilité financière de la valorisation des CSR/RDF dans les fours à ciment et le deuxième chapitre traitera l'étude environnementale dudit projet.

PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I Généralités sur la gestion des déchets dans quelques régions dans le monde

À l'heure actuelle, la population urbaine totale dans le monde s'élève à environ 4,028 milliards d'habitants et augmente considérablement à un taux annuel de 2,035% (Banque mondiale, 2016a, 2016b). Cette augmentation accélérée de la population entraîne une industrialisation et une croissance économique rapide qui sont les principaux facteurs d'augmentation de la production des déchets solides dans le monde. Selon la Banque mondiale, la production de déchets ménagers passera de 2,01 milliards de tonnes en 2016 à 3,40 milliards de tonnes en 2050 (Banque mondiale, 2018). La composition et le taux de production des déchets solides dépendent uniquement des conditions sociales, économiques et environnementales d'un pays. Le PIB est un paramètre influençant la diversité des aspects qualitatifs et quantitatifs des déchets dans le monde (Shekdar, 2009).

Dans le premier chapitre de la synthèse bibliographique, nous allons présenter l'état de l'art de la gestion des déchets ménagers dans les PED et les différents modes de valorisation existants. Au contraire des PED, les pays développés (PD) ont un système de gestion des déchets plus efficace suite à l'application des textes juridiques qui ont apparus depuis 1990 en Union Européenne UE (Houot and Rose, 2002; François, 2004; Garcia et al., 2005). Malgré que les PD consomment dix fois plus que les PED donc produisent des déchets plus (Schandl et al., 2017) alors que ces derniers arrivent à gérer leurs ordures d'une façon durable. De point de vue social, en plus d'assurer la santé et le bien-être de la population, l'état de succès d'un système de gestion des déchets peut être une mesure du succès de gouvernance dans un pays. Cela peut conduire à une attraction supplémentaire pour les entreprises et le tourisme et donc contribuer au développement de l'économie du pays (Wilson et al., 2015).

I.1 Gestion des déchets en Europe

La population de l'Union Européenne (UE) (28 États membres) est d'environ 500 millions d'habitants (Eurostat, 2018a), elle génère plus de 200 millions de tonnes de déchets ménagers chaque année (Eurostat, 2018b). La hiérarchie de la gestion des déchets donne la priorité à la prévention suivie par la réutilisation, le recyclage et la récupération. Si les options précédentes ne sont pas possibles, les déchets sont éliminés dans les décharges contrôlées (Commission européenne, 2008). En outre, dans le cadre de ses efforts incessants pour accroître la durabilité de l'économie de l'UE et pour mettre en œuvre son ambitieux plan d'action pour une économie circulaire, la Commission Européenne (CE) a publié en janvier 2018 le "Paquet économie circulaire 2018" (Commission européenne, 2019) qui tient en compte de la gestion des déchets ménagers. À cet égard, les derniers objectifs de l'UE incluent le

recyclage de 65% des déchets municipaux d'ici 2030 et une réduction maximale de 10% de la mise en décharges.

Le mode de gestion des déchets dans les pays Européens est assez développé, ainsi les modes de traitement sont évolués avec le temps dans le but de valoriser le maximum des déchets en réduisant l'option de la mise en décharge comme il est montré dans la *figure 1*.

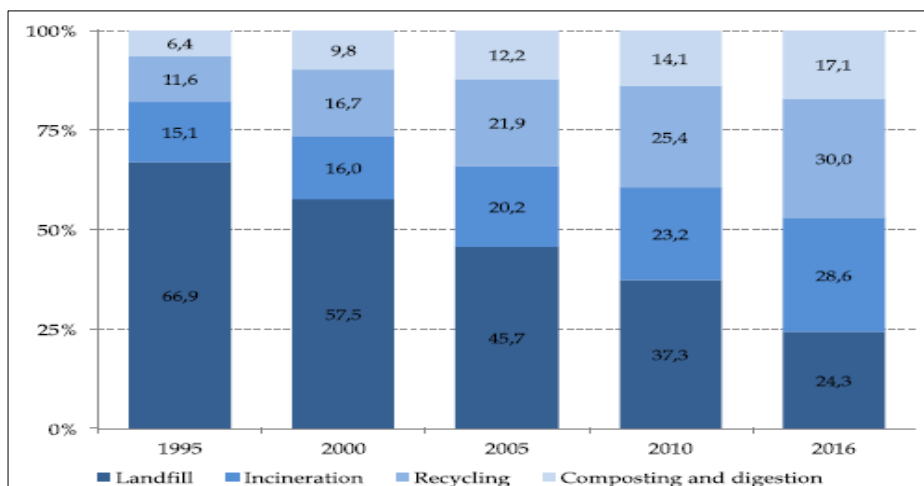


Figure 1: Déchets ménagers par mode de traitement en UE-27 entre 1995-2016 (%). (Castillo-Giménez et al., 2019)

I.2 Gestion des déchets en Asie

Les pays en développement situés en Asie connaissent une croissance annuelle de la population urbaine d'environ 4% (Othman et al., 2013). Ce qui entraîne une augmentation dans la consommation alimentaire, du développement économique, de l'urbanisation et de l'industrialisation, ces facteurs sont les principales causes de la production accrue de déchets ménagers dans les pays asiatiques (Ngoc et Schnitzer, 2009). Les pays asiatiques génèrent environ $4,4 \cdot 10^9$ tonnes / ans de déchets solides (Pappu et al., 2011) et dépensent environ 25 million de dollars chaque année pour gérer ce secteur (Hornweg et Bhada-Tata, 2012). Le taux de production et la composition des déchets ménagers sont associés principalement à l'économie et au climat (Yadav et Samadder, 2017).

I.3 Gestion des déchets en Amérique Latin

La gestion des DMA en Amérique latine ne fait pas exception des pays en développement. Les pays d'Amérique latine ont des villes à croissance rapide où le taux de production des déchets augmente. Mais les modes de gestion de l'assainissement solide n'ont pas évolué pour bien gérer ce secteur. Comme toute autre région du monde, les DMA des pays de l'Amérique latine présentent certaines caractéristiques uniques à la région. L'Amérique Latine compte plus de 600 million d'habitants (OECD/ECLAC/CAF, 2016). Le ratio de production des déchets ménagers dans cette région est de 1,09 kg / habitant / jour (Banque Mondiale, 2012) avec un aspect qualitatif riche en matière fermentescible. Le mode d'élimination couramment utilisé dans cette région est l'enfouissement. En

effet, il y a encore des pays qui utilisent les dépotoirs sauvages pour éliminer les déchets; en Belize 85,2% de la population utilise des décharges sauvages et 69,8% en Guatemala et 59,3% à Nicaragua (Espinoza et al., 2010). Concernant le recyclage des déchets, les pays latins sont très en retard dans ce propos. En effet, le recyclage formel ne traite que 2% des déchets ménagers dans cette zone (Grau et al., 2015; UNHSP, 2012). En outre, la valorisation énergétique n'est pas très développée, certaines grandes villes comme Sao Paulo au Brésil ont montré un intérêt pour ces technologies. Toutefois, aucun projet n'a été pas lancé, sauf dans certains cas aux Bermudes et en Martinique (Grau et al., 2015).

II Chaîne de gestion des déchets dans les PED et les modes de traitement

II.1 Génération des déchets dans les PED

II.1.1 Aspect quantitatif

L'urbanisation et l'industrialisation rapides provoquent une croissance accélérée de la production des déchets ménagers dans le monde entier (Chiemchaisri et al., 2007; Liu et Wu, 2010; Saeed et al., 2009). Les projections montrent que la génération des déchets dans les grandes villes métropolitaines du monde entier passera de 1,3 milliard de tonnes en 2012 à 2,2 milliards de tonnes en 2025 (Hoorweg et Bhada-Tata, 2012, Kawai et Tasaki, 2016).

La prolifération des décharges et des dépotoirs sauvages dans les PED est due à la production intense des quantités importantes des déchets. Actuellement, près de 1,3 milliard de tonnes de DMA sont générés à l'échelle mondiale chaque année, ce qui correspond à un ratio de 1,2 kg /habitant / jour (Hoorweg et Bhada-Tata, 2012). Les taux réels par habitant, cependant, sont très variables, car il existe des différences considérables dans les taux de production de déchets entre pays, entre villes, et même à l'intérieure des villes (Aina, 2006). Les quantités de déchets ont tendance à être beaucoup plus faible dans les zones rurales car le niveau de vie est bas et la consommation et assez faible par rapport aux zones urbaines. Selon (SEMEMDD, 2019) il y a une grande différence entre le tonnage des DMA dans les différentes régions au Maroc; 1 484 755 tonne/ans dans la région de Casablanca-Settat 29 590 tonne/ans dans la région de Dakhla Oued Eddahab. Aujourd'hui, plus de 50 % de la population mondiale habite dans les villes, et le taux d'urbanisation augmente rapidement. Le *tableau 1* présente quelque ratio de production des déchets ménagers en quelques pays et villes des PED.

Tableau 1: Ratio de production des déchets dans quelques PED

Ville	Pays	Ratio de production kg/hab/jour	Référence
Moyenne nationale	Brésil	1,07	Raquel et al., 2017
Youndé	Cameroun	0,85	Ngnikam, 2000
Baffoussam	Cameroun	0,37	Ngnikam, 2000
Ouagadougou	Burkina Faso	0,62	Tezanou et al., 2001
Moyenne nationale	Inde	0,41	Bernache Perez, 2001
Grand Casablanca	Maroc	0,89	ONEM 2001
Moyenne nationale	Maroc	0,75	ONEM 2001
Zone urbain	Chine	1,12	Zheng et al., 2014
Milieu urbain	Philippines	0,50	UNEP, 2001
Milieu rural	Philippines	0,30	UNEP, 2001
Moyenne nationale	Vietnam	0,61	UNEP, 2001
Kuala Lumpur	Malaisie	1,7	Kathirvale et al. , 2003
Moyenne nationale	Malaisie	0,5 – 0,8	Kathirvale et al. , 2003
Mexicali	Mexique	0,59	Ojeda-Benitz et al. , 2003
Guadalajara	Mexique	0,51	Ojeda-Benitz et al. , 2003
Nouakchott	Mauritanie	0,21	Alouémine, 2005
Déchets mélangés- Grande ville	Pays pauvres	0,5 à 0,75	Cointreau, 2006
Déchets mélangés- Grande ville	PED	0,55 à 1,1	Cointreau, 2006
Déchets mélangés- Grande ville	Pays développés	0,75 à 2,2	Cointreau, 2006
Déchets du pays	Ghana	0,47	Kodwo et al. , 2015
Duste	Nigeria	0,92	Oumarou et al., 2012
Déchets du pays	Kuwait	1,4	Ayed, 2016
Déchets du pays	Pakistan	0,57	Hoorweg Bhada, 2012
Kucaeli	Türkiye	0,92	Ismail, 2015

Comme il est montré dans le *tableau 1*, on peut trouver une différence dans la production des déchets même pour le même pays et on constate toujours que le ratio de production est élevé dans le milieu urbain. Ainsi, la différence est observée entre les pays pauvres, les PED et les PD. En outre, la densité de la population est un paramètre important dans la variation du ratio de production des déchets ; A Singapour la population en 2001 est estimée à 4,5 Millions d’habitants avec une production de déchets de 5 Million de tonne par ans. Dans l’autre partie, la Malaisie compte 22 Million d’habitants avec une production des déchets de 5,5 Millions de tonne par ans.

II.1.2 Aspect qualitatif des déchets ménagers

La caractérisation des déchets est une étape primordiale pour leur gestion. En effet, l'étude de la composition des ordures permet d'avoir des idées sur les procédés à adopter pour le traitement, l'origine des déchets, les propriétés physiques, chimiques et biologiques et de s'assurer de leurs conformité avec les lois en vigueur (Reinhart et Mc Creanor, 1996 ; Wicker, 2000; Wavrer et al., 2010). La caractérisation des déchets n'est pas universelle, elle dépend de l'objectif recherché, Brunner et Walter, (1986) ont suggéré une caractérisation avec trois paramètres ; i) composition en fractions (papier, carton, ...) ; ii) Composition élémentaire (Carbone, Hydrogène, Chlorure,...) ; iii) Paramètres physiques, chimiques ou biologiques (PCI, Taux de cendre, pH,...). Il n'est pas toujours nécessaire de déterminer tous les paramètres. En effet, le compostage ne nécessite pas la détermination de PCI ou l'étude thermogravimétrique ATG/ATD.

La méconnaissance des déchets peut provoquer plusieurs problèmes dans leur traitement, chose qui a été montré par Hafid et al., (2004) qui a cité que la méconnaissance des déchets au Maroc est la cause de fermeture des unités de traitement entre 1960 et 1980 à cause de la non adaptation des technologies au contexte des déchets Marocains. D'autres expériences ont été échouées en Afrique comme le cas de l'incinération en Tanzanie et à Nigeria (Achankeng, 2003).

II.1.2.1 Composition physique des déchets

La récupération des matériaux à partir des déchets peut améliorer le volet socio-économique dans les PED (Aye et Widjaya, 2005 ; Buenrostro et Bocco, 2003 ; Zaïri et al., 2004), dans ce sens, la connaissance de la composition physique des déchets pour une région permet d'avoir une idée sur les fractions qui peuvent faire objet d'un marché de recyclage.

Plusieurs paramètres peuvent influencer la composition des déchets comme le niveau de vie et la saison de l'année (Alouienne et al., 2006). Dans l'étude de Kodwo et al., (2015) menée sur les déchets du Ghana, les fractions des déchets ménagers sont variées considérablement dans les différentes zones géographiques du pays. Dans la zone côtière, la fraction des déchets organiques est la plus élevée mais elle a diminué dans la zone forestière vers le Nord de la savane. Cependant, dans les mêmes zones vers le Nord, les déchets plastiques ont plutôt augmenté en pourcentage. Le *tableau 2* présente la composition des déchets ménagers en fractions dans quelques PED.

Tableau 2: Composition moyenne des déchets ménagers dans quelques PED

	Arabie Saoudite	Dar Es- Salaam	Tunis	Ile de Maurice	Turquie	Maroc	Ghana	Algérie 1983	Algérie 2001	Algérie 2004
Déchets putrescibles	37	42,0	70	25	40-65	65-70	61	78	62	64,6
Papier/carton	29	3,1	13	12	7-14	18-20	3	12,6	13,5	15,9
Textiles	6	1,2	4,2	3		2-3	2	3,4		2,3
Plastiques	5	2,2	4,2	13	5-14		14	2,7	7,5	10,5
Composites		-	-	-		-	-	-	-	-
Divers combustibles	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verre	5	3,5	3,2	1	2-6	0,5-1	3	1,1	0,5	2,8
Métaux		2	3	1	1-6	5,6		2,2	1,5	1,9
Incombustibles divers		0,4	-	-	-	-	-	-	-	-
Déchets dangereux		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres	10	45,6	2,4	45	7-24		11	-	-	2
Auteur	Ouada et al.,2013	Mbuligwe et Kassenga. 2004	Zaïri et al., 2004	Mohee, 2002	Turan et al., 2009	Hafid et al., 2002 b	Kodwo et al., 2015	Guermou d et al., 2009	Guermou d et al., 2009	Guermou d et al., 2009

On remarque que la composition des déchets varie d'un endroit à un autre et même avec le temps, c'est le cas des ordures en Algérie par exemple qui connaissent une diminution de la matière biodégradable au cours des années. En revanche, les plastiques, le textile et les métaux ont évolué d'une manière croissante sous l'effet de l'amélioration de niveau de vie et l'orientation à la consommation des produits emballés.

II.1.2.2 Caractérisation physico-chimique et chimique des déchets

Une étude complète des déchets solides doit tenir compte de l'aspect physico-chimique et chimique pour avoir une idée sur le mode de traitement à choisir, de connaître la nature de la pollution qui peut être générée par ces refus et d'avoir une idée sur le procédé à utiliser.

II.1.2.2.1 Humidité

L'humidité des déchets ménagers produits en PED est caractérisée par une valeur assez élevée entre 50 et 95% (Charnay, 2005). En PD le taux d'humidité peut aller de 25 à 35% (Ben Ammar, 2006). Dans l'autre partie, on peut trouver des déchets dans quelques PED avec un taux très faible en humidité c'est le cas de la Mauritanie; la faible teneur en humidité des déchets est liée à la faible teneur en matière biodégradable qui est utilisée généralement pour la nourriture de bétails ainsi que le climat saharien qui joue un rôle dans le faible taux d'humidité (Alouiennne, 2006).

Le *tableau 3* représente les valeurs de l'humidité des déchets ménagers dans quelques PED.

Tableau 3: Teneur en humidité des DMA dans quelques PED

Auteur	Pays	Humidité (%)
Aloueimine et al., 2005	Mauritanie	11
El Fadel et al., 2002	Liban	60-75
Folléa et al., 2001	Burkina Faso	40-60
Hassan et al., 2001	Malaisie	53-66
Koledzi, 2011	Togo	14-33
Mbuligwe & Kassenga, 2004	Tanzanie	31
Wicker, 2000	Maroc	60-70

II.1.2.2.2 Densité

La détermination de la densité des déchets solides à un rôle très important. En effet, c'est grâce à ce paramètre que les engins et le matériel de collecte sont dimensionnés. La valeur de la densité varie en fonction de la typologie des déchets elle peut aller de 0,2 à 0,4 : Maroc (0,35), Pakistan (0,13), Colombie (0,3), Malaisie (0,24) et 0,2 en France (Wicker, 2000 ; Zurbrugg et Rehan, 1999). La densité est assez élevée pour les déchets en PED à cause de la teneur élevée en matière fermentescible qui est

caractérisée par une masse importante. En Revanche les déchets en PD sont caractérisés par la présence des emballages en carton et en plastiques, ces derniers occupent un grand volume avec une masse relativement faible.

II.1.2.2.3 Pouvoir calorifique inférieure (PCI)

Le PCI est un paramètre important car il permet de déterminer l'incinérabilité d'une matière. En outre, il renseigne sur la faisabilité économique de l'utilisation de certains combustibles pour la production de l'énergie électrique ou thermique. Dans le domaine de la gestion des déchets, le PCI contribue au choix du mode de traitement et ou de valorisation énergétique des ordures. Ainsi le PCI des ordures ménagères est variable selon l'origine, la composition et l'humidité des déchets (ADEME 2002). Aloueimine (2005) a souligné dans son étude que la majorité des déchets des PED ont un PCI moyen de 1000 Kcal/kg. A Ouagadougou, Hamidou, (2005) a déterminé le PCI d'un échantillon modèle constitué de bois (54%), de carton (24%) et de plastique (22%), la valeur du PCI trouvée est grande (4829Kcal/kg) par rapport aux déchets de la Mauritanie défini dans l'étude de Aloueimine et supérieure aussi au PCI trouvé dans l'étude de Nzihou et al. (2008) qui est de l'ordre 3654 kcal/kg. Le PCI des déchets dans l'Ile Maurice selon Mohee (2002) est de 4498 Kcal/kg avec un taux d'humidité de 48%, en revanche le PCI des déchets Marocains est de l'ordre de 1000 kcal/kg avec un taux d'humidité allant de 60 à 70% (Charnay 2005, Wicker, 2000).

II.1.2.2.4 Paramètres chimiques globaux

Plusieurs paramètres peuvent être déterminés dans l'objectif d'évaluer le potentiel polluant d'un déchet ou de choisir le mode de valorisation convenable. Le rapport C/N est un paramètre important dans le suivi d'un projet de compostage ce dernier gouverne les bonnes conditions de vie des microorganismes. Dans l'autre partie, la détermination de la teneur en métaux lourds pourrait prévenir la pollution résultante d'une mauvaise gestion des déchets. Le *tableau 4* présente quelques résultats des paramètres globaux dans les déchets dans quelques PED.

Tableau 4: Teneur en paramètres chimiques globaux dans les déchets ménagers

Paramètre	Unité	Mauritanie	Tunisie	Malaisie	Chine
Carbone	%MS	-	-	46,11	29 ± 5
Azote	%MS	-	-	1,26	-
MO	%MS	52,2	-	31,36	-
Chlore	ppm MS	-	-	8,840	-
Zinc	ppm MS	0,053	0,615		1,3 ± 0,2
Cadmium	ppm MS	0,014	2,86	0,001	0,3 ± 0,01
Chrome	ppm MS	0,228	0,0592	0,014	0,18 ± 0,02

Mercure	ppm MS	-	-	0,003	0,005 ± 0,001
Auteurs		Aloueimine et al., 2005	Hassen et al., 2001	Kathirvale et al., 2003	Youcai et al., 2002

II.2 Tri des déchets

Le tri est une étape importante dans une chaîne de gestion des déchets. En effet, la séparation des ordures à la source permet d'éviter la mise en place d'un tri en amont d'une unité de valorisation des déchets (recyclage, compostage,...). Plusieurs systèmes de séparation à la source sont mis en œuvre et le succès de cette filière dépend des gestes correctes des citoyens dans leurs ménages ([Baltes et al. 2009](#); [Leitol, 2014](#) ; [Rada et al., 2013](#)). Le tri des déchets dans les PED connaît un retard dans son développement. Plusieurs chercheurs ont étudié des facteurs affectant le comportement de la population avec tri des déchets ([Haibin et al., 2016](#) ; [Bin et al., 2019](#)). La synthèse des résultats de ces recherches permet d'identifier des facteurs intrinsèques de la population (influence sociale), la présence ou non des récompenses économiques, la fréquence de la collecte en tant que facilitateur externe et le manque d'une éducation environnementale ([Berger, 1997](#) ; [Hornik et al. 1995](#) ; [Grodzin' ska-Jurczak et al., 2006](#); [Castagna et al., 2013](#); [Zsóka et al., 2013](#)). La mise en place d'un système de tri des déchets dans les PED est très difficile malgré les efforts déployés par les états. Les déchets en arrivant au centre de valorisation, leur tri devient difficile étant donné que la teneur élevée en humidité rend la séparation des fractions plus compliquée.

II.3 Pré-collecte des déchets ménagers

La pré-collecte consiste à faire une étude de sectorisation afin de bien maîtriser l'étape de la collecte des déchets. Avant, l'introduction des outils de l'information géographiques, la collecte des déchets se fait d'une manière aléatoire, mais après que la gestion déléguée a apparue, les professionnelles ont introduit la technologie pour améliorer la qualité des prestations. Le SIG (système d'information géographique) a facilité la tâche. En effet, il permet de cartographier les secteurs et les circuits de collecte ainsi que le géocodage des emplacements des bacs en se basant sur un suivi par GPS. La pré-collecte comporte aussi le choix des engins de collecte, ces derniers ont connu une évolution avec le temps passant du mode de collecte classique en utilisant des animaux et des charrettes, vient après les bennes TP et actuellement des camions à système de pressions sont utilisés (les bennes tasseuses). La pré-collecte des déchets ménagers au Maroc a connu une évolution importante ce qui est due à l'orientation des communes vers la gestion déléguée.

II.4 Collecte des déchets

La collecte des déchets est le transfert des déchets du point de production vers le point de traitement et ou d'élimination. L'efficacité de la collecte est évaluée par le taux de collecte qui est calculé en se basant sur la quantité des déchets produite et la quantité des déchets collectée, ce taux varie d'une région à une autre allant de 41% en moyens dans les pays pauvres jusqu'à 98% dans les pays développés (Hoornweg, Bhada-Tata, 2012). Les déchets ménagers collectés peuvent être séparés ou mélangés selon les réglementations locales. Souvent, dans les PED, les DMA ne sont pas séparés ni triés avant la collecte, à l'exception de quelques fractions qui sont triées d'une manière informelle par les chiffonniers.

Généralement on distingue deux modes principaux de collecte des déchets ; le porte à porte : qui consiste au passage des engins de collecte ou des chariots dans des rues pour collecter les sacs en plastiques contenant les déchets ou les poubelles devant les portes des habitants. Ce mode de collecte est le plus classique, souvent le porte à porte connaît plusieurs problèmes notamment au niveau de l'horaire de collecte qui n'est pas respecté par la population, de ce fait l'habitant cherche un endroit pour éliminer ces déchets causant par la suite l'apparition des point noirs dans les villes. Le deuxième mode de collecte est le par apport, la commune ou le délégataire responsable de la collecte des déchets mis à la disposition des citoyens des conteneurs (bacs, caissons métalliques, bacs enterrés, ...) pour en mettre leurs déchets (Mansour, 2015).

II.5 Elimination des déchets ménagers

Plusieurs méthodes et technologies sont mises en service pour éliminer ou valoriser les ordures ménagères. Une mauvaise gestion de ce secteur peut générer des impacts néfastes sur l'environnement et sur la santé humaine. Le mode le plus utilisé pour éliminer les DMA dans les PED est l'enfouissement malgré les avantages de la valorisation matière et énergétique. Ad Lansink est un politicien Néerlandais qui a mis une échelle pour une gestion efficace des déchets en mettant une hiérarchie afin de choisir le mode de gestion le plus convenable comme il est montré dans la *figure 2*.



Figure 2: Pyramide de Lansink de l'héarchie de la gestion des déchets

II.5.1 Mise en décharge

La mise en décharge est le mode le plus couramment utilisé pour éliminer les déchets dans les PED (Agamuthu, 2013). En Afrique, 47% des déchets sont éliminés dans des dépotoirs à ciels ouvert et 29% sont éliminés dans les décharges contrôlées (Sandra et Vera, 2018). Le Maroc à son tour, donne davantage d'importance à l'enfouissement, ce qui visible dans les principaux objectifs de la PNDM qui prévoit le recyclage de 20% des déchets à l'horizon de 2022, qui est un faible pourcentage par rapport aux avantages d'une chaîne de valorisation des déchets. En outre, la loi 28-00 qui porte sur la gestion des déchets au Maroc se concentre plus sur les décharges contrôlées au lieu de développer les différentes filières de traitement et de valorisation des déchets.

II.5.1.1 Décharges sauvages

Plusieurs études ont été menées afin d'examiner les effets sur la santé et sur l'environnement liés à la mise en décharges sauvages et il a été prouvé que ce mode présente des effets directes et indirectes sur la santé et sur les écosystèmes (Aatamila et al., 2010 ; Boardi et Kuitunen, 2005 ; Giusti, 2009 ; Nabegu, 2010 ; Nwanta et Ezenduka, 2010 ; Nguendo Yongs et al., 2008 ; Xiao et al., 2007). Les voies d'impact des décharges sauvages sont présentées dans le schéma de la *figure 3*. Les lixiviats générés par les déchets contiennent toute sorte de polluants organiques et inorganiques avec des valeurs élevées de DCO et des métaux lourds (Alyne et al., 2019). Ces effluents peuvent atteindre les eaux souterraines et les eaux de surfaces et également contribuent à la contamination des sols entourant le site de la décharge (Chaer et al., 2016 ; Suman et al., 2006). La forte teneur en polluants organiques et inorganiques rend le traitement des lixiviats très compliqué (Alyne et al., 2019). En plus des effluents liquides, le biogaz produit par la fermentation des déchets dans les décharges contient le méthane et le CO₂ qui sont des gaz à effet de serre (Pinto et al., 2014).

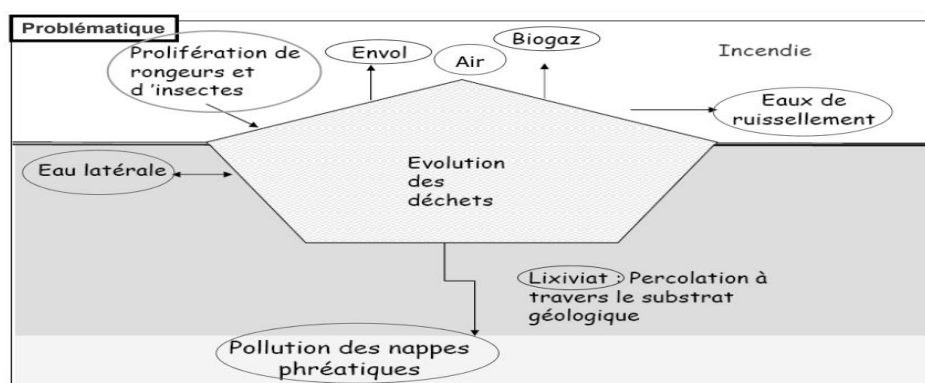


Figure 3: Sources d'impacts liés à la mise en décharges sauvages

II.5.1.2 Décharges contrôlées

Pour faire face aux impacts liés à la mise en décharges sauvages, les chercheurs ont développé la notion d'une décharge contrôlée permettant le contrôle des fuites des lixiviats, la dispersion des

envols, les émissions de biogaz, les incendies spontanés et le contact direct des animaux avec les déchets. La première étape d'aménagement d'une décharge est le choix d'un site approprié. Cette étape est très sensible et il faut choisir le site d'une manière pertinente pour éviter tous les risques de pollution et d'atteinte de la santé humaine. Pour choisir un site convenable pour une décharge, plusieurs méthodes sont utilisées en se basant sur les systèmes d'informations géographique (SIG) combinés aux méthodes d'analyse multicritère (AMC) (GTZ 2002). L'analyse multicritère reste la méthode la plus utilisée pour l'aide à la décision dans le choix du site (Eriksson et al. 2005; Jiang et Eastman 2000 ; Malczewski, 2006; Pece et al., 2012 ; Şehnaz et al., 2010).Après avoir choisi un site approprié, vient par la suite l'étape d'aménagement proprement dit. Les casiers sont creusés avec l'installation d'une géo-membrane, des collecteurs de lixiviats et de gravier. Un bassin de réception des lixiviats est construit en aval des casiers pour récupérer les effluents générés qui seront traités par la suite. Une clôture est construite pour empêcher l'entrée des animaux à la décharge. Une fois toutes les composantes sont construites, la phase d'exploitation aura lieu. Les déchets sont déposés dans les casiers et subissent une couverture par la terre à chaque deux mètres d'hauteur. Au fur et à mesure du remplissage des casiers, des crépines sont déposées dans des puits de dégazage afin de collecter le biogaz qui fera par la suite objet de valorisation ou de combustion dans une torchère (Shelley, 1999 ; Bidart et al., 2013). Quand les casiers sont remplis de déchets, une couche de terre végétale est utilisée pour recouvrir les déchets et y planter des végétaux afin d'intégrer le site dans le paysage et aussi pour assurer la stabilité des talus des casiers dont la hauteur peut atteindre 45m. La *figure 4* montre un schéma de différentes composantes d'un casier.

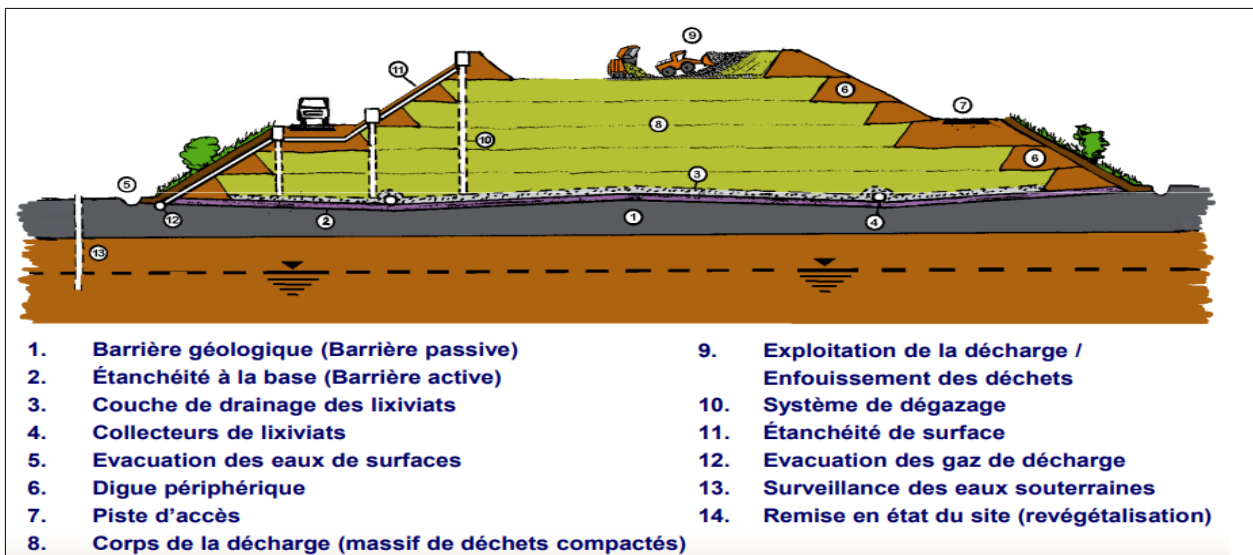


Figure 4: Schéma d'un casier d'une décharge contrôlée en cours d'exploitation

II.6 Valorisation matière des déchets

Les modes de valorisation matière les plus connus sont le compostage de la matière biodégradable et le recyclage des déchets tels que le verre, le plastique, les métaux,...

II.6.1 Compostage des déchets

Sur le long terme, la mise en décharge ne peut être considérée comme une solution durable. Un jour ou l'autre, face à la pression foncière, à l'inacceptabilité sociale ou l'évolution des exigences d'équipement ou d'exploitation des décharges, leur usage devra être réduit au strict minimum et les filières de recyclage des déchets organiques seront parmi les premières solutions de détournement des quantités mises en décharge. Le compostage est une technique classique de gestion des déchets biodégradables, il est utilisé largement dans les PD. Le compostage dans les PED (Maroc, Tunisie, Thailand, Indonésie,...) subi souvent des dysfonctionnements liés généralement aux odeurs, défaillance du matériels et la qualité du produit (Hafid, 2002; Benani, 1987; Pereira-Neto, 2001; Sogreah, 2001)

Le compostage des déchets organiques mise en décharge peut avoir plusieurs avantages comme la réduction des gaz à effet de serre (USEPA, 2015), la réduction de la quantité des lixiviats générés par l'enfouissement des déchets fermentescibles (Adhikari et al., 2009) et il améliore la valeur énergétique des déchets incinérables, car l'humidité a une influence sur le pouvoir calorifique des ordures (Zhou et al., 2014). Le compostage a d'autres avantages comme l'amélioration de la structure du sol, apport des nutriments pour les plantes, augmente la capacité de rétention des sols et minimise l'utilisation des engrais chimiques polluants (Chen et al., 2015; Hernández et al.,2015; Jordao et al., 2006).

II.6.2 Recyclage des déchets

Faisant partie des modes de gestion durable des déchets, le recyclage est une activité qui a des avantages environnementaux, sanitaires et socio-économiques. Le recyclage dans les PED reste très faible par rapport aux PD, par exemple en Brésil, moins de 12% des matières potentiellement recyclables sont collectées, 11% en Russie, 20% en Chine et 10% en Afrique du Sud. En revanche, le taux de recyclage en Italie est de 43% et 40% en France (Conke, 2018; Eurostat, 2015; Green Cape, 2015 ;Tai et al., 2011; Snytkova and Salnik, 2013).Le mode de recyclage des déchets dans les PED est informel dans la majorité des pays, les récupérateurs fouillent les ordures, renversent parfois les conteneurs afin de récupérer les fractions recyclables (Hoornweg and Bhada-Tata, 2012).

II.7 Valorisation énergétique des déchets

En outre de la matière contenue dans les déchets, on peut en extraire aussi de l'énergie par différentes technologies.

II.7.1 Incinération

L'incinération est une technique de valorisation énergétique des déchets, le choix de cette technologie dépend des caractéristiques des ordures (Rajaeifar et al., 2017). En effet, l'incinérabilité d'un déchet

est déterminée par le diagramme de Tanner ([Tanner, 1965](#)) qui est l'un des graphiques les plus anciens, mais toujours utilisé. Le diagramme de Tanner (*figure 5*) est un diagramme triangulaire avec trois axes présentant l'humidité, le taux des cendres et les matières combustibles. En plus de la réduction du volume des déchets, l'incinération permet de récupérer 65 à 80% de l'énergie contenue dans la matière organique sous forme thermique ([Kathirvale et al. 2003](#),[Chakraborty et al., 2015](#)). Le produit final de l'incinération est un gaz chaud composé essentiellement de l'Azote N₂, de dioxyde de carbone CO₂ et des matériaux non combustibles ([Tan et al., 2015](#)). Pour faire face aux émissions gazeuses issues de l'incinération, des filtres sont installés dans les cheminés des incinérateurs, ainsi, les scories peuvent être mélangés avec les cendres générés et sont utilisés dans le génie civil pour le revêtement des routes ou la substitution du ciment ([Arena, 2015](#)). Les avantages et les inconvénients de l'incinération sont présentés dans le *tableau 5*.

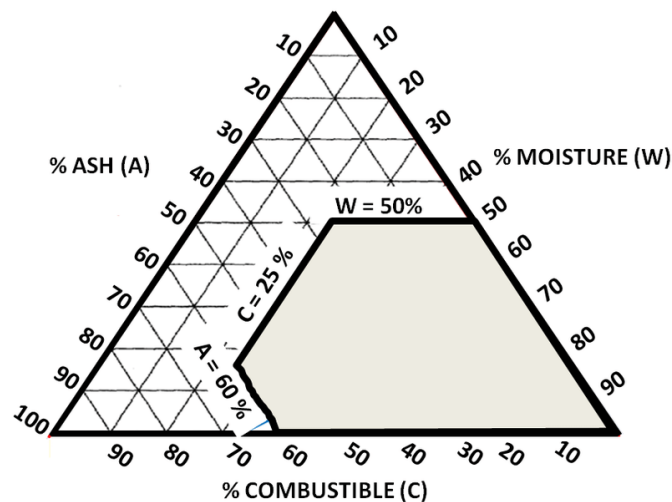


Figure 5: Le diagramme traditionnel utilisé pour évaluer la combustibilité (zone ombrée) des déchets ménagers lors de l'incinération ([Tanner, 1965](#))

À ce jour, environ 1179 incinérateurs des déchets ménagers sont installés dans le monde avec une capacité totale de 700 000 tonnes par jour ([Lu et al., 2017](#)). Actuellement, la plupart des usines sont situées dans l'UE, les États-Unis et l'Asie de l'Est ([Lu et al., 2017](#)). En revanche, les incinérateurs utilisés dans quelques pays en Afrique et en Amérique Latine sont utilisés pour traiter les déchets médicaux sans aucune valorisation énergétique ([Scarlat et al., 2015](#)).

II.7.2 Pyrolyse

La pyrolyse est un traitement thermique permettant de récupérer 80% de l'énergie contenue dans les déchets carbonés ([Hogg, 2007](#)). Elle consiste à chauffer les déchets à une température comprise entre 350 et 650 °C en absence d'oxygène. Le produit final est constitué principalement d'un gaz combustible, un mélange d'hydrocarbure sous forme liquide et coke ou le bio char qui est solide. La proportion des états liquide, solide et gazeux dépend de la composition initiale des déchets, la

pression, la température, le temps de séjour, etc. Différent types des réacteurs sont utilisés et le principal est le réacteur de pyrolyse à deux étages dont la température dans la première chambre est très lente par contre la température est très élevée dans la deuxième chambre pour assurer la combustion de la totalité des déchets. Après avoir purifié le produit obtenu, il est mélangé avec le carburant à essence (Chen et al., 2014). Le nombre total des projets de pyrolyse a connu une évolution dans le monde d'où le nombre a passé de 391 en 2014 à 747 en 2017. Ce procédé est rentable de point de vue économique et minimise les impacts environnementaux par la minimisation des tonnages des déchets envoyés en décharges et la garantie d'une énergie considérée comme durable, etc. (Higman et Tam, 2014). Les tubes des métaux utilisés dans la pyrolyse subissent la corrosion par l'utilisation continue. De ce fait, le remplacement de ces derniers réduit l'efficacité globale du procédé (Lal et Reddy, 2005). Les avantages et les inconvénients de cette technologie sont montrés dans le *tableau 5*. Ce mode de traitement n'est pas utilisé dans les PED à cause des frais d'investissement élevés.

II.7.3 Gazéification

La gazéification des déchets est une combustion dans un milieu réduit en oxygène. La température, la pression et la concentration en O₂ sont les principaux paramètres qui affectent le processus de gazéification (Arena et Gregorio, 2014). Le gaz synthétisé produit est un mélange de monoxyde de carbone CO, hydrogène H₂ et le CO₂ qui peuvent être utilisés directement dans les turbines pour produire l'électricité. Une étude réalisée par Simbeck et Johnson (2001) a montré que l'Asie a le grand marché dans ce processus avec 29 unités en Chine et 3 en USA en 2001. Les principaux avantages et inconvénients de la gazéification sont présentés dans le *tableau 5*. La génération de l'énergie potentielle par ce processus est estimée entre 20 et 26 KW par tonne des déchets ménagers (Li et Hu, 2010). En outre, la gazéification peut réduire le volume des déchets de 50 à 90 % et conserver 1,9-3,8 MW par tonne des déchets quand on la compare avec l'enfouissement.

II.7.4 Méthanisation

La bio-méthanisation est une conversion de la matière organique en milieu anaérobie en énergie et en fertilisants organiques (Chakraborty et al., 2013). Les déchets valorisés par la bio-méthanisation sont des déchets d'agro-alimentaire, déchets d'abattage, déchets agricoles, résidus des marchés des légumes et les déchets des restaurants (Gotmare et al., 2011). La méthanisation se fait en quatre étapes. La première phase de méthanisation est l'hydrolyse qui assure la conversion des macromolécules organiques en éléments simples comme la cellulose qui se transforme en sucre soluble. La deuxième étape est l'acidogénèse dont les molécules simples sont transformées en acide de faible poids moléculaire comme l'éthanol. La troisième étape est l'acétogénèse dont les bactéries réductrices acétogènes interviennent pour produire l'acétate et les bactéries sulfato-réductrices pour produire l'hydrogène sulfuré H₂S. La dernière étape est la méthanogénèse dont les bactéries méthanogènes

interviennent pour réduire l'acétate en méthane (Nizam et Murphy, 2011). L'efficacité de cette technologie est de 25-30% (Ouda et al., 2015), elle est très avantageuse pour la récupération de l'énergie. Les facteurs influençant la production du méthane sont ; l'humidité, la composition des déchets, le pH et la température (Noor et al., 2013). Les avantages et les inconvénients de cette technologie sont présentés dans le *tableau 5*.

Tableau 5: Avantages et inconvénients des principaux procédés de valorisation énergétique des déchets (Chakraborty et al., 2013 ; Chen et Hu, 2010 ; KACARE 2012 ; Lal et Reddy, 2005 ; Marie et Henrik, 2010)

Technologie	Avantages	Inconvénients
Incinération	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Réduction du volume jusqu'à 80% ; ✓ Réduction de la masse jusqu'à 70% ; ✓ Traitement de grandes quantités ; ✓ Traitement rapide. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Risque de pollution de l'air ; ✓ Formation de la dioxine ; ✓ Investissement élevé ; ✓ production des RIFIOM.
Pyrolyse	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Extraction jusqu'à 80% de l'énergie contenue dans les déchets; ✓ Produits à une valeur calorifique élevée ; ✓ Réduction du volume des déchets jusqu'à 50-90%. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Le rendement du produit liquide est faible ; ✓ Corrosion des tubes en métal; ✓ Coût d'investissement élevé; ✓ Coût d'opération et de maintenance élevé.
Gazéification	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Absence des gaz à effet de serre; ✓ Tous les déchets peuvent être utilisés. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Technologies complexes requérant du personnel qualifié; ✓ Gestion du syngaz requiert une attention particulière car il est inflammable.
Bio-méthanisation	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Faible production des refus solides ; ✓ Production d'un fertilisant de bonne qualité ; ✓ Cout raisonnable. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Présence des impuretés; ✓ Demande assez d'espace ; ✓ Nuisance des odeurs.

III Gestion des déchets au Maroc

III.1 Cadre législatif de la gestion des déchets au Maroc

La gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA) impose la connaissance des contextes juridiques et institutionnels qui concerne ce secteur. Au Maroc, le principal handicap du secteur de la gestion des DMA réside dans le contexte juridique et institutionnel relativement peu favorable, en particulier la faiblesse des moyens dont disposent les collectivités territoriales compétentes en matière d'assainissement solide et l'inadéquation des textes juridiques et réglementaires en vigueur jusqu'à présent. Malgré tous ces problèmes, le Maroc a déployé plusieurs efforts et il a lancé la loi 28-00

relative à la gestion des déchets en 2006 et le plan national de gestion des déchets ménagers (PNDM). Ainsi, la nouvelle loi organique des communes territoriales 113-14 relative à l'organisation communale, précise dans son article 83 que l'assainissement solide, la collecte des ordures ménagères et le traitement des déchets entre dans les compétences des communes.

III.2 Aperçu sur la gestion des déchets au Maroc

III.2.1 Production des déchets ménagers au Maroc

La production des DMA au Maroc ne cesse pas d'augmenter suite à l'intervention de plusieurs facteurs (population, niveau de vie, urbanisme ...). Le ratio de production des déchets en milieu urbain est de 0,76-0,78 kg/hab/jour et 0, 28-0.3 kg/hab/jour en milieu rural (Ouigmane et al., 2018; Ministère de l'environnement, 2015 ; Sweep-net, 2014). La production de déchets varie d'une région à une autre, dans la région de Rabat le ratio de production est de 0,96kg/hab/jour (Naimi et al., 2014) et dans la ville de Béni Mellal le ratio est de 0,89 kg/hab/jour (Ouigmane et al., 2017). Le *tableau 6* présente diverses données sur la génération des DMA au Maroc.

Tableau 6: Aspect quantitatif des déchets solides au Maroc

Type des déchets	Tonnage tonne/ans	Référence
Génération des DMA en milieu urbain	5 667 958	Calcul d'après HCP, 2014
Génération des DMA en milieu rural	1 371 095	Calcul d'après HCP, 2014
Génération des déchets médicaux en 2010	21 000	Sweep-net, 2014
Génération des déchets industriels	1 600 000	Sweep-net, 2014
Génération des déchets dangereux	289 385	Sweep-net, 2014

III.2.2 Composition des déchets ménagers au Maroc

La composition des déchets au Maroc se caractérise par une forte teneur en matière biodégradable avec un pourcentage qui varie en fonction des zones urbaines et rurales et qui diminue avec le temps

suite à l'amélioration du niveau de vie. La composition moyenne des DMA au Maroc est présentée dans la *figure 6*.

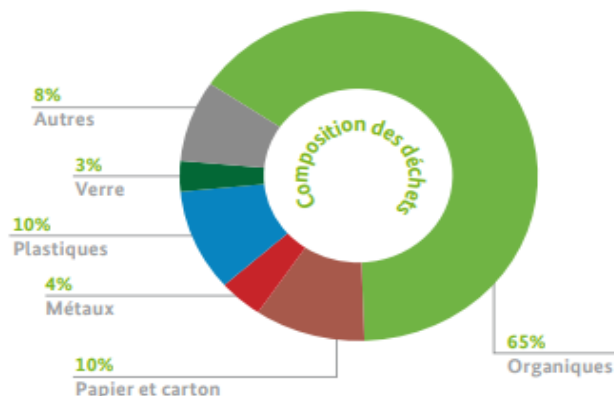


Figure 6: Composition moyenne des déchets ménagers au Maroc (Sweep-net, 2014)

III.2.3 Collecte des déchets au Maroc

Les déchets bruts générés par les ménages sont collectés par les communes, le taux de collecte a été amélioré suite aux efforts déployés afin d'exécuter les axes du PNDM. En effet, le taux de collecte en milieu urbain est de 86% en 2014 (Banque Mondiale, 2017) contre 44% en 2008 (SECDD, 2018). Le taux de collecte est en cours d'amélioration suite au professionnalisme de la collecte des déchets en déléguant le service au secteur privé. En 2013, 147 communes sont passées en mode de gestion déléguée du service de collecte et de nettoyage contre 109 communes en 2012, le nombre de contrats est passé de 33 avant 2006 à 101 contrats en 2013 (Cour des comptes, 2014).

III.2.4 Elimination des déchets au Maroc

Avant la mise en place du PNDM, presque toutes les quantités des déchets générées au Maroc sont éliminées dans les décharges sauvages sans aucun contrôle. Le pays a devenu de plus en plus sensible des impacts de la mise en décharges sauvages. De ce fait, il a lancé le PNDM afin de réhabiliter toutes les décharges sauvages et les remplacer par des décharges contrôlées ou des centres d'enfouissement et de valorisation (CEV) avec une valorisation de 20% à l'horizon de 2022. Selon SECDD, (2018) l'état d'avancement du PNDM jusqu'à Septembre 2018 est comme suit:

- ✓ La mise en CEV et décharges contrôlées a atteint 62.44 % (3,94 MT) des déchets ménagers produits, contre 10% avant 2008;
- ✓ Le nombre actuel de CEV est de 25 : Fès, Oujda, El Jadida, Essaouira, Rabat, Berkane, Figuig, Guelmim, Al Hoceima, Agadir, Nador, Dakhla, Mohammedia, Laayoune, Ifrane, Es-Smara, M'Dieq-Fnideq, Safi, Khouribga, Meknès, Ouarzazate, Marrakech, Khénifra, Tanger et Béni Mellal;

- ✓ La rehabilitation de 49 décharges non contrôlées: Salé, Témara, Oujda, Benslimane, El Jadida, Fès, Essaouira, Casablanca, Al Hoceima, Agadir, Ifrane, Azrou, Bouznika, Dakhla, Tarmigt, Sidi Moumène, Khénifra, Mrirt, Aguelmous, Mohammedia, Nador, Guelmim, El Oualidia, Tamsia, Ouled Taïma, Azilal, Akkreuch, M'dieq, Fnideq, Errachidia, Ouarzazate, Marrakech, Sidi Allal Bahraoui, Guercif, Jerrada, Laayoune, El Ouatia, Moulay Bouselhame, Missouri, Mehdiya, Tata, Akka, Foulahcen, Foulzguid, Oued Nachef, Ben Taïb, Kelaa Sraghna, Jabha et Souk Larbaa AL Gharb.

III.3 Coût de dégradation de l'environnement lié la gestion des déchets au Maroc

La détérioration de l'environnement ne se limite pas dans les dégâts sur la santé et sur les écosystèmes, mais elle peut affecter l'économie d'un pays.

III.3.1 Coût de dégradation de l'environnement

Les efforts qu'a déployé le Royaume les dernières années ont permis d'améliorer la situation du secteur de l'environnement, ce qui est prouvé par les résultats des études du coût de dégradation de l'environnement au Maroc en 2000 et 2014. Ces études ont été réalisées par la banque mondiale et elles ont montré une baisse de 20% de ce coût en 14 ans. En effet, le coût de dégradation de l'environnement est passé de 590 DH/habitant en 2000 à 450 DH/habitant en 2014 (Banque Mondiale 2017). En 2014, la valeur de dégradation de l'environnement est de 32,5 milliards de dirhams soit 3,52 % du PIB. Pour aboutir à ce chiffre, la Banque Mondiale a calculé les prix de dégradation de plusieurs composantes du volet environnemental à savoir ; l'eau, le sol, les forêts, l'air, les déchets, le littoral et les changements climatiques. Le graphique de la *figure 7* montre la comparaison entre les coûts de dégradations des différentes composantes de l'environnement en 2000 et 2014 au Maroc.

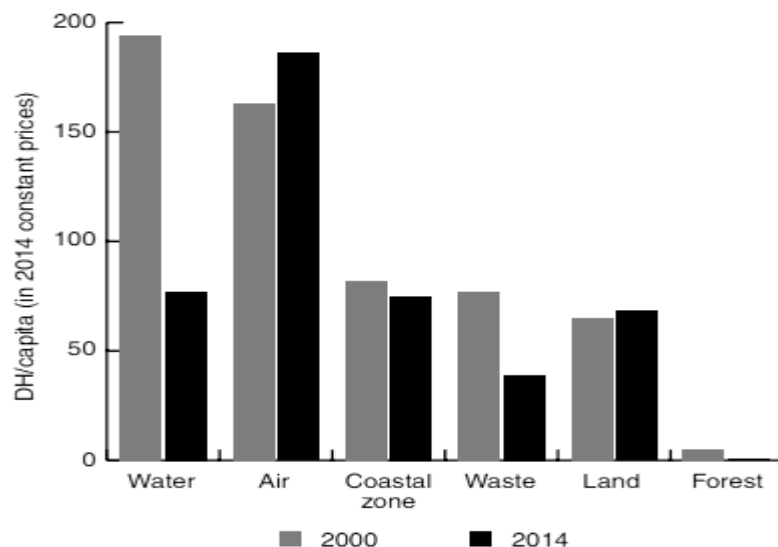


Figure 7: Comparaison du coût de dégradation de l'environnement en 2000 et en 2014 au Maroc (Banque Mondiale 2017)

III.3.1 Coût de dégradation lié à la gestion des déchets

Dans le rapport élaboré par la Banque Mondiale, cinq paramètres ont été pris en considération pour évaluer le coût de dégradation en termes de déchets. Le premier est la non couverture par le service de collecte des déchets de 20% de la population ce qui peut générer des impacts sanitaires sur la population dont les coûts de traitement sont élevés (Sherif et Doumani, 2014). Le deuxième paramètre est le coût de pollution des eaux souterraines par les lixiviats des déchets. Pour ce faire, le taux d'enfouissement en décharge contrôlée est pris en considération avec un taux d'infiltration de 10% et la prise en considération que 1 m³ de lixiviat pollue 50 m³ des eaux souterraines. Le coût calculé pour ce paramètre est celui de la dépollution des eaux pour des fins agricoles. Le troisième paramètre utilisé pour le calcul de la dégradation est la moins-value des terrains. En effet, deux rayons entourant la décharge sont pris en compte, le premier est un rayon de 30 m aux alentours de la décharge et le deuxième entre 30 et 100 m. Dans ces zones la valeur d'achat des terrains baisse. Le quatrième paramètre est le potentiel de l'électricité perdu par l'enfouissement des déchets sans aucune valorisation. Le dernier paramètre est le gain perdu par les matières susceptibles d'être recyclées et qui sont perdues dans les décharges sans aucune valorisation. Le *tableau 7* récapitule les coûts de dégradation liés au secteur de gestion des déchets au Maroc qui atteint 0,26% du PIB.

Tableau 7: Détails des coûts relatifs à la dégradation de l'environnement par le secteur des déchets (Banque Mondiale, 2017)

Déchets ménagers et assimilés	Coût moyen (Million DH)
Domage	
Coût de la non-couverture de la population par la collecte	1118
Coût de la pollution des eaux souterraines	195
Moins-value des terrains à proximité des décharges/dépotoirs	19
Pertes d'opportunités	
Potentiel d'électricité perdu	848
Potentiel de recyclage perdu	204
Total en Million DH	2 384
% PIB	0,26

I Généralités sur le RDF

Le RDF en anglais (Refuse Derived Fuel) en français les CDD (Combustibles Dérivés des Déchets), dans ce manuscrit nous allons utiliser l'abréviation RDF au lieu de CDD puisqu'elle est plus répandue même dans les ouvrages en français. La nomination de RDF a été introduite au hasard par Dr. Jerome Collins en 1973 lors de la discussion d'un projet de classification des DMA en Amérique ([Alter, 1983](#)). En effet, le RDF est un alternatif ou substituant des combustibles fossiles, il est produit à partir des DMA, des déchets commerciaux et des déchets industriels non dangereux. Les matériaux non combustibles comme le verre et les métaux sont éliminés, les fractions des DMA utilisées pour la préparation des RDF sont principalement les fractions à haut pouvoir calorifique (carton, papier, plastiques, textile, etc.). le RDF produit est utilisé comme source d'énergie thermique ou électrique ([Gendebien et al., 2003](#) ; [Kara, 2012](#); [Nabeshima, 1996](#); [Ouda et al., 2016](#); [Vounatsos et al., 2014](#)). L'utilisation de RDF a montré plusieurs avantages répondants aux exigences du développement durable (économique, environnementale et sociale). La société américaine d'essais et de matériaux (ASTM) a classé les RDF en 7 catégories comme il est montré dans le *tableau 8* ([Alter, 1987](#)).

Tableau 8: Classification des RDF selon ASTM ([Alter, 1987](#))

Classe	Forme	description
RDF 1 (DMA)	Brut	DMA avec un traitement minimal pour éliminer les déchets encombrants
RDF 2 (c-RDF)	Grossier	DMA traités de tels sorte d'avoir des tailles de particules grossières avec ou sans séparation des métaux ferreux
RDF 3 (f-RDF)	Peluche	Fractions combustibles déchiquetées provenant de DMA avec l'élimination du métal, du verre et autres substances inorganiques; la taille granulométrique maximal est de 5 cm
RDF 4 (p-RDF)	Poudre	Fractions de déchets combustibles transformées en poudre
RDF 5 (d-RDF)	Densifié	Fraction de déchets combustibles comprimée en pellets, briquettes ou formes similaires
RDF 6	Liquide	Fractions combustibles des déchets transformées en combustible liquide
RDF 7	Gaz	Fractions des déchets transformées en gaz combustible

I.1 Différence entre RDF et CSR

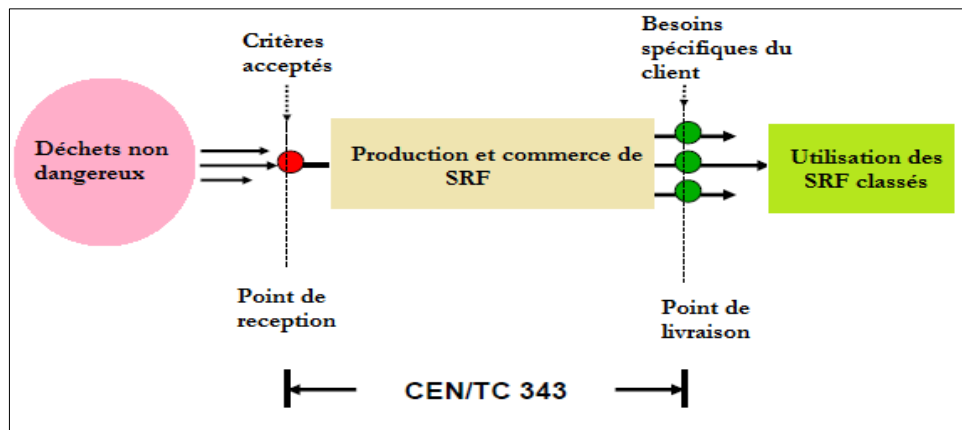


Figure 8: Normalisation européenne des combustibles solides de récupération (CSR)
(Frankenhaeuser, 2011)

I.2 Sources de RDF/CSR

Les RDF/CSR sont des fractions à haut pouvoir calorifique issues des déchets et qui peuvent être utilisés comme source d'énergie thermique ou électrique (AbuQudais et al., 2000 ; Kara, 2012 ; Chakraborty et al., 2013 ; Porteous, 2005 ; Psomopoulos et al., 2009) . Ils peuvent être produits à partir des déchets ménagers, des refus des unités de recyclage des déchets, de tri à la source, des déchets commerciaux, des refus des unités de Traitement Mécano-Biologique (TMB) et des déchets industriels non dangereux (ADEME, 2013 ; Dunnu et al., 2012 ; FNADE et le SN2E, 2015 ; Hasan et Hassan, 2015 ; Nasurllah et al., 2015 ; Punin et al., 2014 ; Rada et Andreottola, 2012 ; Rada et Raggazi, 2014 ; Sarc et Lorber, 2013). Ainsi, les RDF/ CSR peuvent être produits par le mélange de plusieurs catégories avec un pouvoir calorifique élevé (boues de STEP, les déchets d'olivier,...) (Casado et al., 2016 ; Lei et al., 2016 ; Tezanoui et al., 2005).

I.3 Production de RDF

Généralement les RDF sont des sous-produits de traitement mécano-biologique (TMB). Ainsi, des unités de traitement dédiées à la production de RDF peuvent être mises en place. La ligne de production complète de RDF est décrite dans ce paragraphe. La production de RDF s'effectue selon les étapes successives de traitement: déchiquetage, criblage, réduction de la taille, séparation, classification et séchage (Caputo et Pelagage, 2002). Le déchiquetage réduit la taille des particules de déchets, il est également utilisé pour ouvrir les sacs en plastique fermés dans le flux de déchets d'entrée (Nasurllah, 2015). Le criblage consiste à séparer les déchets en différentes catégories de taille. Dans la séparation à air, les fractions légères (plastiques, papier et carton, textile, mousses, etc.) sont séparées par un classificateur à air. La séparation magnétique sépare les métaux ferreux du flux de déchets principal. Le tri par le proche infrarouge inspecte le flux de déchets d'entrée afin de détecter quelques fractions indésirables comme le PVC. Le déchiquetage secondaire est une étape très importante pour

réduire la taille des particules du flux de déchets traités. Le séchage consiste à baisser l'humidité de RDF afin d'améliorer sa qualité, il peut se faire par évaporation ou bio-séchage (Velis et al., 2009). La séparation par courants de Foucault intervient après la séparation magnétique, elle sépare les métaux non ferreux du flux des déchets, et le déchetage secondaire rend les déchets plus homogènes et plus fins.

I.4 Management de la qualité RDF / CSR

I.4.1 Importance du management de la qualité des RDF/CSR

Le management de la qualité des RDF joue un rôle important, notamment en instaurant une confiance entre les fournisseurs, les utilisateurs finals et les organismes de réglementation (Eckardt et Alberts, 2003). Les systèmes de management de la qualité comprennent: la planification de la qualité, l'assurance de la qualité et le contrôle de la qualité. En Europe, le management de qualité (MQ) pour le cas des CSR est assuré par le CEN (European Committee for Standardisation 1, 2006). L'assurance qualité (AQ) couvre l'ensemble des exigences du client, y compris la qualité des performances de l'organisation (documentation, calendrier, logistique et utilisation appropriée des équipements) et la qualité des produits. Les exigences relatives aux produits peuvent être spécifiées par: l'organisme de réglementation, des institutions, des associations ou des clients spécifiques.

La normalisation, à savoir le développement des classes et des spécifications pour les caractéristiques des produits sur la base duquel les combustibles peuvent être contrôlés est une étape importante de l'AQ. La confiance dans les marchés des produits dérivés des déchets est liée à la mise en place des normes avec un contrôle de qualité adéquat. Par exemple en Bretagne, le "Compost Quality Protocol" (Environment Agency, 2007) encourage les utilisateurs du compost à utiliser ce produit dans l'agriculture. Selon le CEN (European Committee for Standardisation 2, 2006), les normes européennes pour les CSR pourraient potentiellement garantir la qualité des combustibles pour les producteurs d'énergie, ce qui pourrait rendre le commerce de CSR plus active et accroître la confiance du public.

Les possibilités de commercialisation des RDF / CSR produits par les TMB dépendent en grande partie de la mise en œuvre des systèmes d'AQ / CQ, en particulier compte tenu des défis techniques, financiers, politiques et législatifs plus vastes (Garc et al., 2007 ; Greiner, 2007; Beckman et al., 2006). Le RDF / CSR devrait faire face à une concurrence féroce des combustibles fossiles classiques et d'autres combustibles de substitution (les boues des STEP, les pneus et le caoutchouc usés, les huiles et solvants usés, les déchets de bois, la biomasse, ...) (Juniper, 2005 ; Beckman et al., 2006).

I.4.2 Normes et assurances de qualité de RDF/CSR

Des systèmes d'AQ/CQ des RDF existent déjà et de nouveaux sont en cours de développement. Dans les années 1980, la Société américaine pour les essais et les matériaux (ASTM) a défini les classes de RDF en fonction de la forme du produit final et du type de processus de production (ASTM 1985 ; Alter, 1987). En Europe, la norme européenne EN 15358 (2011) a établi les prescriptions applicables à un système de management de la qualité pour la production et le commerce des combustibles solides de récupération (CSR) de la réception des déchets à la livraison.

I.4.3 Classification et spécification des CSR par le CEN

Le développement de la norme Européenne CEN relative au CSR a été adapté aux exigences techniques et législatives du client comme le respect des limites d'émission de la directive sur l'incinération des déchets (European Council, 2000). Le tableau 9 résume les classes de qualité de CSR déterminées par la norme Européenne. Les codes de classe (de 1 à 5), définis par des valeurs limitent sans chevauchement (c'est-à-dire des intervalles fermés), de trois paramètres caractérisant un CSR (Ciceri et Martignon; 2015). Le premier paramètre est le pouvoir calorifique inférieure (PCI) (paramètre économique), les chlorures (paramètre technique) et le mercure (Hg) (paramètre environnemental). Chaque paramètre doit être déterminé selon des plans d'échantillonnage spécifiés, comprenant la préparation de l'échantillon et les techniques d'analyse. Tout paramètre peut appartenir à cinq classes. Un numéro de classe est attribué au CSR pour chaque paramètre et la combinaison des trois numéros de classe définit son code.

Tableau 9: Code de classification des CSR établie par CEN 345

Caractéristique de classification	de Paramètre de classification	de Unité	Mesure statistique	Classes				
Economique	Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	MJ/kg	Moyenne	1 ≥25	2 ≥20	3 ≥15	4 ≥10	5 ≥3
Technologique	Chlore (Cl) cause la corrosion de matériaux	% (sec)	Moyenne	1 ≤0,02	2 ≤0,06	3 ≤1,0	4 ≤1,5	5 ≤3,0
Environnementale	Mercure (Hg) est cancérigène	mg/Mj	Valeur Médiane Percentile 80	1 ≤0,02 ≤0,04	2 ≤0,03 ≤0,06	3 ≤0,08 ≤0,16	4 ≤0,15 ≤0,30	5 ≤0,3 ≤0,6

Quatre autres paramètres clés des CSR ont été proposés, mais n'ont pas été inclus dans le schéma final de classification pour des raisons de simplicité. Ce sont la teneur en cendres (% sec), la teneur en humidité (%) et la somme des métaux lourds (mg/ kg) ([European Commite for Standardisation 3, 2006](#) ; [Van Tubergen et al. 2005](#)). La valeur totale de cadmium (Cd) plus thallium (Tl) (Cd + Tl) a également été proposée comme indicateur environnemental important. Dans le projet final du CEN, le paramètre (Cd + Tl) a été rejeté parce que seul le mercure peut refléter l'aspect environnemental du CSR.

I.4.4 Normes de qualité des produits de CSR pour des utilisations finales

Les codes de classe sont un outil pour identifier et présélectionner un CSR en donnant une image immédiate. Cependant, les codes de classe ne peuvent pas prédire les performances réelles d'un CSR. Chaque installation utilisant les CSR a ces caractéristiques techniques particulières et elle détermine les exigences légales et les valeurs limites qui correspondent à son processus. [Beckmann et Thomé-Kozmiensky, \(2006\)](#) ont souligné qu'une utilisation efficace dans des applications variées exige la détermination d'une liste plus complète des propriétés des combustibles (*tableau 10*).

Tableau 10: Propriétés permettant une caractérisation suffisante des RDF/CSR conformément aux spécifications d'utilisation finale ([Beckman et Thomé-Kozmiensky. 2006](#))

Catégorie de propriété	Propriété
Chimique	Composition en matières combustibles; Teneur en matière non combustible (teneur en cendres et en humidité); Composition élémentaire C H N O; Métaux lourds; Eléments majeurs ; Composés volatils.
Mécanique	Densité des matières combustibles et non combustibles; Propriétés des solides en vrac (densité apparente et fluidité); La broyabilité; La taille granulométrique; Propriétés de stockage (stabilité biologique, désinfection).
Calorifique	Pouvoir calorifique; Exigence d'air minimum spécifique; Exigence minimale spécifique de gaz de combustion; Température de combustion adiabatique; Capacité thermique et conductivité thermique.

Réaction cinétique	Comportement à la combustion; Potentiel de corrosion; La volatilisation.
--------------------	--

II CARACTERISATION DES RDF/CSR

II.1 Paramètres de caractérisation de RDF/CSR

La qualité d'un RDF dépend de la composition en fractions combustibles. Plusieurs paramètres de caractérisation sont déterminés comme le pouvoir calorifique inférieure (PCI), l'humidité, le taux du cendre, les chlorures, les métaux lourds et la composition élémentaire.

II.1.1 *Pouvoir calorifique*

II.1.1.1 *Définition*

Le pouvoir calorifique est défini empiriquement comme la quantité de chaleur dégagée lors de la combustion complète d'un combustible dans des conditions de pression et de température bien définies. Le pouvoir calorifique peut être déterminé directement par des méthodes calorimétriques ou indirectement calculé par des méthodes empiriques. On distingue le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieure (PCI). Le PCI correspond à la quantité d'énergie thermique utilisable, libérée par l'oxydation complète d'une unité de volume (Nm^3) et/ou de masse du déchet. L'eau formée, par la libération de l'humidité initiale du déchet et/ou par la recombinaison de son hydrogène élémentaire, étant supposée vaporisée et non condensée ultérieurement (chaleur perdue). La valeur du PCI dépend de la composition des déchets en matières sèches incinérables ([Henri, 2000](#)).

II.1.1.2 *Méthode de détermination du PCI des déchets*

II.1.1.2.1 Méthodes expérimentales

La méthode calorimétrique est la plus utilisée pour déterminer le contenu énergétique des DMA ([Harker et Backhurst, 1981](#)). Soit on utilise un calorimètre ouvert dans lequel la pression est maintenue à 1atmosphère. Dans des conditions de pression constante, la chaleur dégagée est égale à l'enthalpie de la réaction. Soit on utilise un calorimètre à bombe (*figure 9*) dans lequel la combustion est effectuée dans des conditions de volume constant en présence d'oxygène pur ([CEN/TS, 15400](#)).



Figure 9: Photo d'une bombe calorimétrique (Melhyas, 2015)

II.1.1.2.2 Modèles empiriques

En ce qui concerne les méthodes empiriques, la valeur de PCI peut être déterminée en fonction de la composition physique des déchets, de la composition élémentaire ou des analyses approximatives (Liu et al., 1996). L'analyse de la composition physique est basée sur la composition des déchets en fractions comme les plastiques, le papier et les déchets putrescibles. L'analyse élémentaire implique généralement la détermination des teneurs en Carbone, en Oxygène, en Azote et en Soufre, tandis que l'analyse approximative tient en compte le taux d'humidité des déchets, le taux des cendres et le Carbone organique. Le *tableau 11* présente quelques modèles couramment utilisés pour prédire le contenu énergétique des déchets solides

Tableau 11: Différents modèles utilisés pour la détermination du pouvoir calorifique des déchets (Abu-Qudais et al., 2000 ; Kathiravale et al., 2003 ; Khan et al. 1991 ; Lie et a. 1996 ; Morau, 2006)

Composition physique	Composition élémentaire	Analyse approximative
Le modèle conventionnel	Le modèle de Dulong	Le modèle traditionnel
$PCI (Kcal/Kg) = 88,2 R + 40,5 (G+P) - 6W$	$PCI = 81C + 342,5 (H-O/8) + 22,5S - 6(9H - W)$	$PCI = 45B - 6W$
D'où:	Le modèle de Chang	D'où
R: Pourcentage massique sec de plastique;	$PCI = 8561,11 + 179,72H - 63,89S + 111,17 O - 91,11C - 66,94N$	B : Matière combustible volatile
G : Pourcentage massique sec d'ordures;	Le modèle de Scheurer-Kestner	W : Humidité %
P : Pourcentage massique sec de papier;	$PCI = 81(C - 3/4O) + 342,5H + 22,5S + 57(3/4O) - 6(9H - W)$	Le modèle de Bento
W: Humidité des déchets en pourcentage	Le modèle de Steuer	$PCI = 44,75B - 5,85W + 21,2$
	$PCI = 81(C - 3/8O) + 57(3/8O) + 345(H -$	modèle de Khan
	$PCI = 81(C - 3/8O) + 57(3/8O) + 345(H -$	$PCI = PCS - 6(W + 9H) (Kcal/kg)$

$$O/10)+25S - (9H-W)$$

Le modèle de Vondracek

$$PCS=[328,9 + 11,7(100-C)0,25].C+899,7.(H-0,1.O)+104,6.S \text{ (KJ / kg)}$$

C : Pourcentage en Carbone ; H : Pourcentage en Hydrogène ; O : Pourcentage en Oxygène ; S : Pourcentage en Soufre W : l'humidité

II.1.2 Humidité

L'humidité est un paramètre déterminant de la qualité d'un RDF/CSR, la teneur élevée en eau défavorise leur utilisation dans la co-incinération. Dans ce propos, la détermination de l'humidité est primordiale. Le pourcentage d'humidité des échantillons des déchets peut être déterminé en pesant 100g d'échantillon. Après, l'échantillon est séché dans un four à 105°C. Le pourcentage d'humidité est calculé à la base de la formule suivante.

$$\text{Humidité (\%)} = [(Masse humide - masse sèche) / Masse humide] * 100$$

II.1.3 Taux du cendre

La teneur en matières volatiles se mesure par la calcination de l'échantillon de déchet à 550°C pendant 24 heures. Après, l'échantillon est pesé à nouveau pour déduire la teneur en matière volatile qui se calcule par la différence du poids initial et du poids des cendres générées.

II.1.4 Métaux lourds

Les métaux lourds sont des polluants chimiques inorganiques et peuvent être présentés sous forme ionique ou moléculaire. En raison de l'activité humaine normale, les métaux lourds sont présents dans de nombreux types de déchets solides produits par le secteur industriel et à une concentration plus faible dans les déchets ménagers. Les métaux lourds peuvent être trouvés dans les cendres volantes ou résiduelles lors de l'incinération ou la co-incinération des déchets, la concentration des ML dépend de la composition initiale des ordures (Chang et al. 1998). De ce fait, la détermination des métaux lourds pour un RDF/ CSR est importante et exigeante. Pour déterminer les concentrations des métaux, l'échantillon subit une digestion par acide à haut température, après les concentrations sont mesurées à l'aide de spectroscopie d'absorption atomique.

II.1.5 Composition élémentaire

La composition élémentaire consiste à déterminer le pourcentage en Carbone, Hydrogène, Soufre, Oxygène et Azote dans le déchet afin de confirmer les valeurs calorifiques trouvées expérimentalement. Le Chlore est déterminé car ce paramètre est très important vis-à-vis la corrosion du matériel.

II.1.6 Récapitulatif

La caractérisation des RDF/ CSR est une étape importante. Les résultats des analyses sont la base de toutes études techniques, économiques et environnementales. Les normes utilisées pour caractériser les RDF/CSR sont données dans le *tableau 12*.

Tableau 12: Série des normes utilisées pour caractériser les CSR

Le paramètre	La norme
Le PCI	EN 15400 (2011)
Les métaux lourds	EN 15411 (2011)
Les chlorures	EN 15408(2011)
Le taux des cendres	EN 150403(2011)
La composition élémentaire H, C, O, S	EN 15407(2011)

II.2 Caractérisation des RDF dans divers pays

L'avantage et l'intérêt de la conversion des déchets en énergie thermique ou électrique a poussé les chercheurs pour faire des études dans le but de développer la filière de production de RDF (AbuQudais et al., 2000 ; Chakraborty et al., 2013 ; Kara, 2012 ; Porteous, 2005 ; Psomopoulos et al., 2009). L'objectif de cette analyse bibliographique est de mettre un coup d'œil sur les caractéristiques et les qualités des combustibles solides de récupération dans des différentes études faites en quelques pays dans le monde. Les résultats de caractérisation des RDF/ CSR dans différents pays seront analysés afin de visualiser l'influence de la composition en fractions et autres substituant sur la qualité du combustible alternatif.

II.2.1 Présentation des études

Dans le cadre de cette étude analytique, les résultats de divers articles scientifiques ont été analysés. Plusieurs pays du monde ont été choisis pour cette analyse (Espagne, Malte, Turquie, Slovénie, Singapour, Jordanie et Burkina-Faso). Les études qui font l'objet de cette analyse sont présentées dans le *tableau 13*. Chaque combinaison est symbolisée par la lettre W suivi d'un chiffre d'ordre.

Tableau 13: Les études choisies pour une analyse comparative des caractéristiques des RDF dans le monde

Pays	Source et/ou composition du RDF	Symbole	Auteur
Jordanie	Déchets biodégradables	W1	Abu Qudais et al., 2000
	Carton et papier	W2	
	Plastiques	W3	
Burkina-Faso (Ouagadougou)	54 % de bois 25% Carton 19% PET 3% PA	W4	Teznaoui et al., 2005
Espagne	Déchets ménagers	W5	Montejo et al., 2011

	RDF issus de TMB	W6	
Malta	Déchets ménagers	W7	Pirota et al., 2013
Türkiye	RDF (66% textiles, 17% papier, 17 % plastiques)	W8	Kara, 2012
Slovenija	Boues de STEP	W9	Urbancl et al.,2016
	Déchets de voitures en ferraille (65% Plastique, Eponge 11,74% textiles 23,26%)	W10	
Espagne	Emballage (Emballage 43,3% Sacs en plastique 15,68%, cellulose 17%, Textiles 24,03%)	W11	Garcés et al.2016
	Déchets encombrants (Eponge17, 31%, Cellulose 52,36%, textiles 26,52%, plastiques 7,62%)	W12	
	RDF d'un TMB	W13	
Espagne (Navarra)	RDF des déchets d'emballage	W14	Casado et al.,2016
	Déchets de la taille d'olive	W15	
	RDF A: d'un centre de valorisation de matière	W16	
Turquie			Sever et al., 2016
	RDF B: d'un centre de valorisation de matière	W17	
	SG RDF (42,1%plastiques, 41,2% papier et cartonne 7% Textile, 9,6 % déchets d'horticulture)	W18	
Singapore	SGCM (24% Plastiques, 23% papier et carton, 4% textile 5,5% déchets d'horticulture), 19,5% biomasse, 23,5% fumier de poulet)	W19	Lie et al., 2016
	SGLF (24% plastique, 23,5% Papier et carton, 4% textile, 5,5% Déchets d'horticulture, 19,5% biomass, 23,5% déchets extrait d'une décharge)	W20	

D'après le *tableau 13*, on remarque que la composition des déchets se diffère d'une étude à une autre, les sources des RDF sont soit des refus des unités de TMB, les déchets ménagers bruts sans aucun tri, les boues de STEP ou bien le mélange d'autres substituions comme le fumier de volailles ou les déchets d'horticultures.

II.2.2 Paramètres caractérisant un RDF

Plusieurs paramètres chimiques ou physico-chimiques peuvent être déterminés afin de caractériser les combustibles solides de récupération, ainsi le choix de tel ou tel paramètre dépend de l'objectif de chaque étude et de la disponibilité du matériel de mesure. En effet, la détermination de quelques éléments peut aider à faire face à certains problèmes à la source, le fait de trouver les taux élevés en mercure est lié à la présence des batteries et des lampes dans le RDF et l'existence des chlorures est liée principalement à la présence du PVC (Velis et al., 2012 et Vounatsos et al., 2014) ce qui rend nécessaire la réalisation d'un tri efficace en amont de l'unité de production de RDF. Dans d'autres études, on peut trouver d'autres paramètres supplémentaires de caractérisation des RDF comme les métaux majeurs (Nasurllah et al., 2015).

II.2.3 Comparaison des caractéristiques des divers RDF

II.2.3.1 Pouvoir calorifique inférieur et humidité

La valeur économique d'un RDF est déterminée grâce au PCI, ce dernier renseigne sur la faisabilité économique de l'utilisation des combustibles dérivés des déchets pour la production de l'énergie, une valeur élevée en PCI renseigne sur un RDF de bonne qualité de point de vue économique. Dans l'autre partie, l'humidité élevée des déchets défavorise l'utilisation des déchets comme combustibles de substitution, ce paramètre a une influence sur la valeur de PCI. Le *tableau 14* récapitule les résultats des deux paramètres trouvés par les auteurs.

Tableau 14: Valeurs de l'humidité et du PCI des RDF de différentes études

Symbole de RDF	PCI (MJ/kg)	Humidité (%)	Rapport H/PCI	Auteur
W1	4,53	68,30	15,09	
W2	11,47	7,50	0,65	Abu Qudais et al., 2000
W3	27,59	2,75	0,10	
W5	8,33	46,46	5,58	Montejo et al., 2011
W6	16,66	22,07	1,32	
W7	8,73	40,20	4,60	Pirotta et al., 2013
W8	14,49	-	-	Kara 2012
W9	7,16	60,00	8,38	Urbancl et al.,2016
W10	32,01	4,16	0,13	
W11	25,36	4,29	0,17	Garcés et al., 2016
W12	20,07	5,63	0,28	
W13	17,70	21,20	1,20	
W14	13,57	22,20	1,64	Casado et al., 2016

W15	16,19	7,20	0,44	
W16	22,14	1,60	0,07	Sever et al.,2016
W17	19,23	14,80	0,77	
W18	23,70	7,80	0,33	
W19	16,10	22,70	1,41	Lie et al.,2016
W20	17,60	23,80	1,35	

Pour mettre en évidence la relation entre le PCI et le taux d'humidité, on a pris un rapport humidité/PCI, vu que les deux paramètres influencent l'incinérabilité d'un matériel. A partir du *tableau 14*, on constate une diversité dans les résultats des analyses de ces paramètres en fonction du type de RDF.

II.2.3.2 Taux du cendre et matière volatile

Le taux des cendres est la teneur en matières solides résultante de la combustion, la valeur de ce paramètre dépend de la composition des déchets à incinérés. Le *tableau 15* présente les résultats de la matière volatile sèche et le taux des cendres trouvés dans les études analysées.

Tableau 15: Résultats de l'analyse de la matière sèche et du taux des cendres

Symbole	matière volatile sèche MVS (%)	Taux des cendres (%)	Auteur
W1	88,34	-	
W2	83,65	-	Abu Qudais et al., 2000
W3	78,50	-	
W6	-	15,95	Pirotta et al.,2013
W8	0,923	7,7	Kara 2012
W9	-	0,11	Urbancl et al., 2016
W10	-	10,09	
W11	-	4,285	Garcés et al., 2016
W12	-	5,625	
W13	73,7	25,7	
W14	49	42	Casado et al., 2016
W15	81,4	4,9	
W16	81,8	12,9	Sever et al.,2016
W17	68,5	14,9	

II.2.3.3 Métaux lourds

Les métaux lourds sont des indicateurs de la pollution, ils peuvent être trouvés dans la vapeur ou dans les cendres générées par l'incinération des déchets. La concentration des métaux lourds dans les diverses études est montrée dans le *tableau 16*.

Tableau 16: Taux des métaux lourds trouvés dans les différentes études

Symbole	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Auteur
W8	0,90	1,60	0,30	26,50	Kara 2012
W9	-	1,10	1,00	53,80	Danijela et al., 2016
W10	1,00	1,60	1,01	495,00	
W11	0,96	0,58	0,52	26,25	Garcés et al., 2016
W12	0,27	0,15	1,06	109,35	
W18	-	0,05	-	5,90	
W19	-	0,03	-	4,30	Lie et al., 2016
W20	-	0,03	-	13,00	

II.2.3.4 Composition élémentaire en C, H, N, O, S et Cl

La composition chimique des RDF est importante. En effet, les émissions gazeuses dépendent de la composition élémentaire. D'autre part, la détermination de ces éléments facilite la détermination de certains paramètres comme le PCI. Le *tableau 17* montre les résultats de la composition élémentaire pour divers études.

Tableau 17: Résultats de la composition élémentaire des RDF dans les différentes études

Symbole	Chlore (%)	H (%)	C (%)	O (%)	S (%)	N (%)	Auteur
W4	-	5,9	48,8	41,9	0,24	0,53	Teznaoui et al., 2005
W5	-	5,36	41,37	29,01	0,21	1,4	Montejo et al., 2011
W6	-	5,78	45,09	30,94	0,15	17,11	Pirota et al., 2013
W7	-	3,2	24,21	15,59	0,12	0,68	Kara 2012
W8	0,9519	-	57,5	-	0,46	-	Urbancl et al., 2016
W9	-	6,40	52,5	31,1	0,8	9,2	
W10	0,365	9,84	69,795	8,84	0,34	1,095	
W11	3,19	8,41	63,35	18,255	1,45	1,02	Garcés et al., 2016
W12	0,165	6,495	51,985	36,565	0,365	2,08	
W13	1,21	6,6	46,6	18,57	0,46	0,86	
W14	0,78	4,3	30,5	21,09	0,35	0,98	Casado et al., 2016

W15	0,03	6,2	47,1	41,06	0,07	0,64	
W16	-	5,63	44,14	36,26	-	0,97	SeverAgdag et al.,
W17	-	8,96	56,47	17,73	0,45	1,5	2016

II.2.4 Discussion des résultats

II.2.4.1 PCI et humidité

Le PCI et l'humidité sont des paramètres justifiant la faisabilité économique de l'utilisation des combustibles solides de récupération, les combinaisons des déchets ont été classées selon la valeur de PCI comme il est montré dans le *tableau 18*.

Tableau 18: Classification des RDF/CSR en fonction de la valeur de PCI

La valeur du PCI (MJ/kg)	<10	10 -20	>20
Symbole des RDF	W1, W5, W7, W9	W2, W6, W8, W13, W14, W15, W17, W19, W20	W3, W4, W10, W11, W12, W16

A partir des résultats, il est constaté que la valeur du rapport PCI/humidité peut influencer la qualité d'un RDF, plus le rapport est grand plus le RDF est de bonne qualité ce qui est le cas des déchets W3, W10, W16 et W18. En effet, le composé principal de ces catégories est le plastique, ce dernier est caractérisé par un PCI très élevé ; 22,88 MJ/kg sur humide et 30,94 MJ/kg sur sec (Henri, 2000), la variation du pourcentage du plastique dans la composition d'un RDF influence la valeur du PCI. Pour le cas de W18, le pourcentage en plastique est de 49% ce qui favorise l'atteinte de 23,7 MJ/kg alors que pour W19 et W20, la composition en plastique est respectivement 24% et 23,5% avec des valeurs de PCI de 16 et 17 MJ/kg. La même remarque a été observée pour les déchets W10, W11 et W12. D'où l'effet de la composition en plastique sur la valeur du PCI.

Le graphique dans la *figure 10* montre les résultats des échantillons et ceux du charbon (F1) et du coke de pétrole (F2).

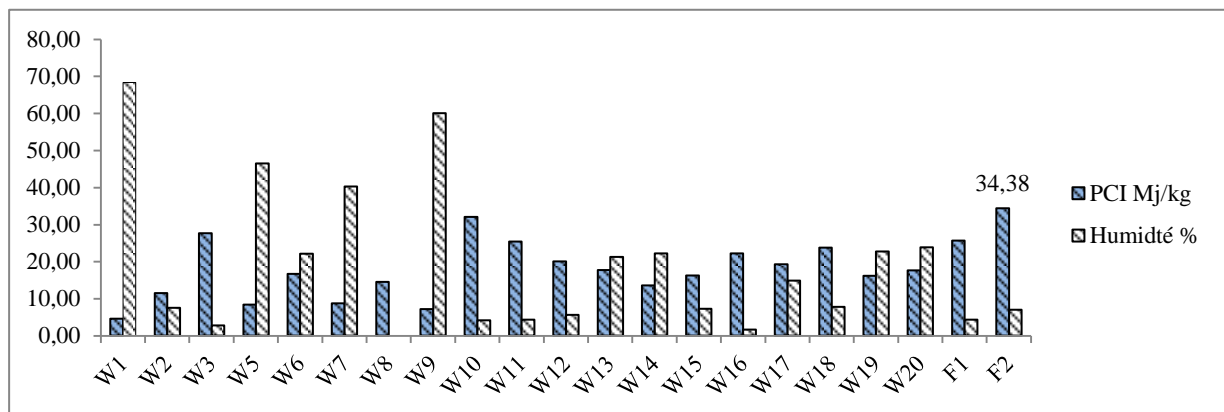


Figure 10: Comparaison des résultats de PCI et d'humidité des RDF et des combustibles fossiles

II.2.4.2 Taux des cendres

L'incinération est un traitement qui vise à diminuer le volume d'un déchet de 70% jusqu'à 90%, le reste des déchets est considéré comme cendre, ce sous-produit doit être pris en considération car il peut contenir des polluants issus de l'incinération. A partir des résultats des auteurs, on constate que les valeurs de taux des cendres varient de 0,11% pour W9 jusqu'à 42% pour W14. Le W9 est constitué totalement des boues de STEP ainsi que W15 est constitué des déchets issus de la taille d'olive avec un taux des cendres de 4,1%. Dans l'étude, de [Casado et al. \(2016\)](#), ils ont trouvé que la valeur du taux des cendres issus des rejets d'emballages est très grande 42%, ce qui peut être expliqué par l'hétérogénéité de la composition du déchet W13 (matières organiques, verres, matières plastiques, tétra-pack, métaux,...) ce qui favorise l'augmentation de la valeur du taux des cendres.

Le *tableau 19* présente la classification des déchets en fonction du taux du cendre.

Tableau 19: Classification des déchets en fonction du taux des cendres

Taux des cendres (%)	De 0 à 10%	De 10 à 20%	Supérieure à 20%
Symbole de déchets	W8, W9, W12, W15	W6, W10, W16, W17	W13, W14

- ✓ 0 à 10% : le composant principal des déchets est la biomasse qui se volatilise pendant la combustion ;
- ✓ 10 à 20% : le composant principal des déchets est le plastique ;
- ✓ Supérieure à 20% : Les déchets sont très hétérogènes avec la présence des métaux et de verre qui contribue à la production des sous-produits de combustion.

II.2.4.3 Métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments toxiques qui s'accumulent dans les organismes et dans le substratum, le transfert de ces éléments des déchets à l'environnement peut se faire par la lixiviation dans les décharges ou par les fumés des incinérateurs des déchets. Les résultats des études ont montré que les valeurs de différents métaux sont presque les mêmes. En revanche, la valeur du plomb trouvé dans le W10 et W12 est très élevée. En effet, l'éponge des voitures est le constituant commun de ces déchets et peut-être considéré comme source du plomb.

II.2.4.4 Composition élémentaire

Les principaux éléments analysés sont le C, O, H, N et le S. les résultats obtenus peuvent être exploités pour trouver la formule brute ([Melhyas, 2015](#)) ou d'estimer la valeur du pouvoir calorifique inférieur ([Abu Qdais et al., 2000](#) ; [Di Leonardo et al., 2015](#)). Les résultats montrent que le Carbone est le principal constituant suivi par l'Oxygène et l'Hydrogène alors que l'Azote et le Soufre qui sont les

principales sources de NO_x et SO₂ ont les plus faibles valeurs. La *figure 11* présente la comparaison de la composition élémentaire des déchets et celle des énergies fossiles F1 et F2.

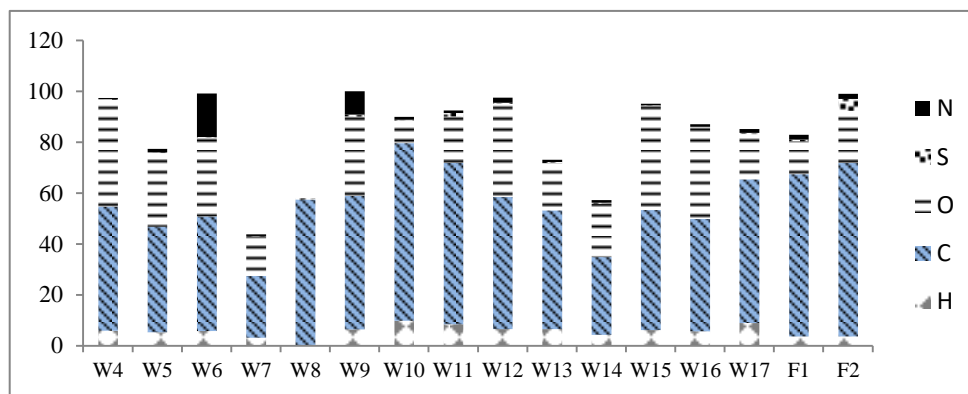


Figure 11: Comparaison de la composition élémentaire des RDF avec celle des combustibles fossiles

Pour le W8, l'Hydrogène, l'Oxygène et l'Azote n'ont pas été déterminés et pour le W15 le Soufre n'a pas été déterminé. En outre de ces éléments, le Chlore a été déterminé dans certaines études. Le taux élevé des chlorures dans le RDF peut provoquer des problèmes techniques et environnementaux via la formation des acides qui altèrent le matériel et contribuent à la production des PCDDs (Velis et al., 2012). En effet, ce paramètre est pris en considération dans la classification des CSR dans la norme CEN 15359. On constate que la valeur la plus faible est celle trouvée dans le déchet W13 (0,03%) constitué par les déchets de la taille d'olive. En revanche, les valeurs 3,19% et 1,21% trouvées respectivement pour W11 et W13, peuvent être expliquées par la présence de matière plastique et notamment le PVC dans la composition de RDF.

II.2.5 Classification selon la CEN 15359

Les CSR qui peuvent être classés selon la norme CEN 15359 sont ceux dont le PCI, les mercures et les chlorures sont déterminés. Le *tableau 20* montre la classification obtenue.

Tableau 20: Application de la classification élaborée par la CEN 15359

CSR	PCI	Cl	Hg	Code
W8	14,49	0,95	0,3	4PCI3Cl 4Hg
W10	32,01	0,365	1,01	1PCI2Cl 5Hg
W11	25,36	3,19	0,52	1PCI5Cl 4Hg
W12	20,07	0,165	1,06	2PCI1Cl5Hg

Les résultats trouvés dans les différentes études ont montré que la composition initiale d'un RDF/ CSR peut influencer ces caractéristiques économiques, techniques et environnementales. En effet, la présence de certains types de plastique peut contribuer à la production des chlorures, ces molécules

peuvent contribuer à la pollution de l'environnement et à la dégradation des matériaux. D'autre part, la présence des plastiques améliore le pouvoir calorifique des RDF/ CSR.

III Utilisation des RDF/CSR dans le secteur cimentier

III.1 Généralités sur le secteur cimentier

III.1.1 Historique

Les matériaux de cimentation ont joué un rôle essentiel et ont été largement utilisés dans le monde antique. Les Égyptiens utilisaient du gypse calciné comme ciment et les Grecs et les Romains utilisaient de la chaux obtenue par chauffage du calcaire avec l'addition de sable pour fabriquer du mortier. En 1759, Smeaton a découvert qu'un mélange de chaux, d'argile et de scories concassées issues de la fabrication du fer produisait un mortier qui durcissait sous l'eau. En 1824, Joseph Aspdin déposa un brevet pour le "Ciment Portland", un matériau qu'il produit en cuisant de l'argile et du calcaire finement moulus jusqu'à ce que le calcaire soit calciné. Il l'a appelé ciment Portland car son béton ressemblait à la pierre de Portland, une pierre de construction très répandue en Angleterre. Quelques années plus tard, en 1845, Isaac Johnson fabriqua le premier ciment Portland moderne en faisant chauffer un mélange de craie et d'argile à des températures beaucoup plus élevées, similaires à celles utilisées aujourd'hui. À ces températures (1400°C-1500°C), il y a clinkérisation et formation de minéraux très réactifs et plus fortement cimentaires. Alors que Johnson utilisait les mêmes matériaux pour fabriquer le ciment Portland que nous utilisons maintenant, trois développements importants dans le processus de fabrication ont conduit au ciment Portland moderne:

- ✓ Développement de fours rotatifs ;
- ✓ Ajout de gypse au paramètre de contrôle ;
- ✓ Utilisation de broyeurs à boulets pour broyer le clinker et les matières premières.

III.1.2 Composition minéralogique et fabrication du ciment

Le ciment usuel est obtenu à partir d'un malaxage de calcaire (CaCO_3) et d'argile (SiO_2 et Al_2O_3) dans des proportions voisines de 80 % et 20 %. Généralement les cimenteries sont installées proche des carrières des matières premières afin de minimiser les coûts de transport. À ce mélange, peuvent être ajoutés des matériaux correctifs tels que des oxydes de fer, de la bauxite ou d'autres éléments fournissant le complément d'alumine, de fer et de silice requis. L'ensemble est mélangé afin d'obtenir une composition régulière du ciment.

Les matières premières sont séchées et broyées pour obtenir la «farine». Celle-ci passe ensuite lentement dans un four, légèrement incliné et rotatif (1,5 à 3 tr/min) dont une température qui atteint

1450°C. Durant la montée en température intervient la décarbonatation du carbonate de calcium qui donne de la chaux vive, ainsi que la scission de l'argile en silice et alumine. Puis, il y a formation de silicates et d'aluminates de chaux : c'est la clinkérisation. Le produit aussi obtenu, le clinker est broyé et mélangé avec du gypse et d'autres éléments d'addition (laitiers, cendres volantes,..) pour constituer le ciment. Le ciment est donc un mélange dont la matière active, le liant, est le clinker.

III.1.3 Production et consommation du ciment

La production mondiale du ciment a été multipliée fois quatre depuis 1990, avec une croissance beaucoup plus rapide qui s'harmonise avec la production mondiale d'énergie fossile au cours des deux dernières décennies. Depuis 1990, cette croissance est due en grande partie au développement rapide de la Chine où la production du ciment a été multipliée fois 12. En effet, la chine produit 73% du ciment dans le monde (USGS, 2018).

III.2 Consommation énergétique dans le secteur cimentier

Jusqu'à récemment, la plupart des industries estimaient que le remplacement d'équipements à faible rendement par des équipements à haut rendement pouvait avoir un effet considérable sur leur consommation d'énergie et de ce faite réduire leurs prix de fabrication. Cependant, de nombreuses études montrent qu'un simple changement du comportement et des attitudes des gestionnaires et des employés à l'égard de la consommation d'énergie peuvent avoir un effet positif sur la consommation énergétique (Kok et al., 2011). En effet, le secteur cimentier est largement lié à la consommation des énergies fossiles (figure 12).

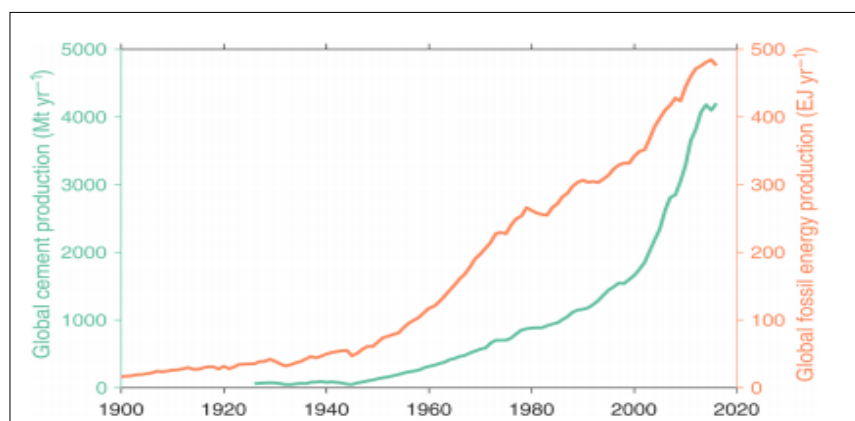


Figure 12: Production mondiale du ciment et d'énergie fossile jusqu'à 2016 (USGS, 2014; Mohr et al., 2015)

L'amélioration de l'efficacité énergétique des industries à forte intensité énergétique (par exemple, les cimenteries) contribuera considérablement à améliorer leur compétitivité économique sur le marché mondial (Aplak et Sogut, 2013; Subic et al., 2013). Plusieurs études ont été menées sur le développement des actions d'économie d'énergie dans diverses industries. Brunke et Blesl (2014) ont évalué le potentiel d'économie d'énergie et de réduction de CO₂ de 21 mesures identifiées dans une

usine de production de ciment allemande et ont conclu que le potentiel économique de réduction de CO₂ pour l'année 2013 était de 4% pour les combustibles, 0,7% pour l'électricité et 3,4% des émissions de CO₂ liées aux combustibles et aux procédés par rapport à 2012. Afin d'améliorer leur image de marque, les cimenteries essayent de remplacer le coke de pétrole qui est un combustible fossile polluant par d'autres alternatives moins polluants comme les RDF ou les énergies renouvelables (figure 13).

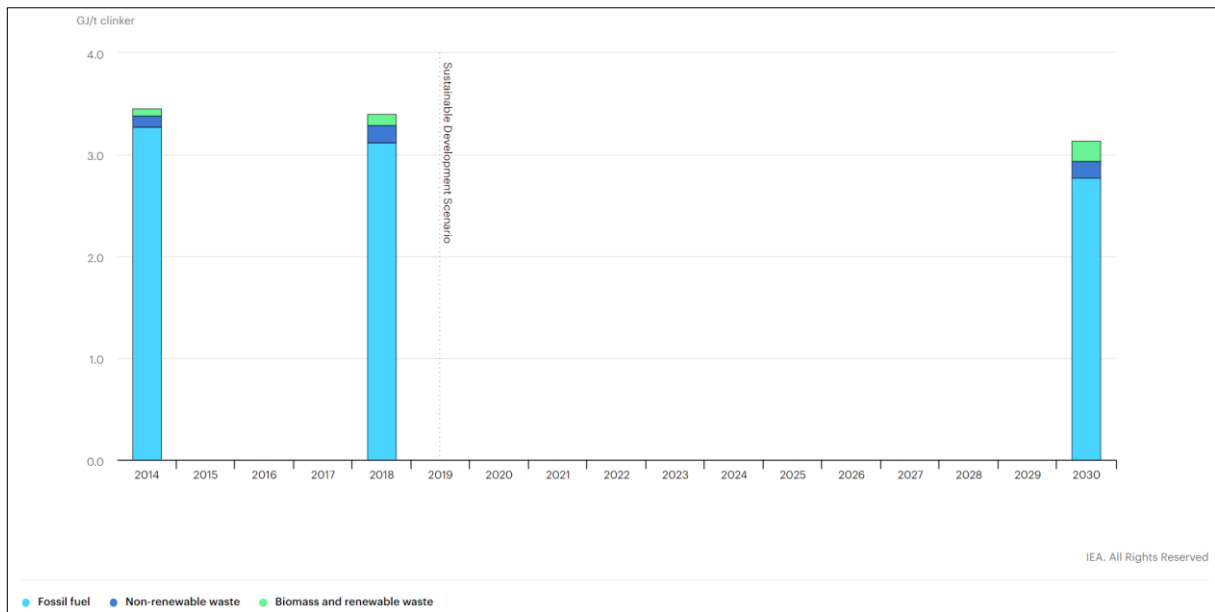


Figure 13: Evolution des sources d'énergie dans le secteur cimentier (IEA, 2019)

Au niveau mondial, les intensités énergétiques, thermiques et électriques ont continué à diminuer progressivement, les fours de traitement à sec, y compris les préchauffeurs et les pré-calciateurs par étage remplaçant les fours de traitement par voie humide et déployant des équipements de broyage plus efficaces. Il est estimé que l'intensité énergétique thermique du clinker a atteint 3,4 GJ / t en moyenne dans le monde en 2016, soit une diminution annuelle de 1% par rapport à 2014. Pour atteindre les objectifs de développement durable 2030, la part des combustibles fossiles doit diminuer (figure 14).

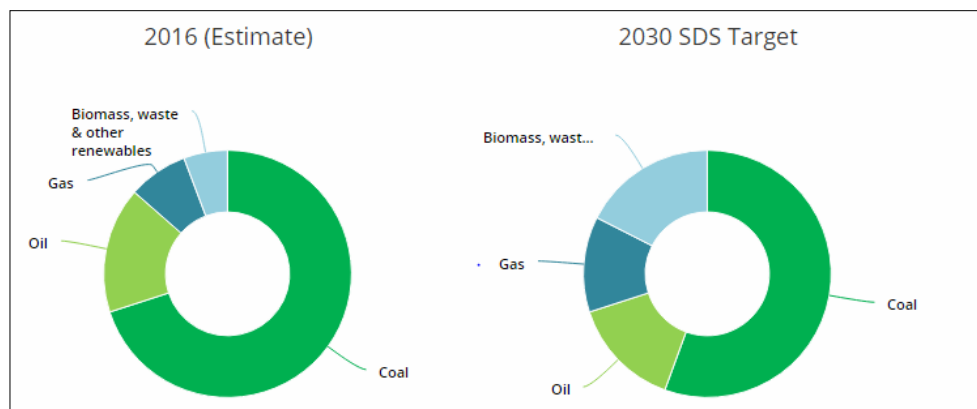


Figure 14: Consommation globale d'énergie thermique pour la production de ciment par combustible (IEA, 2018)

III.3 Secteur cimentier au Maroc

III.3.1 Données sur le secteur cimentier au Maroc

La cimenterie est l'une des plus anciennes industries développées au Maroc, avec une première usine à Casablanca au début du XXème siècle. Aujourd'hui, l'activité est structurée et couvre l'ensemble du territoire. Le secteur cimentier marocain compte quatre entreprises qui exploitent un total de 12 usines de production distribuées sur le territoire du Royaume (*figure 15*) pouvant produire annuellement près de 21 millions de tonnes de ciment (APC, 2018). Toutes les usines bénéficient des technologies modernes et d'un système de management performant. En outre, le professionnalisme et l'expertise du personnel et l'appui des trois groupes cimentiers parmi les plus importants dans le monde, sont autant de garanties pour la qualité des produits.

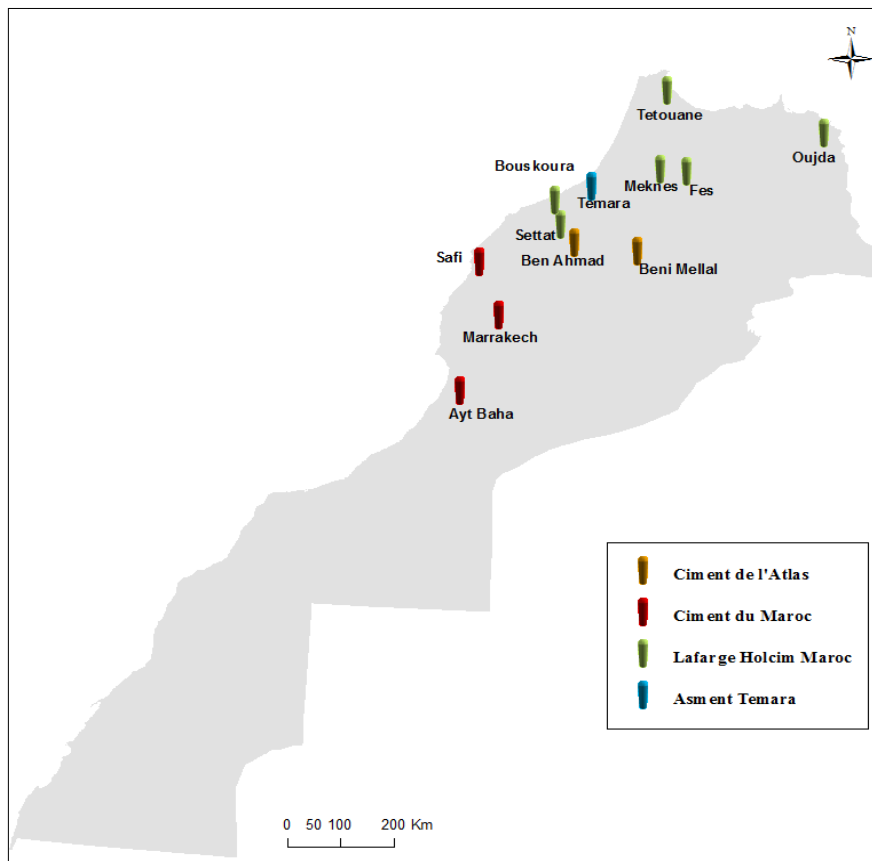


Figure 15: Distribution des usines de production de ciment au Maroc

Le développement de l'industrie cimentière est lié au développement économique du pays et à la mise à niveau des secteurs de la construction et du logement. En 2011, la consommation de ciment a connu son apogée atteignant 16 millions de tonnes. Depuis 2012, le marché des matériaux de construction a

connu un repli du essentiellement à la baisse de l'activité de construction (APC, 2018). Le *tableau 21* présente quelques chiffres sur le secteur cimentier au Maroc.

Tableau 21: Données sur le secteur cimentier au Maroc (APC, 2018)

Chiffre d'affaires – CA	15 milliards DH
Contribution aux recettes de l'Etat	50% du CA soit 7,5 milliards DH dont : <ul style="list-style-type: none"> • 5 milliards en taxes et impôts • 2,5 milliards au Fonds de Solidarité Habitat
Emplois directs	2 600
Emplois indirects	3 100
Masse salariale	1 milliard DH

III.3.2 Secteur cimentier et le développement durable

Depuis les années 90, les cimenteries marocaines se sont engagées pour protéger l'environnement ce qui a été traduit par la signature de la 1ère Convention de partenariat du genre entre un secteur industriel et le Ministère de l'Environnement lui-même créé en 1995.

De nombreux accords et conventions à caractère stratégique, réglementaire, technique et managérial ont ensuite été signés entre 2004 et 2017 avec des partenaires institutionnels et professionnels. Les engagements pris par les cimentiers dans le cadre de ces partenariats viennent en appui aux politiques gouvernementales en matière d'investissements, de mise en place d'écosystèmes et de filières industrielles innovantes, de promotion de la qualité et de la sécurité, de protection de l'environnement, de valorisation énergétique des déchets, d'appui à l'habitat social et à la formation professionnelle. L'action du secteur cimentier pour le développement durable a également débouché sur l'essor socio-économique des régions d'implantation des cimenteries, par l'amélioration de la qualité de vie des populations riveraines, le recours aux énergies renouvelables et aux combustibles alternatifs et la réduction des gaz à effet de serre (GES) et des polluants atmosphériques.

III.4 Valorisation des déchets dans le secteur cimentier

III.4.1 Généralités

Les combustibles dérivés des déchets sont utilisés dans de nombreux pays depuis plus de 20 ans. En Pologne par exemple, les combustibles de substitution sont utilisés dans la fabrication du ciment depuis le début des années 90. La cimenterie appartenant à Lafarge à Kujawy a été la première cimenterie à utiliser des combustibles de substitution à partir des déchets en Pologne en 1990 (Mokrzycki et al., 2003; Puertas et Blanco-Varela, 2004).

L'industrie du ciment est l'une des industries les plus énergivores en raison des conditions d'exploitation, avec les besoins en énergie qui représentent généralement environ 40% des coûts opérationnels (European Commission, 2013). Le coût élevé de l'énergie et l'impact environnemental de l'utilisation des combustibles fossiles a conduit les fabricants de ciment du monde entier à envisager de remplacer les combustibles conventionnels par d'autres qui sont alternatifs. De plus, le co-traitement offre une option de récupération écologique et rationnelle des déchets (CIMAT, 2018). Le co-traitement des déchets dans les fours à ciment présente des avantages, tels qu'une température élevée et un temps de séjour important dans un milieu oxydant. En outre, les cendres sont incorporées dans la composition du clinker : Les cendres volantes provenant de l'incinération des déchets urbains contiennent du CaO, du SiO₂, de l'Al₂O₃ et Fe₂O₃ qui font partie des matières premières du Portland. Ainsi le contact intensif entre les phases solides et gazeuses assure l'absorption et la conversion des substances volatiles et la neutralisation des acides (Munna et Janardan, 2014). Au cours des dernières années, les combustibles fossiles ont été partiellement remplacés et substitués généralement par les déchets industriels banals, les DMA, les combustibles dérivés des déchets (RDF/CSR), les pneus, les huiles usagées, les solvants, les plastiques, les textiles, les déchets de papier, la biomasse, les farines de viande et d'os, les copeaux de bois et les déchets de bois, le papier recyclé, les déchets agricoles tels que les balles de riz, la sciure de bois et les boues d'épuration (Benhalal, E et al. 2013).

Les cimenteries utilisent les déchets solides et les huiles depuis longtemps (WBCSD, 2005), surtout pour les procédés humides, mais l'utilisation a concerné dernièrement les autres procédés (Van Tubergen et al., 2005). L'utilisation des combustibles de substitution jusqu'à 50% a conduit à des changements dans les caractéristiques de fonctionnement de la l'industrie du ciment, comme les caractéristiques de la flamme et les propriétés du clinker (Beckmann et al., 2006). De ce fait, les cimenteries deviennent exigeantes dans la qualité des RDF. Le PCI reste le paramètre le plus caractérisant d'un RDF (Van Tubergen et al., 2005). En Allemagne, les cimenteries sont les plus exigeantes en matière de PCI avec une valeur minimale de 21 MJ kg⁻¹, en Belgique les cimenteries exige un PCI supérieure à 15 MJ kg⁻¹ (Stantec, 2011). Le *tableau 22* représente les exigences des cimenteries en quelques pays européennes en termes d'utilisation des RDF.

Tableau 22: Normes de qualité pour l'utilisation des CSR dans les fours des cimenteries en quelques pays européens

Paramètre	EURITS/Région de Flemish en Belgique (Stantec, 2011)	Suisse (Gendebien et al., 2003)	UK industry (Juniper, 2005)	CEMEX Climafuel (Roberts, 2008)
Masse volumique	-	-	-	180 kg /m ³
Taux des cendres	5%	-	-	-
Humidité	-	-	-	<15%
PCI	>15 MJ/kg	-	23-29 MJ/kg	20±2 MJ/kg
Sb	-	0,2mg/MJ	<50 ppm	150 mg/Kg
As	-	0,6 mg/MJ	<50 ppm	100 mg/Kg
Be	1 mg/Kg	-	-	-
Br/I	0,01%	-	-	0,25%
Cd	-	-	-	20mg/Kg
Cr	-	4,0 mg/MJ	<200 ppm	150 mg/Kg
Cl	0,5%	-	<0,2%	0,8%
Co	-	0,8mg/MJ	<100 ppm	75 mg/Kg
Cu	-	4,0 mg/MJ	-	-
F	0,1 %	-	-	0,5%
Pb	-	8,0 mg/MJ	-	100 mg/Kg
Mn	-	-	-	150 mg/Kg
Hg	2 mg/Kg	0,01 mg/MJ	<20 ppm	10 mg/Kg
N	0,7%	-	-	-
S	0,4%	-	<0,3%	1%

III.4.2 Faisabilité technique de l'utilisation de RDF/CSR en cimenteries

III.4.2.1 Problèmes liés au procédé

Le problème de l'utilisation des RDF dans les cimenteries est lié principalement à la présence des chlorures qui causent des problèmes techniques. Plusieurs études ont été menées dans ce sens (Balamanis et al., 2008 ; Bojer et al. 2008 ; Coda et al., 2001 ; Liu et al., 2001 ; Sorell, 1997). La teneur excessive en chlore dans les procédés secs peut bloquer le préchauffeur avec des chlorures volatils qui sont condensés d'après l'expérience des utilisateurs et comme reconnu par les normes de la Belgique, de l'Allemagne et de la France (Van Tubergen et al., 2005). Un équipement de dérivation du chlore récemment développé permet d'atteindre des taux de substitution thermique de l'énergie fossile

jusqu'à 30%, en réduisant la teneur en Chlore d'environ 50% (Zhan et al., 2016). Néanmoins, les systèmes de dérivation causent une perte d'énergie entraînant des coûts supplémentaires (Beckmann et al., 2006). En plus des chlorures, une teneur élevée en humidité peut réduire la productivité et l'efficacité du four. Egalement, les cendres avec des teneurs élevées en éléments minéraux peuvent affecter la composition minéralogique du clinker (WBCSD, 2005).

III.4.2.2 Effet sur la qualité du clinker

Les cimenteries tiennent compte de la teneur du clinker en concentration du Chlore, d'Alcalin et du Soufre (affectant la qualité globale du produit), de la concentration du Phosphore et de la concentration du Chrome (cause certaines allergies pour les utilisateurs) (WBCSD 2005). Le cadmium, le cuivre et l'antimoine originaire des RDF contribuent à la composition du clinker plus que d'autres sources de combustibles. Malgré les différences significatives entre les caractéristiques de lixiviation des métaux lourds, il a été prouvé que la libération des métaux lourds du béton est négligeable au cours de sa vie opérationnelle. En revanche, la présence du Chrome, Zinc, Baryum, Nickel, Titane et le Phosphore dans les RDF utilisés dans la co-incinération en cimenterie facilite le broyage du clinker et améliore sa qualité (Opoczky et Gavel, 2004).

III.4.3 Faisabilité environnementale de l'utilisation des RDF/CSR

L'utilisation des RDF a montré plusieurs avantages environnementaux, notamment dans la conservation des combustibles fossiles épuisables et aussi dans la prolongation des durées de vie des décharges. En effet, la filière de production des RDF est un processus de gestion durable des déchets. Une étude menée par Kara, (2012) a montré que les émissions générées par la co-incinération des RDF ne constituent pas un obstacle pour utiliser ces combustibles de substitution en Turquie.

III.4.3.1 Emission du CO₂

L'utilisation des combustibles de substitution par l'industrie du ciment entraîne généralement une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans les décharges où ces déchets seraient autrement éliminés (Kara, 2012). Ces réductions indirectes des émissions peuvent être égales, supérieures ou inférieures aux émissions directes de CO₂ provenant de la combustion de combustibles de substitution à la cimenterie en fonction du type de déchets (Kara, 2012 ; Hemidat et al., 2019 ; CSI, 2005).

III.4.3.2 Dioxines et Furane

Les dioxines et furanes sont des polluants chimiques organiques générés à l'état de traces au cours de processus thermiques, industriels ou naturels. Ils constituent une famille de composés dont le seuil d'activité toxique est particulièrement bas et la persistance dans l'environnement est très longue. Chez

l'homme, l'exposition aux dioxines et furanes peut être à l'origine des effets cutanés, immunologiques, cancérogènes et de troubles de la reproduction. L'exposition professionnelle a lieu essentiellement lors du nettoyage des filtres dans les incinérateurs. L'étude réalisée par Kara (2012) a montré des résultats encourageants concernant la formation de dioxine et de furane. En effet, la valeur diminue avec l'augmentation du pourcentage de RDF ce qu'il a expliqué par la possibilité de la mise en lieu des réactions de formation et de destruction des molécules de dioxines et de furane au cours de l'incinération, les résultats qu'il a trouvés sont montrés dans le *tableau 23*.

Juniper dans sa bibliographie sur les émissions de dioxines et de furanes provenant des fours des cimenteries utilisant les RDF n'a pas trouvé aucune augmentation des concentrations mesurées dans les gaz de cheminée (Juniper, 2005). Un rapport a conclu que les combustibles alternatifs qui alimentent le brûleur principal, l'entrée du four ou le préchauffeur / pré-calciateur n'a aucune influence sur les émissions de polluants organiques persistants (POP), y compris les pesticides, l'hexa chlorobenzène (HCB), les polychlorobiphényles (PCB) et PCDD (SINTEF, 2006).

Tableau 23: Résultats d'analyses de dioxine et furane lors de la substitution de la coke de pétrole par le RDF (Kara,2012)

	0% RDF+ 100% PC		8% RDF+ 92% PC		12% RDF+ 88% PC		15% RDF+ 85% PC	
	Mesure	Norme*	Mesure	Norme*	Mesure	Norme*	Mesure	Norme*
Dioxine								
Furane (ng/Nm ³)	0,00176	0,1	0,00154	0,1	0,00112	0,1	0,00074	0,1

*. Selon la EAWTCS Européenne (Directive 2000/76/EC).

III.4.3.3 Oxyde d'azote NO_x et le dioxyde de soufre SO₂

L'émission des NO_x et SO₂ dans l'atmosphère contribue à la formation des pluies acides, la source principale de ces deux gaz est l'industrie. L'utilisation des RDF contribue à la réduction des quantités de NO_x et de SO₂ comme il est montré dans le *tableau 24*.

Tableau 24: Variation des émissions des NO_x et de SO₂ en fonction de la substitution de la coke de pétrole par le RDF (Kara, 2012)

	0% RDF+ 100% CP		8% RDF+ 92% CP		12% RDF+ 88% CP		15% RDF+ 85% CP	
	Mesure	Norme*	Mesure	Norme	Mesure	Norme	Mesure	Norme
SO ₂ (mg/Nm ³)	14,27	300	≤0,286	295,844	≤0,286	300	≤0,286	300
NO _x (mg/Nm ³)	1880	1300	1639	1300	785	1300	733,2	1300

*. Selon la directive Européenne (Directive 2000/76/EC).

Comme il est connu, la formation des NO_x dépend de la température de la flamme. Cette dernière diminue proportionnellement à cause de l'humidité et de la valeur calorifique inférieure de RDF par rapport au coke de pétrole. La valeur de NO_x a diminué parallèlement à cette proportion. La valeur élevée du soufre est due principalement aux énergies fossiles mais on constate que cette valeur a diminué brutalement suite à l'utilisation de RDF.

III.4.3.4 Métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments nuisant pour la santé de l'homme et les écosystèmes. Lors d'une valorisation thermique des déchets, les métaux peuvent se trouver dans les émissions gazeuses ou dans les cendres générées (Jun et al., 2015). Dans le cas des cimenteries, les métaux présents dans les cendres sont incorporés dans la composition du clinker (Amira et al., 2014). Dans l'étude de Kara (2012), la quantité d'émissions de métaux lourds (Ti, Cr, Cu, Mn, Ni) diminue avec l'augmentation de la quantité de RDF qui est caractérisé par une teneur en humidité plus élevée et des valeurs calorifiques inférieures à celle de coke de pétrole ce qui provoque une température de flamme inférieure et une teneur en humidité plus élevée à l'intérieur du four. En outre, la nature alcaline du four des cimenteries défavorise le transfert des métaux lourds en phase gazeuse en formant des hydroxydes métalliques à l'intérieur du four. Ces paramètres peuvent expliquer les concentrations faibles en ML dans les résultats trouvés.

III.4.4 Faisabilité économique de l'utilisation des RDF

La valorisation énergétique des déchets a montré plusieurs avantages en créant des nouveaux emplois, offrant une énergie moins coûteuse et durable et minimisant les cota cabrons des industriels (une tonne de déchet valoriser peut réduire une tonne de CO₂ équivalent). Vu les avantages que connaît la valorisation des déchets et le bénéfice économique de cette opération, le nombre des unités de valorisation ne cesse pas d'augmenter et notamment dans les pays développés comme il est montré dans le graphique de la *figure 16*.

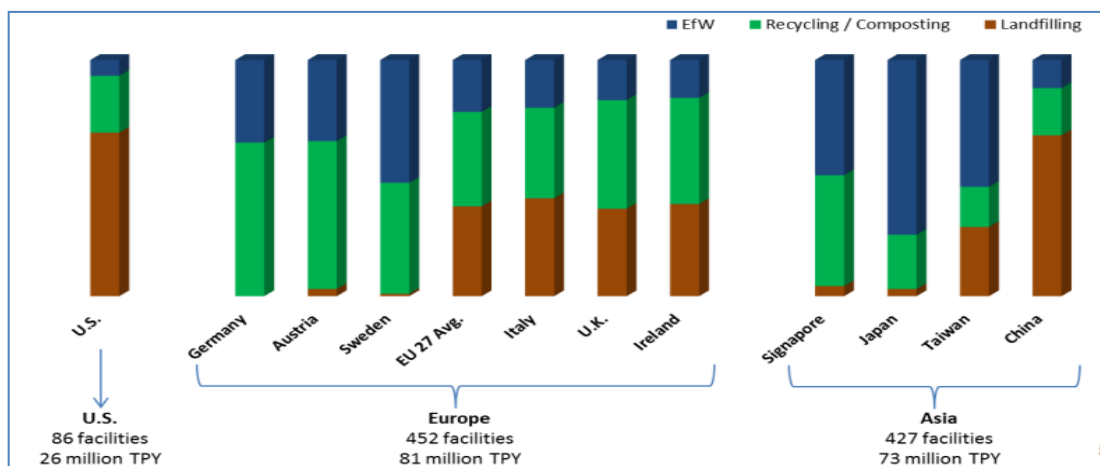


Figure 16: Mode d'élimination des déchets dans les pays développés dans le monde et le nombre d'unité de valorisation énergétique dans chaque contient (Govanta, 2015)

L'utilisation des RDF dans l'industrie consommatrice de l'énergie comme les cimenteries contribue à l'amélioration de la situation financière de ces dernières. L'utilisation de 15% de RDF pour la production du ciment n'a pas aucune influence sur la qualité du clinker (Kara, 2012), Kara a montré dans son étude que l'utilisation de RDF dans la cimenterie permet l'économie 94 USD/ heure. Hemidat et al., (2019) a trouvé dans son étude menée sur une cimenterie en Jordanie que la substitution de coke de pétrole par 15% de RDF pourrait permettre une économie de 486 USD/ heure. De même, Bahareh et al., (2013) a montré la viabilité économique des cimenteries lors de l'utilisation de RDF. Concernant la faisabilité économique de l'investissement dans des unités de production de RDF, plusieurs études ont été faites montrant des valeurs actuelles nettes (VAN) positives (Antonio et al., 2001 ; Francesco et Gregorio, 2005 ; Narawute et al., 2017).

III.5 Le RDF dans les pays développés

III.5.1 Politique de gestion des déchets en Europe

La gestion des déchets dans les pays de l'UE est organisée par la Directive 2008/98/EC. Elle a établi une hiérarchie de traitement des déchets qui mise en priorité la valorisation et considère la mise en décharge comme un dernier choix à cause des impacts liés à ce mode de traitement (Directive 1999/31/EC). La hiérarchie de traitement est de l'ordre suivant : Prévention, réduction, réutilisation, recyclage et valorisation et vers la fin la mise en décharge comme dernière solution. La valorisation énergétique des déchets peut se réaliser par deux procédés principaux ; le traitement biologique (méthanisation) ou le traitement thermique (combustion, pyrolyse, ...) (Elwan et al., 2014 ; Lombardi 2015 ; Rada et al., 2013; Torreto et al., 2014).

III.5.2 Marché de RDF en Europe

III.5.2.1 Production en Europe

En Europe, le marché de RDF est bien développé et il a devenu une source importante d'énergie durable. La production des RDF/CSR a connu une grande évolution dans les dernières années. En effet, les quantités de RDF produites en Europe sont passées de 1,4 million de tonne par ans jusqu'au 12,4 Million de tonne par ans entre 2000 et 2005 (RECORD, 2018). En Autriche, il existe 180 industries de production de RDF avec l'utilisation de 1,8 Million de tonne par ans en co-incinération (Ramakrishna, 2004). Le graphique dans la figure 17 montre la production des RDF non normalisés et normalisés (CSR) dans quelques pays en Europe.

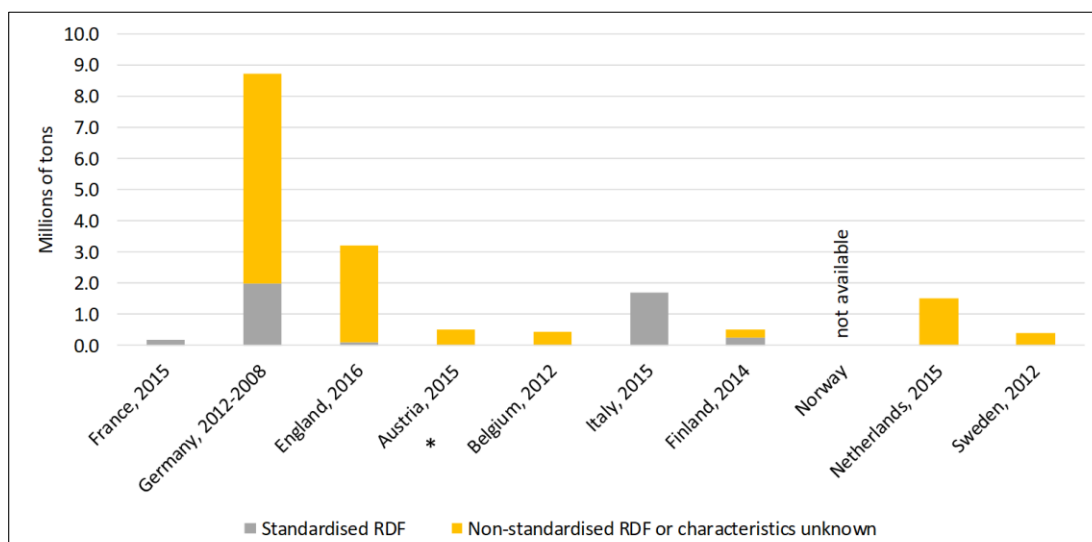


Figure 17: Production de RDF non normalisé et de RDF normalisé (CSR) en Europe (RECORD, 2018)

On constate que l'Allemagne est le grand producteur de RDF en Europe avec un chiffre proche de 9 million de tonne, malgré que les CSR ne constituent pas que 2 millions de tonne de la production total. En revanche, en Italie, toute la production est normalisée soit un tonnage de presque deux millions de tonnes.

III.5.2.2 Utilisation des RDF en Europe

La majorité des pays consomment fortement le RDF qui est produit à l'échelle locale. En revanche d'autre pays comme l'Angleterre exporte presque toute la quantité produite des CSR et d'autre pays ne produit pas de RDF mais ils l'importent comme la Norvège. Concernant la France, la quantité produite est consommée par le pays (figure 18).

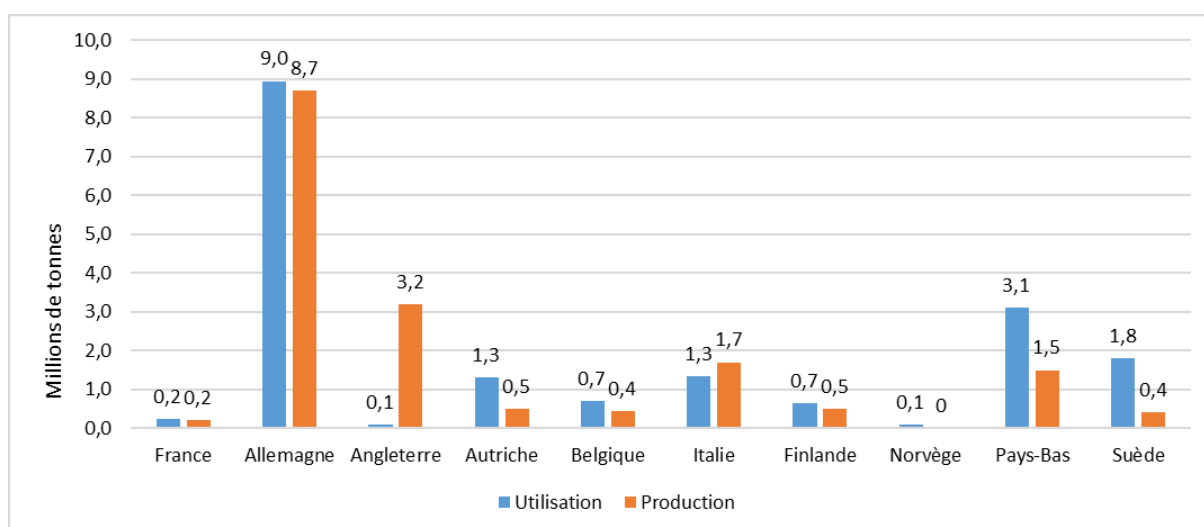


Figure 18: Comparaison des quantités de RDF produites et des quantités de RDF utilisées par pays (Record, 2018)

PARTIE 2 : LA GESTION DES DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES DANS LA PROVINCE DE KHENIFRA

La province de Khénifra est considérée parmi les zones ayant des ressources naturelles implorantes notamment en matière de ressources hydriques et forestières. De ce fait, le groupement des communes Atlas Environnement déploie des efforts afin de protéger ces ressources contre toute sorte de pollution. Les déchets ménagers à leur tour peuvent engendrer des effets graves sur les ressources naturelles et spécialement les ressources en eau, d'où la nécessité de la mise en place d'une politique de gestion intégrée de l'assainissement solide.

Cette partie sera présentée en deux chapitres, dont le premier sera consacré à une monographie de la province de Khénifra en se basant sur des données documentaires et des données collectées auprès des établissements publics ou semi-publics dans chaque secteur (la province, les communes territoriales, la direction provinciale de l'agriculture, la direction régionale de l'environnement, la direction provinciale des eaux et forêts, l'office national de l'électricité et de l'eau, la délégation provinciale de la santé, ...). Dans le deuxième chapitre, une enquête sur l'état des lieux de la gestion des déchets dans les communes de la zone d'étude sera faite.

I Situation géographique et cadre administratif de la zone d'étude

I.1 Situation géographique

La province de Khénifra est considérée comme la perle des montagnes marocaines aux couleurs rougeâtres et surtout capitale des lacs. Elle s'intègre à la fois dans le Moyen Atlas et le plateau central, ce qui explique son relief accidenté où alternent la montagne et les plateaux dont l'altitude est variable (relief en étage) dont les caractéristiques typiques du Moyen Atlas :

- ✓ Étage Colliéen (800 m);
- ✓ Étage Subatlassien (montagnard de 800 m à 1 600 m);
- ✓ Étage Atlassien (de 1 660 m à 2 800 m).

La situation géographique de la zone d'étude est illustrée dans la *figure 19*.

I.2 Cadre administratif

La province de Khénifra a été créée par le Dahir n° 2-73-412 du 14 Rajeb 1393 correspondant au 14 Août 1973. Elle fait partie de la région de Béni Mellal Khénifra selon le nouveau découpage admis au Maroc en 2015 (*figure 20*). La Province de Khénifra est divisée administrativement en :

- ✓ 2 Municipalités (Khénifra – M'Rirt) ;
- ✓ 3 Cercles (Khénifra – El Kbab –Aguelmous) ;
- ✓ 10 Caïdats ;
- ✓ 22 Communes dont 2 urbaines (Khénifra et M'rirt).

Voir le découpage administratif dans la *figure 20*.

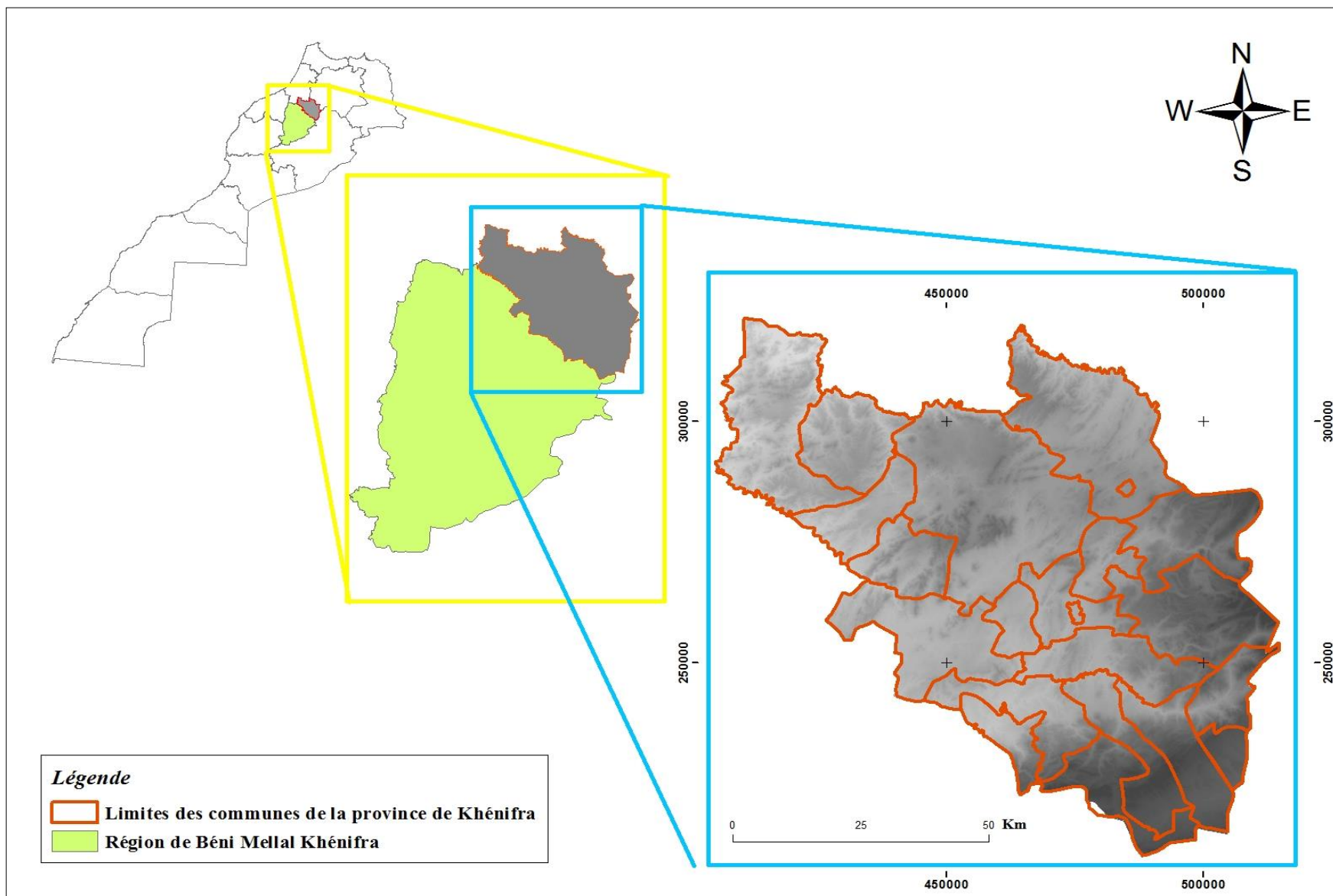


Figure 19: Localisation géographique de la zone d'étude

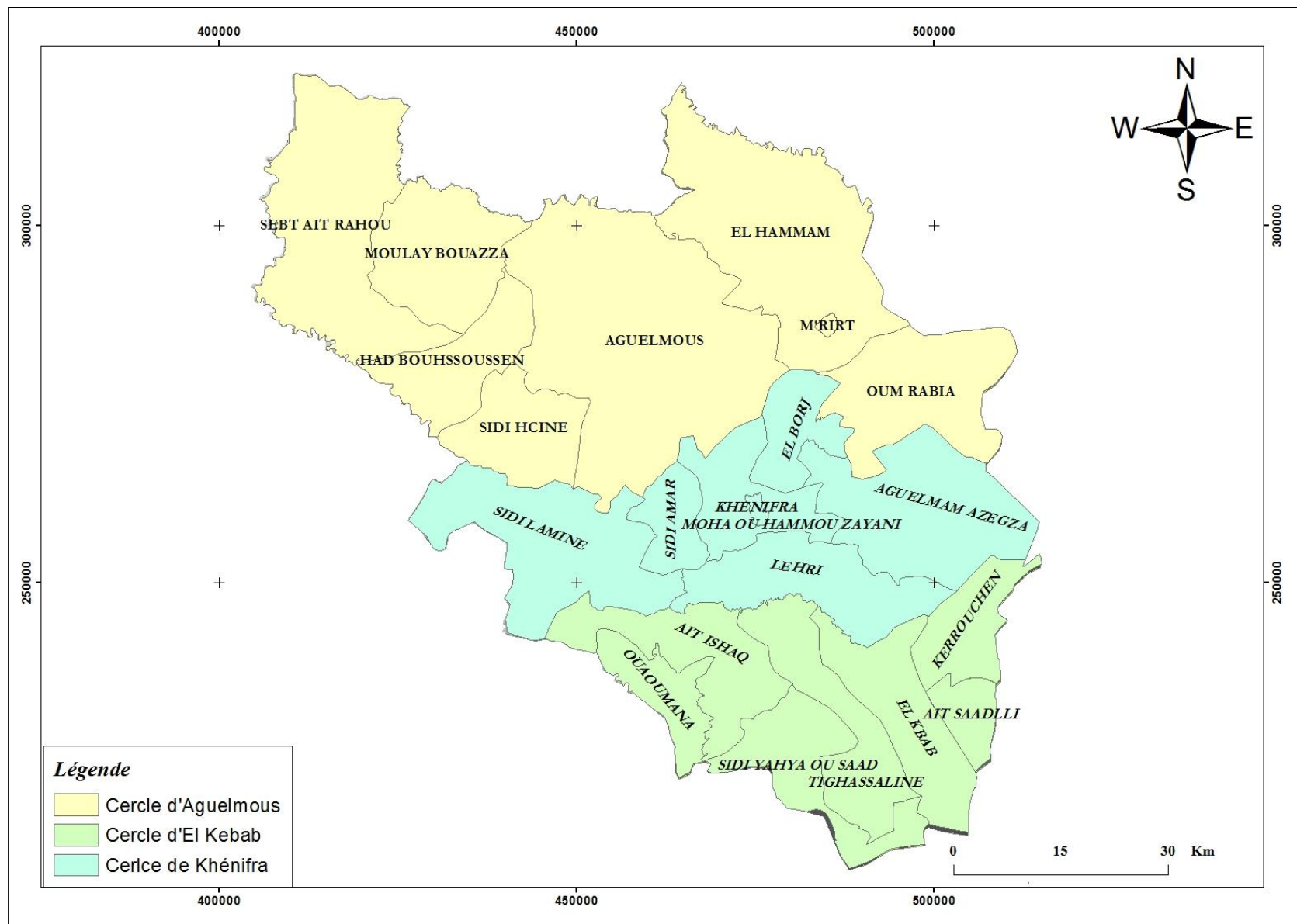


Figure 20: Découpage administratif de la zone d'étude

I.3 Cadre physique et ressources naturelles

I.3.1 Géologie de la zone d'étude

La zone d'étude est subdivisée en deux grandes unités : la Meseta centrale à l'Ouest et le moyen atlas vers l'Est (*figure 21*). La Meseta centrale marocaine ou Massif central Marocain grossièrement tabulaire et pénéplanée après l'orogénèse hercynienne. Des granites et des roches métamorphiques y affleurent essentiellement au Nord-Ouest d'Aguelmous. Les schistes primaires (Ordovicien, Silurien, Dévonien ou Carbonifère) sont très largement représentés dans la Méséta vers le Ouest et Nord-Ouest de la zone d'étude. Vers l'Est, la Méséta centrale Marocaine disparaît sous les recouvrements des calcaires jurassiques du Moyen Atlas. Ces formations calcaires sont très étendues, épaisses (plusieurs centaines de mètres), diaclasées et fissurées, et de ce fait constituent un réservoir d'eau naturel remarquable qui alimente essentiellement l'oued Oum-Er-Rbia. De point de vu structural, la zone d'étude est caractérisée par la présence des failles généralement de direction NE-SW, cette orientation a été structurée lors de la phase majeure de l'orogénèse hycenien.

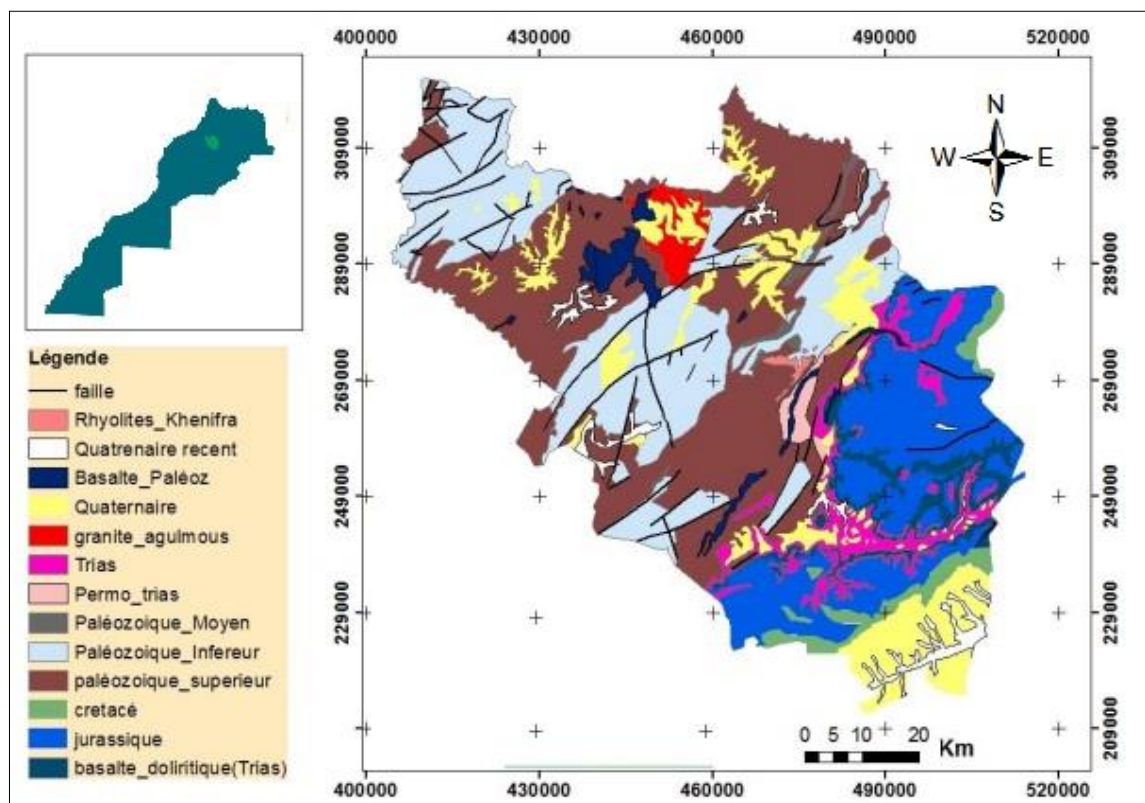


Figure 21 : Carte géologique de la zone d'étude (Hamdouni, 2014)

I.3.2 Topographie de la zone d'étude

La topographie dans la zone d'étude est mouvementée avec une pente relativement forte (Surtout en périphérie) de direction Nord et Est à Sud-Ouest ainsi lorsqu'en allant vers l'Ouest (*figure 22*). La province de Khénifra est caractérisée par des reliefs accidentés et une altitude s'aggravant de l'Ouest

en Est. Ils varient de 306 m au Nord-Ouest et le Sud de la province à 2210 m vers le Sud Est et le Nord. La zone Ouest de la province (cercle d'Aguelmous et une partie du cercle de Khénifra) fait partie du plateau Central Marocain. Le relief y est très mouvementé. Il s'agit d'une succession de sommets convexes et de vallées prolongées. La zone Est de la Province (cercle d'El Kbab et une partie de Khénifra) est partagée entre le plateau Central avec des montagnes moyennes et le moyen Atlas tabulaire.

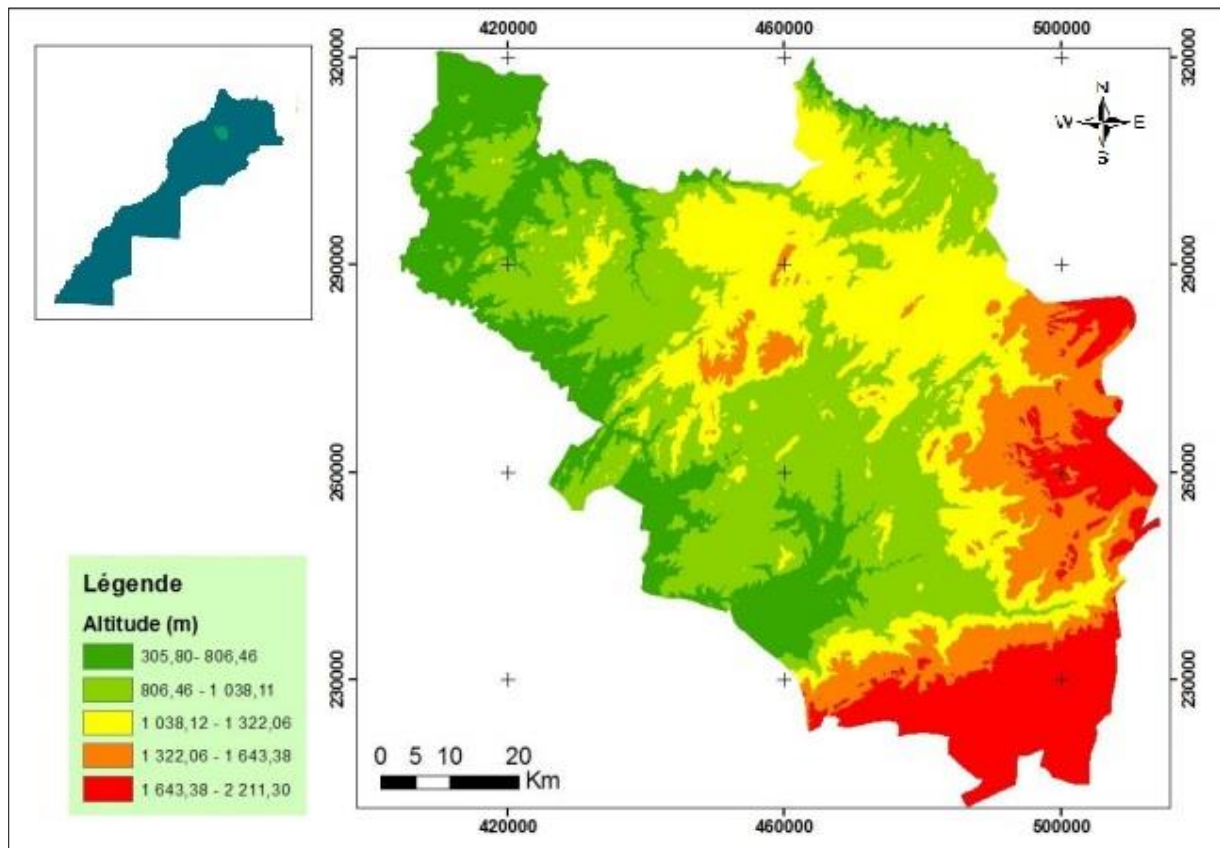


Figure 22: Carte des altitudes de la zone d'étude

1.3.3 Ressources en eaux

1.3.3.1 Eaux superficielles

La province de Khénifra est considérée comme le château du Maroc, trois grands bassins prennent naissance du territoire de la province à savoir le bassin d'Oum Errabia, le bassin de Moulouya et le bassin de Bouregueg. On peut citer parmi les fleuves les plus importantes dans la zone d'étude :

- ✓ Oued Oum Rabia et ses deux affluents Oued chbouka et Oued Srou ;
- ✓ Oued Grou affluent d'Oued Bouregrague;
- ✓ Oued Ksiksou et Oued Boukhmira

La carte de la figure 23 représente le réseau hydrographique dans la zone d'étude.

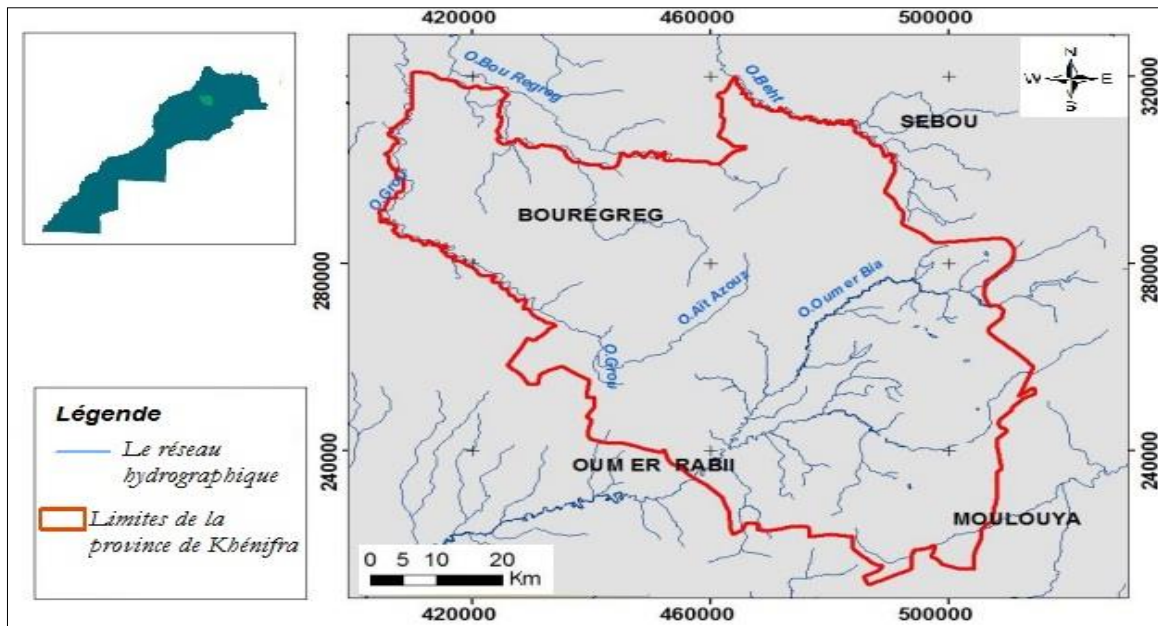


Figure 23 : Carte de réseau hydrographique dans la zone d'étude

1.3.3.2 Eaux souterraines

La géologie de la zone d'étude possède une particularité qui réside dans le fait qu'il bénéficie d'un grand ensemble de plateaux calcaires perméables (casse du moyen Atlas). Au niveau de la province, la morphologie du terrain favorise le drainage des eaux qui vont alimenter la nappe de Tadla et autres nappes dans le bassin versant de Moulouya et Boureguregue. Elle est caractérisée par l'absence des nappes très importantes, due à la nature géologique et lithologique de la région. En revanche, on trouve des petites nappes superficielles dans les vallées alluviales et dans la partie altérée des schistes.

1.3.3.3 Lacs et sources dans la province de Khénifra

La province de Khénifra (PK) est la capitale des lacs au Maroc, ces zones humides lui donne un aspect éco-touristique important. En outre, les sources d'Oum Errabiaa qui font partie du territoire de la PK alimentent Oued Oum Errabiaa par un débit permanent en eau.



Figure 24: Photos de quelques zones humides dans la zone d'étude: du droit à gauche ; Source Oum Errabia, Lacs Tigalmamine, Lac aguelmam Azegza

1.3.4 Cadre climatologique

La zone d'étude est caractérisée par un climat de type continental avec des étés chauds et des hivers froids influencés par le caractère montagneux. Les données climatiques que nous allons traiter dans ce paragraphe sont collectées auprès de l'agence de bassin hydraulique de Béni Mellal.

1.3.4.1 Pluviométrie

Le régime de précipitation est de type saisonnier avec un maximum de pluie et de neige en hiver. La pluviométrie annuelle varie, selon les régions entre 400 et 700 mm en fonction de l'altitude. Les précipitations moyennes annuelles entre 1969 et 2016 dans la station de Taghat qui fait partie de la zone d'étude.

1.3.4.2 Température

Les températures moyennes varient entre 4°C (Janvier) et 35°C (Juillet - Août). La période hivernale est très froide. En revanche, la période estivale est très chaude. Les températures sont élevées en mois de Juillet et Août qui atteint 28 et 29 °C. En revanche, le mois le plus froid est Janvier avec une température de 10°C. Le graphique de la *figure 25* présente le diagramme ombro-thermique de la zone d'étude entre 1985 et 2016.

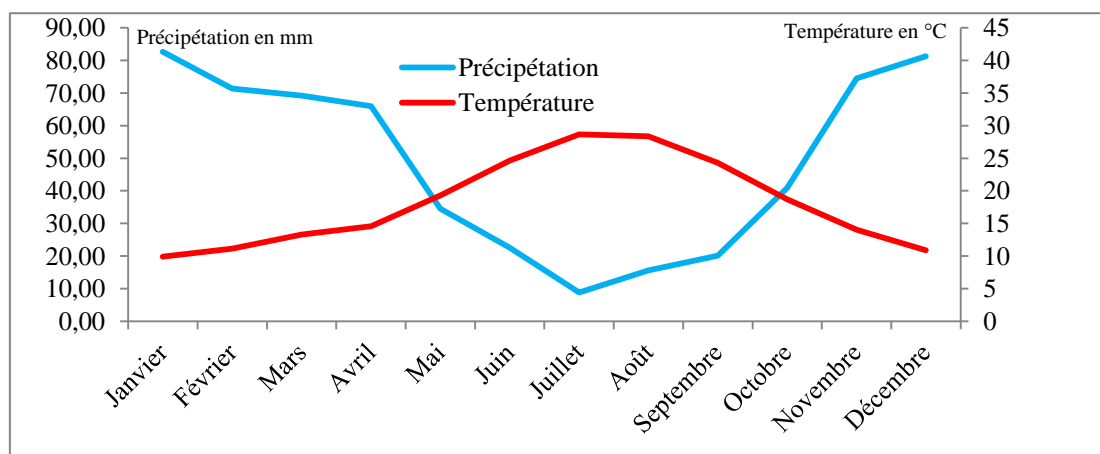


Figure 25: Diagramme Ombro-thermique de la zone d'étude entre 1984 et 2016

A partir du graphique (*figure 25*), on constate que la période de sécheresse dans la zone d'étude s'étale depuis 15 Mai jusqu'au 15 Octobre, avec une période humide de 7 mois pendant l'année.

1.3.4.3 Vent

La zone d'étude se caractérise par une dominance des vents de direction Ouest avec une fréquence maximale en hiver et faible ou nulle en été. Il existe aussi par fois le phénomène de chergui au niveau de l'Est de la région avec une fréquence maximale en été, responsable de la sécheresse estivale qui sévit de Mai à Septembre.

I.3.5 Forêts

Les données sont collectées auprès de la Direction Provinciale des Eaux et Forêts et la Lutte Contre la Désertification de Khénifra. La forêt occupe dans la région une superficie importante (306 600 ha) et joue un rôle capital dans l'économie de la province aussi bien par la nature de la production que par l'apport en alimentation du cheptel, l'emploi de la main d'œuvre (200 000 journées de travail par an). Les essences composantes le patrimoine forestier sont montrées dans le *tableau 25*.

Tableau 25: Répartition des espèces des arbres dans les forêts de la zone d'étude

Essences	Superficie en Ha
Le chêne vert	26 029
Le cèdre	232 750
Le chêne liège	11 380
Le genévrier	10 110
Le pin	11620
Divers	14 713
Total	306 602

I.4 Cadre socio-économique de la zone d'étude

I.4.1 Aspect démographique dans la zone d'étude

Les chiffres démographiques dans la province de Khénifra sont en évolution continue, malgré la fluctuation du niveau de l'évolution entre les communes. Pour projeter la population actuelle, les résultats du recensement de la population au Maroc en 2014 ont été exploités.

La formule utilisée pour la projection est la suivante :

$$P_n = P_0 * (1 + T.A.)^{(P_n - P_0)}$$

Avec ;

P_n : Population de l'année n à déterminée ; P_0 : Population de l'année de référence ; T.A. taux d'accroissement

Les données démographiques de la province sont présentées dans le *tableau 26*.

Tableau 26: Projection de la population dans la zone d'étude

Commune	Population 2014	TA	Population projetée en 2018	Commune	Population 2014	TA	Population projetée en 2018
Khénifra	117 510	1,58	125115	Sidi Amar	2175	-2,36	1977
M'ritt	42 730	1,96	46180	Sidi Lamine	16 808	0,28	16997
Aguelmous	35626	-0,06	35541	Mouha	9286		
				Oumou Zyani		-1,96	8579

Ait Ishak	19133	-0,25	18942	El Borj	3812	-2,62	3428
Tighassaline	15204			Aguelmam	7684		
		0,77	15678	Azugza		-1,36	7274
Sidi Hya	7051			El Hammam	12 830		
Oussaad		-1,92	6525			-1,83	11916
Ouaoumana	8849			Had	7368		
		1,21	9285	Bouhssoussen		0,12	7403
Kerrouchen	7021			Moulay	8490		
		-0,79	6802	Bouaazza		-0,94	8175
El Kebab	16157	-0,34	15938	Oum Errabiaa	9555	-1,68	8929
Ait Saadlli	2540			Sabt Ait	9245		
		-0,31	2509	Rahou		-0,99	8884
Lehri	9085	-0,37	8951	Sidi Hcine	2986	-1,89	2767
Total 2014		371 145		Total 2018		377 759	

Il est constaté que le milieu urbain connaît une évolution démographique, par contre le milieu rural connaît une diminution chose qui est expliquée par la migration de la population vers les villes et les centres urbains. Le taux moyen d'accroissement dans la province est de 0,36%. La carte illustrée dans la *figure 26* montre la répartition de la population dans la zone d'étude.

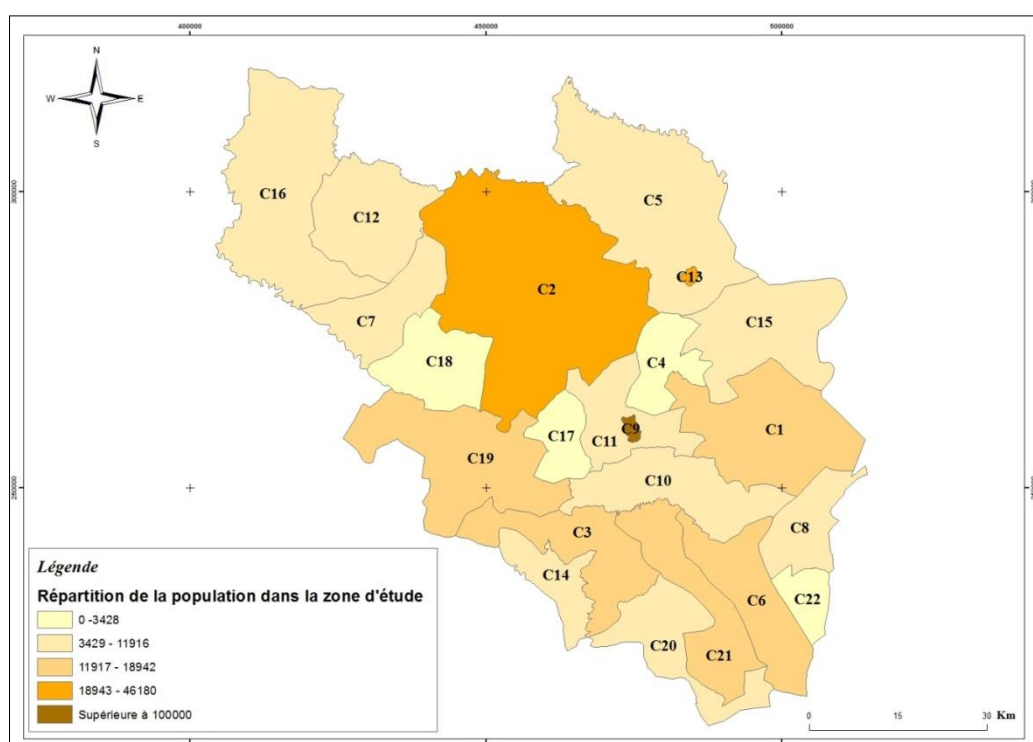


Figure 26: Répartition de la population dans la zone d'étude

Le graphique dans la *figure 27* présente l'évolution de la population dans la province de Khénifra, depuis 1996 jusqu'à 2018 en se basant sur les données collectées auprès du Haut-Commissariat au Plan.

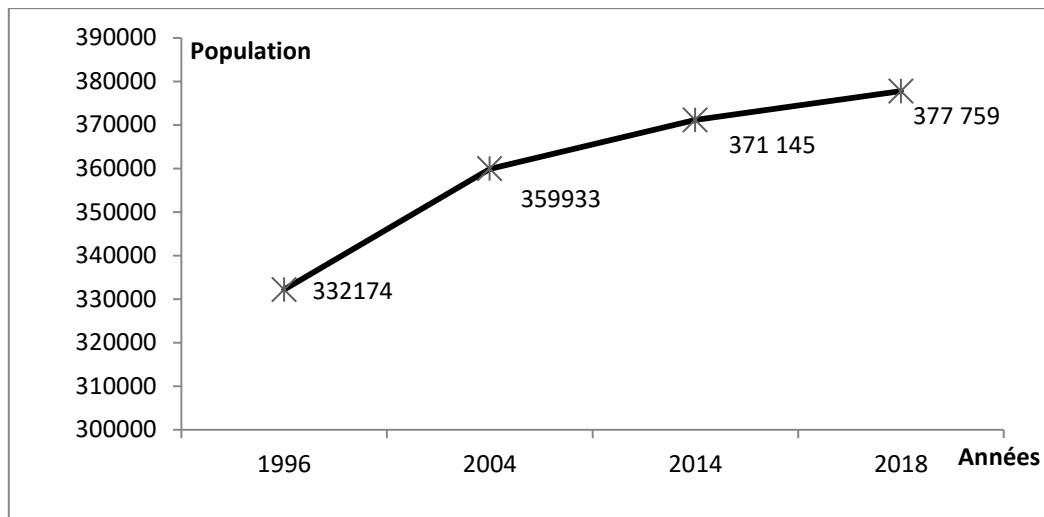


Figure 27: Evolution de la population dans la province de Khénifra entre 1996 et 2018

A partir de la courbe, il est remarqué que la population est en évolution continue avec le temps, malgré que le taux d'accroissement de la population a baissé à partir de 2004. Car la population migre vers les grandes villes pour y travailler vu l'absence de secteur industriel et agricole qui pourrait absorber le chômage dans la province.

1.4.2 Réseau routier

La zone d'étude est située dans la limite de trois régions, elle présente un réseau routier important d'une longueur de 799,156 km. En matière de revêtement, la totalité des routes nationales, régionales et provinciales sont revêtues. En revanche, seule 34,65 Km des routes provinciales, ne sont pas revêtues. Il convient de signaler que les chutes de neige et de pluies les plus importantes sont localisées sur les axes Kerrouchen et EL Kbab.

1.4.3 Eau potable et assainissement liquide

Les données de cette partie sont collectées auprès de l'office national de l'électricité et de l'eau potable direction de Khénifra.

1.4.3.1 Eau potable

L'O.N.E.E. branche Eau assure l'approvisionnement en eau potable des agglomérations dans la province de Khénifra. Dans le milieu rural, la situation demeure peu tardive puisque 84% de la population rurale bénéficie de ce service, le taux d'accès est de 94 % à la fin de 2011. L'alimentation des douars en eau potable est effectuée en majeure partie avec des fontaines publiques. La station de traitement alimente en plus du centre de Khénifra, les centres d'Aguelmous, Had Bouhssoussen, Moulay Bouazza, Kahf N'sour, Sidi Bouabbad et Sidi Amar moyennant des adductions régionales. Les centres de Tighassaline et Ait Ishaq sont alimentés par des conduites locales en attendant la fin des

travaux d'approvisionnement par la station de traitement de Khénifra. Le volume exploité par toute la population (urbaine et rurale) abonnée de la province atteint 7 779635 m³ en 2013.

1.4.3.2 Assainissement

La commune de Khénifra est dotée d'un réseau d'assainissement liquide de type unitaire à pseudo-séparatif. Ce réseau couvre environ 99% des zones d'habitats urbaines avec un linéaire total qui s'élève à 183,41 km. 80% des déchets liquides de la population de la ville de Khénifra subissent l'épuration dans une STEP de type lit bactérien d'une capacité de 153 200 Equivalent habitants et un débit de 12 000 m³/jour à l'horizon 2025. La STEP de Khénifra a été mise en service en 2012. La ville de M'rirt est partiellement couverte par un réseau d'assainissement liquide de type unitaire à pseudo-séparatif. La municipalité a été dotée d'une station d'épuration qui est entrée en service depuis 2003 de type lagunage naturel. Le réseau d'assainissement au niveau des communes rurales de la province varie d'une commune à une autre. Des communes sont dépourvues du service d'assainissement liquide et d'autres utilisent des services modestes avec un taux de raccordement faible. La population non raccordée rejette les eaux usées domestiques, entre autres dans des puits perdus. Alors que les autres communes ayant un réseau d'assainissement rejettent leurs eaux usées dans des zones d'épandage sans aucun traitement préalable malgré les impacts qui peuvent avoir ces dernières sur la santé publique et sur les écosystèmes.

1.4.4 Electrification

Le territoire de la province de Khénifra est raccordé au réseau national ONEE. L'appel de la puissance est de 40 MW dont 12 MW sont réservés pour la ville de Khénifra. Le taux de raccordement est de 100% dans le milieu urbain et 78% dans le milieu rural (ONEE [branche Electricité, 2016](#)). L'infrastructure de l'électricité est composée d'un Complexe hydro-électrique de TANAFNIT EL BORJ. Il est situé à 30 Km environ au Nord-Est de la ville de Khénifra.

1.4.5 Secteur agricole

La localisation du territoire de cette province dans une région de montagne lui confère une diversité dans les productions agricoles avec une dominance d'élevage et de grandes cultures et une présence de plus en plus remarquable de l'arboriculture fruitière à base d'olivier.

1.4.6 Secteur industriel

Les unités agro-industrielles jouent un rôle très important sur le plan économique et social. En effet, elles permettent la transformation puis une meilleure valorisation de la production agricole. Malheureusement, à part les huileries, on remarque une absence totale des unités agro-industrielles dans la zone d'action.

Les unités présentes sont portées dans le *tableau 27*.

Tableau 27: Les principales unités industrielles dans la zone d'étude

Désignation	Nombre d'unité	Capacité totale
Huileries traditionnelles	32	500 T/ans
Huileries modernes	1	100 T/24 Heures
	2	5T/24 Heures
	1	14T/24 Heures
Moulin à blé	28	Variable
Laiterie	1	

I.4.7 Secteur commercial

Le secteur du commerce et des services constitue l'un des secteurs importants de l'économie de la Province. Il assure l'essentiel des besoins de la population locale en produits et services de consommation. Le *tableau 28* montre les principales unités commerciales dans la province.

Tableau 28: Le secteur commercial dans la zone d'étude

Appareil commercial	Nombre
Marché de gros de légumes et fruits	1
Centres commerciaux	3
Marchés communaux	4
Super marché	1
Mini super marché	5
Aire pour grains	1
Souks hebdomadaires	22
Entrepôts frigorifiques	3
Abattoirs contrôlés	10

I.4.8 Secteur touristique

La province de Khénifra se situe dans une zone géographique riche en paysages caractérisés par des montagnes et des forêts ainsi que des lacs qui attirent les amateurs de l'éco-tourisme. Cet environnement naturel se caractérise notamment par l'existence des grands espaces couverts de forêts de différentes espèces et d'une richesse hydrographique comprenant des rivières et des lacs de superficies différentes. Parmi les sites les plus connus dans la province on cite : Les sources Oum Er-Rbia, le lac d'Aguelmam Azegza, le lac tiguelmamine, le plateau d'Ajdir, la vallée de l'Oued Srou, le lac Aguelmam Abekhan, En plus de ces potentialités naturelles, la province de Khénifra se distingue sur le plan socio-culturel par la diversité de ses troupes folkloriques, de son artisanat, et de ses monuments historiques.

CHAPITRE 2 : ETAT DES LIEUX DE LA GESTION DES DECHETS DANS LA ZONE D'ETUDE

La gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA) est un service très sensible dans les communes et les municipalités, la collecte quotidienne des ordures a devenue primordiale suite au mauvais aspect paysagère et aux impacts olfactifs nuisibles causés par le stockage des déchets. Une gestion efficace des déchets nécessite un staff technique et des ressources humaines bien formées dans le domaine de l'assainissement solide.

L'objectif de ce chapitre est de faire un diagnostic et une analyse des services de gestion des déchets ménagers dans les communes de la province de Khénifra afin de soulever les principaux problèmes liés à ce secteur.

Dans ce cadre, des enquêtes de terrain et des services communaux ont été menées. L'état des lieux de la gestion des DMA dans la zone d'étude a concerné les deux chaînes principales dans un système de gestion des déchets ; La collecte et l'élimination.

I Collecte des déchets dans la zone d'étude

I.1 Gestion dans les zones urbaines

Le territoire de la province de Khénifra est constitué de deux communes urbaines (Khénifra et M'ritt), les deux villes sont les principales sources des déchets vu que le taux de production dans les zones urbaines est plus élevé.

I.1.1 Collecte des déchets dans la ville de Khénifra

La ville de Khénifra est la seule commune dans la province qui a délégué le service de propreté au secteur privé depuis 2008 pour un contrat de 10 ans avec la société Tout propreté. En 2018 un nouveau marché a été lancé pour un deuxième contrat, la société Ozone Maroc a pu gagner le marché avec un contrat de sept ans. La gestion déléguée a montré son efficacité dans plusieurs villes Marocaines car le secteur privé a assez d'expérience et assez de matériels bien développés dans ce secteur. En plus du balayage manuel et mécanique des avenues de la ville de Khénifra, la collecte se fait avec une fréquence de 7/7. Trois modes de collecte se font dans la ville.

La collecte en porte à porte (figure 28) : Malgré que ce mode soit plus classique, il est encore utilisé dans la collecte des ordures de la ville de Khénifra et notamment dans les quartiers populaires (Massira, Lasiri, Boufoulsn, Amalou et Hamria), le camion circule dans les divers secteurs pour collecter les poubelles qui sont déposées devant les maisons des citoyens. Les engins utilisés pour ce

faire sont des bennes satellites ou des Bennes travaux public vu la facilité de leur accès dans les ruelles.



Figure 28: Collecte en mode porte à porte dans le quartier Amalou par une benne satellite (photo prise en 2016)

La collecte en point de regroupement : Les zones avec une forte production des ordures sont desservies des caissons métalliques d'une capacité de deux tonnes. Ainsi, un caisson est déposé dans l'abattoir communal de la ville de Khénifra afin de collecter les déchets générés par les animaux et qui sont mélangés avec les ordures ménagères (*figure 29*).



Figure 29: Collecte des déchets d'abattoir par un caisson métallique (photo prise en 2016)

La collecte par apport : Le par apport est le mode le plus développé dans le monde dans les systèmes de collecte des déchets. Le dimensionnement du nombre et du volume des bacs dépend de la production journalière des déchets, cette étape est importante afin d'éviter les problèmes liés aux débordements des conteneurs. La collecte des bacs se fait par des bennes tasseuses (*figure 30*) d'une manière quotidienne.



Figure 30: Collecte des déchets en mode porte à porte dans le quartier Asaka à l'aide d'une benne tasseuse (photo prise en 2016)

Tous les déchets collectés dans la ville de Khénifra sont transférés directement à la décharge municipale qui était sauvage avant d'être réhabilitée en 2017 et devenue un centre d'enfouissement et de valorisation.

I.1.2 Collecte des déchets dans la ville de M'irt

La gestion des DMA à M'irt est confiée aux services techniques de la commune, qui assurent cette tâche en tant que service public confronté à la nécessité du respect des exigences de l'hygiène et le bien-être des citoyens. La collecte des ordures se fait essentiellement par le système de porte à porte avec une fréquence de 6 jours par semaine du lundi au samedi, elle est organisée en trois secteurs, quelques bacs à ordures sont déposés le long des grands avenues de la ville. La périphérie de la ville est considérée comme un quatrième secteur desservi par la multi-benne qui effectue quatre voyages par jour, ce secteur est équipé de 15 caissons métalliques d'une capacité de 3 m³ dont l'état est très vétuste.

Le *tableau 29* représente les données sur la sectorisation et le matériel de collecte des déchets dans la ville de M'irt jusqu'à 2019.

Tableau 29: Organisation de la collecte actuelle au niveau de la commune urbaine de M'rtirt

Secteur	Quartiers	Engin	Mode de collecte	de	Distance parcourue en Km par jour
1	Ait Ami Ali, Nahda, Koutoubia, Ait mou, Boulachfar 2, douar Dssain	benne tasseuse	Porte à porte		17
2	M'rtirt centre, Boulachfar 1, Mohamed N'toto	benne tasseuse	Porte à porte/ Par apport		20
3	Aait Hajjou, Boulouhouch, Tahajjaout, El Ghazouani, Afoud Ikbarene	Camion benne	Porte à porte		14
4	caissons	Multi-benne	Point de regroupement		51

1.2 Collecte des DMA dans les centres ruraux

La gestion des déchets au niveau des centres des communes rurales varie d'un centre à autre. Le mode de collecte est le porte à porte essentiellement dans la plupart des centres et en part à port dans certains centres à savoir : El borj, Tighssaline et Aguelmam Azgza. Le *tableau 30* montre les centres disposant d'un service de la gestion des déchets, et ceux qui n'en disposent pas:

Tableau 30: Caractérisation du service de la gestion des déchets dans les centres des communes rurales

Centre de la commune	Service de la gestion des déchets (oui/non)	Caractérisation du service de la gestion des déchets	Mode de collecte
Aguelmous	Oui	La collecte se fait à une fréquence de 6 fois par semaine	Porte-à-porte
Had Bouhssousen	Non (seulement balayage)	Dispose de 5 balayeurs	-
Sidi Hcine	balayage et éradication des points noirs	Collecte non régulière	-
Oum errabia	Non	La commune ne déploie aucun moyen financier ou matériel pour la collecte des déchets ménagers et assimilés.	-
Sebt Ait Rahou	Oui	La collecte se fait à une fréquence de 3 à 4 jours par semaine.	Porte-à-porte
Moulay Bouazza	Oui	La fréquence de la collecte est doublée lors du Moussem de Moulay Bouaza. Durant le	Porte-à-porte et Point de

		mousser la fréquence d'évacuation des caissons devient de 4 jours par semaine et celle du pick-up de 6 jours par semaine.	groupement
Mouha Ouhmmou Zyani	Oui	La collecte des déchets ne concerne que deux douars de la commune rurale à savoir Douar Ait khassa et douar Taabit.	Porte-à-porte
AL HAMMAM	Oui	La collecte se fait au niveau du centre de la commune d'El hammam moyennant des charrettes.	Porte-à-porte
El Borj	Oui	Les conteneurs sont disposés dans des endroits faciles d'accès, ils sont évacués une fois par semaine dans la décharge publique de la commune urbaine de Khénifra qui se situe à 20 km du centre.	Porte-à-porte et par apport
Ait Ishak	Oui	La collecte se fait à une fréquence de 5 jours par semaine.	Porte-à-porte
Ouaoumana	Oui	La collecte se fait à une fréquence de 4 jours par semaine	Porte-à-porte
El kebab	Oui	La collecte des déchets ne concerne que le centre urbain de la commune rurale, le centre est subdivisé en plusieurs quartiers.	Porte-à-porte
Tighassaline	Oui	Le centre de Tighassaline qui est le seul à être desservi par la collecte, il est subdivisé en quatre quartiers (Q.Administratif, Q.El Massira, Q.Ennahda, Q.Essaada).	Porte-à-porte et par apport
Sidi Hya Oussad	Oui	La collecte des déchets ne concerne que le centre de la commune rurale subdivisé en deux quartiers.	Porte-à-porte
Ait Saadli	Non (balayage et éradication des PN)	Les dépenses allouées à la gestion des déchets se résument aux salaires du personnel qui de temps à autre effectue des opérations de nettoyage et d'élimination des points noirs.	
Kerouchen	Oui	La commune de Kerouchen vient d'instaurer un service pour la gestion des déchets, elle vient d'acquérir un pick-up (don du groupement communal Atlas).	Porte-à-porte
Lehri	Oui	Les centres qui sont desservis par la collecte sont le centre de Lehri et le centre de Srou qui ont un caractère rural en dur.	Porte-à-porte
Aguelmam	Oui	La collecte des déchets ne se fait qu'au niveau du lac Aguelmam Azegza et Arougou. Le kilométrage parcouru est celui du jour de collecte (une fois par semaine), en période estivale (les mois de juin, juillet et août) le volume passe à 150% et le nombre de voyages peut passer à 2 fois/sem.	Porte-à-porte et par apport
Sidi Amar	Oui	La collecte des déchets ne se fait pas d'une	Porte-à-porte

	(Irrégulier)	manière très régulière au niveau du centre de Sidi Amar, de temps à autre la commune procède à l'élimination par l'incinération des déchets accumulés sous forme des points noirs.	
Sidi Lamine	Non	Les agents qui prennent en charge la collecte des déchets sont payés par la population du centre. En effet, la commune de Sidi Lamine n'engage aucun moyen ni matériel ni humain pour prendre en charge leurs déchets.	Porte-à-porte

I.3 Synthèse sur le service de la collecte des déchets dans la zone d'étude

L'efficacité d'un système de collecte des déchets dépend de plusieurs paramètres (matériels, ressources humaines, niveau de formation, ...). Malgré les efforts déployés par les diverses communes de la province, plusieurs lacunes ont été détectées dans toutes les communes. Hormis la municipalité de Khénifra, les problèmes majeurs relevés au niveau de la zone d'étude concernent notamment des insuffisances et des défaillances notoires portant sur les services de collecte et de nettoyage, caractérisés par :

- ✓ Absence d'un service de la gestion des déchets dans les centres des communes rurales de Sidi Lamine, El Hamam, Ait Saadelli, Had Bouhssoussen, Oum Rabia, Sidi Amar et Sidi Hcine, certaines de ces communes mobilisent seulement des charrettes ou des balayeurs pour l'éradication des points noirs ;
- ✓ L'insuffisance et/ou l'inadéquation du matériel dans les communes urbaines et les centres ;
- ✓ L'inadéquation du matériel mobilisé pour la collecte des déchets au niveau de la plupart des centres des communes rurales (camion benne, BTP et Pick up...);
- ✓ L'existence d'une voirie non adaptée à la collecte par les engins spécialisés, ce qui est une entrave à l'amélioration des rendements de la collecte ;
- ✓ L'absence de la conteneurisation dans la majorité des communes de la province justifiant ainsi la collecte traditionnelle ;
- ✓ Absence de suivi tel que les fiches d'identification par véhicule, les statistiques de collecte pour la commune urbaine de M'ritt et les centres des communes rurales ;

La problématique actuelle appelle donc à la proposition d'amélioration et de professionnalisation de la gestion des déchets ménagers et assimilés afin d'aboutir à une gestion efficace et durable et notamment dans la commune urbaine de M'ritt et les centres des communes rurales.

Malgré que la ville de Khénifra déploie assez d'effort afin de bien gérer la collecte, la qualité de ce service n'est pas dans les attentes de la population, ce qui est prouvé par :

- ✓ L'apparition des points noirs même dans la ville de Khénifra ;
- ✓ La conteneurisation est mal entretenu ;
- ✓ Engins de collecte mal entretenus (fuite de lixiviat, absence de sécurité,...) ;
- ✓ Débordement des bacs.

II Mode d'élimination des déchets dans la zone d'étude

Après avoir collecté les déchets, les communes doivent les éloigner des centres urbains vu les mauvais aspects paysagers que constitue ces derniers. Avant 2017, l'élimination des déchets dans les communes de la province de Khénifra se fait dans les décharges sauvages (Khénifra, M'rirt, Ououmana,...) et dans dépotoirs sauvages (Sidi Lamine, Ait Saadli,...). Ainsi, d'autres communes brûlent leurs déchets à l'aire libre (Oum Errabia, Aglmam Azegza,...). Grâce au plan national des déchets ménagers (PNDM), un schéma directeur provincial de gestion des déchets ménagers a été fait afin de choisir un site convenable pour une décharge contrôlée qui va recevoir tous les déchets de la zone d'étude. Le site a été choisi dans la commune de Sidi Amer, mais les citoyens de la commune ont refusé la construction de la décharge sur leur territoire. La solution qui a été proposée par le ministère de l'environnement est de réhabiliter la décharge actuelle de Khénifra et la transformer en centre d'élimination et de valorisation (CEV). La réalisation du projet rentre dans le cadre de partenariat entre le ministère délégué auprès du ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement chargé de l'environnement, la commune urbaine de Khénifra et le groupement de communes Atlas. En effet, la commune de Khénifra a assuré la première tranche (5,2 MDH) (aménagement des voies d'accès à la décharge de Khénifra ; Construction des locaux administratifs, logement gardien, mur de clôture de la décharge, atelier d'engins, pont bascule, château d'eau de capacité 20m³ et d'un poste de transformation d'électricité). La deuxième tranche (31,5 MDH) a été lancée par le ministère délégué chargé de l'environnement (réalisation des travaux de réhabilitation et fermeture des décharges de Khénifra, M'Rirt et Aguelmous, réalisation d'un casier d'enfouissement à la décharge de Khénifra avec système d'étanchéité et bassin de lixiviat) (*figure 32*). La troisième tranche (530 MDH H.T et sur 20ans) se réalise par le groupement des communes Atlas (lancement de la gestion déléguée de l'exploitation du CEV comportant l'enfouissement et la valorisation, la mise en place et l'exploitation de deux centres de transferts M'Rirt et Aguelmous, construction des futurs casiers et réalisation de l'étude d'impact environnementale).

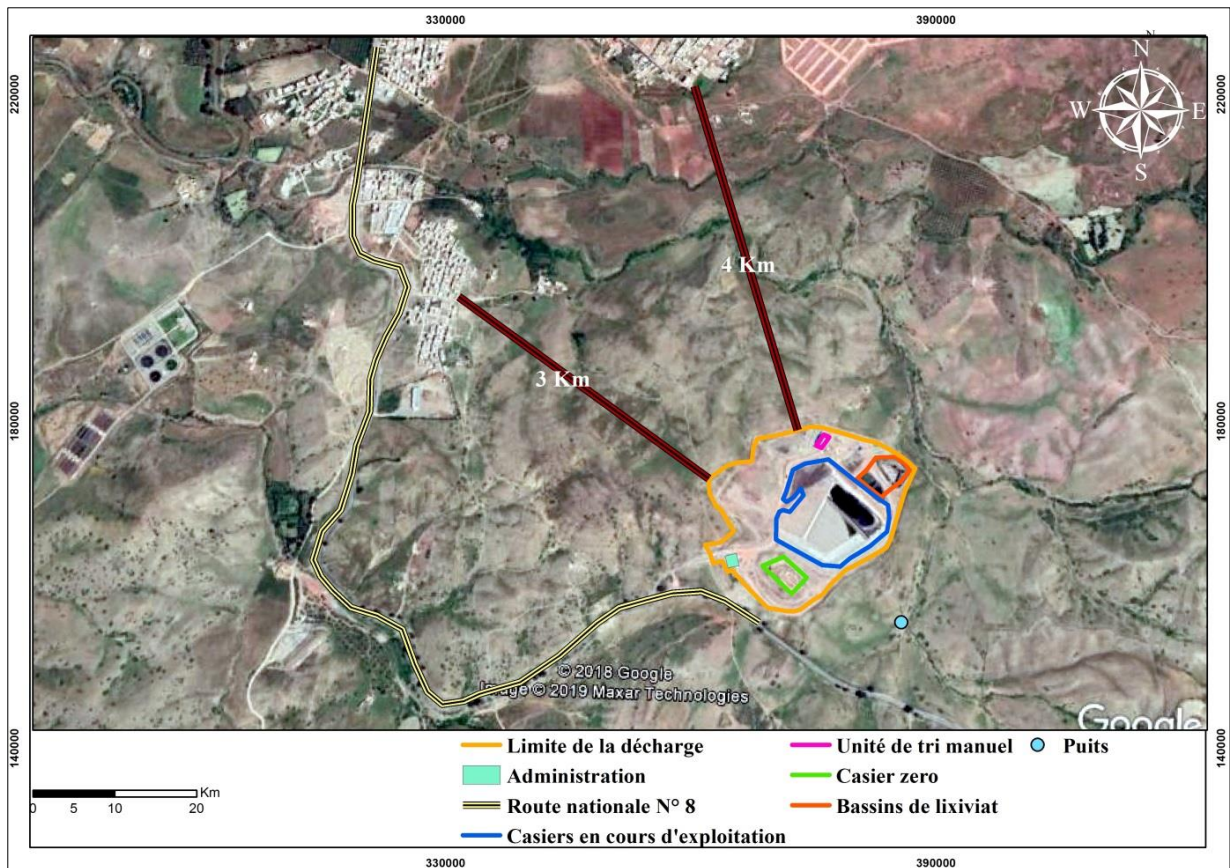


Figure 31: Localisation de la décharge provinciale de khénifra (Image satellite 2018)



Figure 32: Travaux d'aménagement des casiers de la décharge (Photo prise en 2016)

Récapitulatif

La gestion des ordures ménagères constitue un obstacle majeur pour les communes territoriales et notamment dans la phase d'élimination. Une évolution dans le mode de gestion des déchets dans la province de Khénifra a été remarquée, avec l'organisation de l'enfouissement en passant d'un mode de mise en décharges sauvages et en dépotoirs sauvages à un mode de mise en centre d'enfouissement et de valorisation. Malgré les efforts déployés par les communes et par le ministère de l'environnement, la gestion actuelle des déchets rencontre des problèmes et ne répond pas aux attentes, vu que l'énergie et la matière contenues dans les ordures est perdus sous terre. En outre, la localisation géographique du CEV ne répond pas aux normes de choix de site d'une décharge (*figure 31*). En effet, et à cause des problèmes politiques, la décharge sauvage de Khénifra a été réhabilitée est devenu un CEV après avoir refusé le site choisi par l'étude du plan directeur provincial de gestion des déchets.

La récupération des fractions recyclables par l'unité de tri est très loin des attentes du PNDM à cause de plusieurs contraintes dont le mélange de plusieurs fractions de déchets est le problème majeur. L'objectif de cette recherche est de mener une étude sur la faisabilité de production de RDF à partir des déchets ménagers afin de minimiser le nombre des fractions des déchets envoyées à la décharge.

On suppose dans cette étude que toutes les fractions à haut pouvoir calorifique contenues dans les déchets ménagers pourraient être utilisées comme matière secondaire afin de produire un RDF qui pourrait être utilisé dans les fours à ciment.

PARTIE 3 : COMPORTEMENTS DE LA POPULATION VIS A VIS LA GESTION DES DECHETS DANS LA ZONE D'ETUDE

Il devient de plus en plus évident que l'efficacité de la gestion des déchets ménagers depuis la pré-collecte jusqu'au traitement dépend des comportements des citoyens (Al-Khatib et al., 2010). En effet, les gestes des citoyens et leur conscience écologique jouent un rôle très important dans le succès d'une chaîne de valorisation des déchets. Il est à noter que, outre la fourniture du matériel nécessaire pour la collecte et le traitement des ordures, il est intéressant de comprendre les préoccupations, les connaissances et le comportement du public (Chung and Lo, 2004). Le tri à la source pourrait avoir un impact positif sur la qualité des sous-produits (RDF, biogaz, compost,...) récupérés dans une chaîne de valorisation des déchets. De ce fait, la sensibilisation de la population est une étape primordiale dont l'intervention de la société civile est importante. Cette partie est consacrée à l'étude des aspects sociaux dans la gestion des déchets et notamment dans la production des fractions sèches afin d'en produire un RDF de bonne qualité.

Le premier chapitre vise à mener des enquêtes de la population (producteurs des déchets) et des communes territoriales (responsables sur l'élimination des déchets) afin de soulever les sources des problèmes qui causent l'inefficacité de la gestion des déchets ménagers. Le deuxième chapitre de la présente partie concerne une étude de projet pilote sur le tri à la source des déchets en fractions combustibles et non combustibles afin d'évaluer l'efficacité de séparation dans la zone d'étude.

Terminologie : les termes fractions combustibles et non combustibles seront utilisés tout au long du manuscrit.

Les fractions combustibles : sont des fractions sèches incinérables contenues dans les ordures ménagères comme le plastique, le papier, le textile, le carton, le tétra-pack, les déchets hygiéniques, ...

Les fractions non combustibles : sont des fractions humides contenues dans les ordures ménagères comme la matière fermentescible et les fractions inertes comme le verre et les métaux.

Remarque : Les déchets fermentescibles pourraient être combustibles s'ils ont subi un bio-séchage afin d'éliminer le taux élevé d'humidité ce qui n'est pas le cas dans cette étude.

I Matériels et méthodes

Deux questionnaires ont été élaborés, le premier est dédié à la population et le deuxième est destiné aux agents techniques des services communaux.

I.1 Enquête de la population

Les citoyens sont les premiers responsables de la gestion des déchets, le niveau de conscience de la population contribue à l'efficacité d'un système de valorisation des ordures (Al-Khatib et al., 2010) et notamment en matière de tri à la source qui est considéré comme une étape clé dans tous les modes de traitement et de valorisation des déchets.

I.1.1 Echantillon enquêté

Le choix des échantillons est une opération très sensible d'où la nécessité d'avoir un échantillon représentatif. Pour le cas de la présente étude, une première analyse a été faite en éliminant des communes ayant une production des déchets inférieure à deux tonnes. La carte de la *figure 33* montre le nombre des échantillons prises dans chaque commune. En effet, toutes les communes ont presque le même niveau de vie, avec la dominance des zones populaires ce qui favorise l'homogénéisation de nos échantillons à l'exception de la commune urbaine de Khénifra dont on trouve des strates distincts ; les zones populaires, les zones villas et les habitats économiques. Dans ce propos, des échantillons ont été choisis de chaque strate.

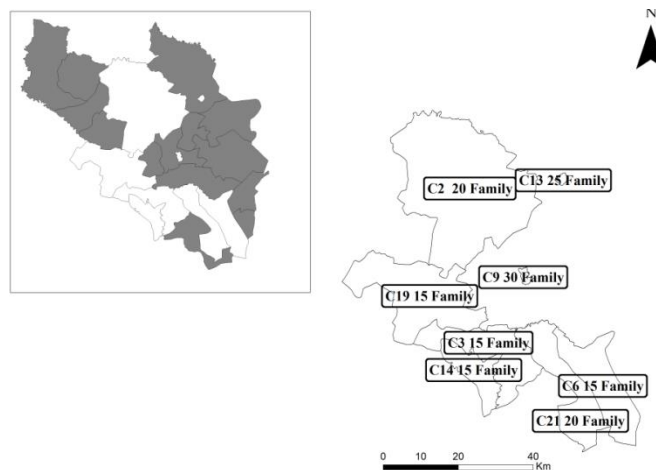


Figure 33: Distribution des échantillons enquêtés dans la zone d'étude

I.1.2 Choix des questionnes

Le questionnaire préparé est destiné à la population qui habite dans les communes choisies dans la zone d'étude. Le type des questionnes est porté sur les aspects généraux d'une chaîne de gestion des

déchets afin d'évaluer le niveau de conscience des habitants et leur niveau d'organisation vis-à-vis la problématique des ordures.

Les questionnes posées à la population sont :

- ✓ Par quel mode vous éliminez vos déchets ?

Cette question est importante, car le mode d'évacuation des déchets pourrait refléter le niveau de conscience des citoyens. En effet, quatre choix ont été proposés dont le premier est le porte à porte, le deuxième est le par apport, le troisième est l'élimination dans des points noirs et le dernier choix est le mode d'élimination non précis. Généralement le mode d'élimination dépend de la stratégie adoptée par la commune qui est le responsable de la collecte des déchets municipaux.

- ✓ Quelle est la fréquence d'élimination de votre poubelle ?

Les déchets sont des résidus non désirables par la population à cause des odeurs et l'aspect inacceptable par les citoyens. De ce fait et pour ne pas subir des risques d'odeurs générées par les poubelles, les déchets sont éliminés en dehors des ménages. Mais la fréquence de cette opération diffère et elle dépend de la qualité et de la quantité des déchets stockés dans la poubelle. Le fait par exemple de jeter les déchets des poissons dans la poubelle pousse la famille à éliminer cette dernière immédiatement à cause de la pollution olfactive générée par la matière organique et les résidus des poissons.

Dans cet questionnaire, on a posé des questionnes pour avoir une idée générale sur la fréquence d'élimination de la poubelle par famille. Dans ce propos, quatre choix de fréquence ont été proposés : **1** : une fois par jour ; **2** : une fois par deux jours ; **3** : une fois par trois jours ; **4** : autres.

- ✓ Quelle est la fraction la plus abondante dans votre poubelle ?

Cette question a été posée pour savoir le niveau de conscience des citoyens vis-à-vis l'aspect qualitatif des déchets ménagers. Le fait d'avoir une réponse prouve que le citoyen observe bien la poubelle et arrive à identifier la composition des ordures.

- ✓ Avez-vous une idée sur le tri des déchets ?

L'opération de tri est la clé de succès d'un système de gestion des déchets. De ce fait, nous avons décidé de poser cette questionne aux enquêtées pour savoir si ils ont déjà entendu par cette notion. D'autre part, l'enquête peut être considérée comme une sensibilisation, car elle va permettre à la population d'avoir une idée sur le tri des déchets.

- ✓ Est-ce que vous avez une idée sur la destination finale de vos déchets ?

La majorité des citoyens ne s'intéresse pas de la destination finale de leurs poubelles. De ce fait, cette question a été posée afin d'évaluer les connaissances de la population en terme de chaîne de gestion des déchets.

✓ Est-ce que vous pouvez s'engager dans un projet de tri des déchets ?

Cette question mesure la capacité et la volonté des citoyens à s'engager dans un projet de tri des déchets, et aussi de faire un diagnostic des problèmes que rencontrent les citoyens avec le tri à la source.

I.1.3 Totalité des questions posées dans l'enquête

En plus des questions déjà citées dans le paragraphe précédent, d'autres questions ont été posées comme il est montré dans le *tableau 31*.

Tableau 31: Questionnaire dédié aux citoyens

N°	Questions	Réponses					
		2/maison	3/ maison	4/ maison	5/ maison	6/ maison	7/ maison
1	Combien vous êtes à la maison?						
2	Par quel mode vous éliminez vos déchets?	Porte à porte		Par apport	Dans la nature		Non spécifié
3	Quelle est la fréquence d'élimination de la poubelle ?	Une fois par jour		Une fois par deux jours		Une fois par trois jours	
4	Quelle est la fraction la plus abondante dans votre poubelle?						
5	Avez-vous une idée sur le tri des déchets?	OUI			NON		
	Si OUI, avez-vous déjà fait le tri à la source?	OUI		NON			
	Si OUI, qu'elle est la fraction que vous avez triée?						
6	Avez-vous fait le compostage des déchets?	NON					
7	Quelle est la méthode de pré-collecte que vous préférez?	Porte -a- porte		Par apport		Collecte sélective	
8	Avez-vous une idée sur la destination finale de vos déchets?						
9	Avez-vous une idée sur l'économie circulaire?	OUI			NON		
10	Pouvez-vous s'engager dans un projet de	OUI			NON		

	tri à la source ?		
	Si- Oui. Quelle est le nombre de fractions que vous pouvez trier?	2 fractions	3 fractions
			Autres

I.2 Enquêtes des communes

Selon la loi organique n°113-14, les communes territoriales sont les responsables de la collecte des ordures. Afin de bien gérer ce secteur, la commune doit avoir un staff technique et humain bien formé en assainissement solide. Dernièrement, la majorité des communes urbaines au Maroc ont délégué le service de gestion de propreté au secteur privé qui possède une expérience professionnelle dans le domaine. Pour le cas des communes choisies dans la présente étude, seule la commune de Khénifra qui gère le service de collecte des déchets par mode de gestion déléguée. En revanche, la gestion est assurée par les services techniques des communes dans le reste de la province en attendant les résultats d'une étude de faisabilité menée par le groupement des communes afin de déléguer le service de propreté pour toutes les communes de la province.

I.2.1 Communes enquêtées

Les communes enquêtées sont présentées dans la carte de la *figure 34*. Le choix des communes a été justifié par le tonnage produit avec l'élimination des communes dont le tonnage est inférieur à deux tonnes/jour.

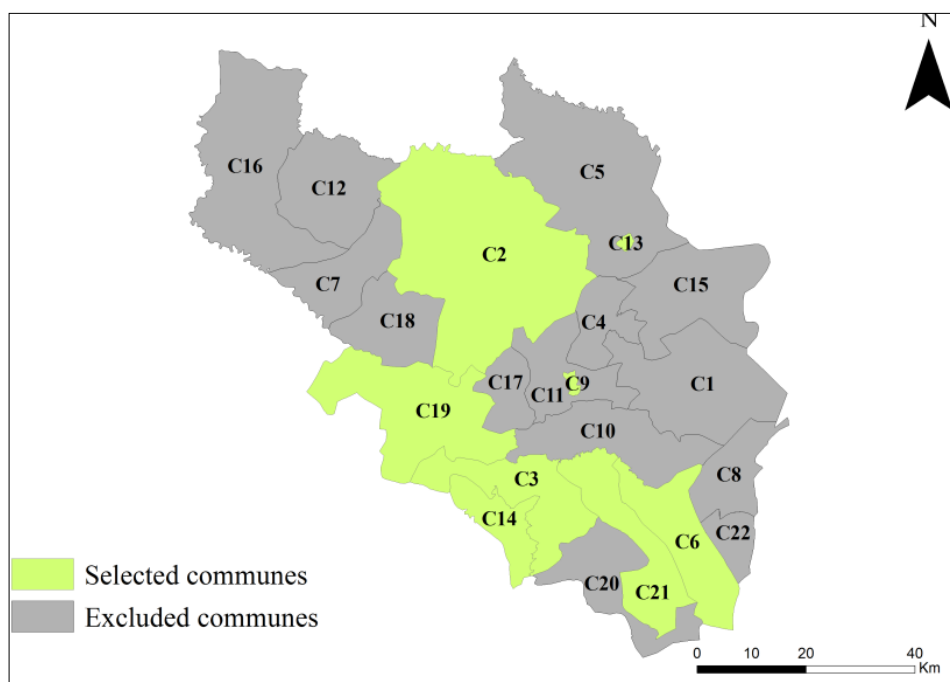


Figure 34: Les communes de la zone d'étude choisies pour l'enquête des services communaux

1.2.2 Principales questions

Plusieurs questions ont été posées aux agents des services techniques s'occupant de la gestion des déchets dans les communes. Les principales questions sont :

- ✓ Avez-vous une idée sur la loi Marocaine de la gestion des déchets ?

Le cadre législatif en matière de gestion des déchets est assez développé au Maroc avec l'introduction de la 28-00 sur les déchets et la mise en œuvre du plan national des déchets ménagers (PNDM). Les communes et notamment le service de l'environnement doit savoir et bien maîtriser cette loi, car elle a des apports importants en matière de l'assainissement solide qui entre dans les compétences propres de la commune comme il a été évoqué dans la nouvelle loi cadre 113-14 des collectivités territoriales. Nous avons commencé par cette question pour savoir si les cadres techniques communaux sont au courant de l'évolution que connaît l'arsenal juridique au Maroc en matière de gestion des déchets municipales.

- ✓ Est-ce que vous avez déjà fait un projet pilote de la collecte sélective ?

Le Maroc reste très loin de la collecte sélective des déchets, cette opération dépend de la commune et de niveau de conscience de la population. Pour ce faire, cette question a été posée afin de savoir si la commune a déjà eu même l'idée de la mise en place de la collecte sélective.

- ✓ Quels sont les problèmes que vous trouvez dans le service de collecte des déchets ?

La prestation de collecte des rejets solides est un service très sensible à cause de l'image que présentent les déchets dans la mentalité de la population. Pour ce faire, les élus ont subi des pressions de la part des citoyens à cause de la défaillance de service de collecte des ordures. Généralement nous trouvons un conflit entre les citoyens et le service de collecte des déchets. Les habitants rencontrent des problèmes liés notamment au non-respect de l'horaire de passage du camion, l'absence de lavage des bacs à ordures et les fuites des lixiviats par les bennes tasseuses. De la part de la commune ou du délégataire, les principales contraintes rencontrées se manifestent dans le vandalisme des bacs, le non-respect de l'horaire par les citoyens et le non-respect des endroits de vidage des déchets. C'est la raison pour laquelle cette question a été introduite dans le questionnaire.

1.2.3 Autres questions

D'autres questions qui entrent dans le cadre de la gestion des déchets ont été posées aux agents des services communaux pour avoir une idée sur le niveau de conscience des responsables sur la collecte et la gestion des déchets. Les questions sont citées ci-après :

Question 1 : Avez-vous une idée sur la loi de gestion des déchets au Maroc?

Question 2 : Avez-vous profité d'une formation en gestion des déchets ?

Question 3 : Quels sont les types de déchets que vous collectez ?

Question 4 : Par quel mode vous gérez le service de propreté?

Question 5 : Quelle est l'estimation de la production journalière des déchets ?

Question 6 : Quel est le mode de collecte adopté ?

Question 7 : Avez-vous déjà fait une collecte sélective?

Sous question 7 : Si OUI, quelles sont les fractions collectées?

Question 8 : Quels sont les problèmes que vous trouvez dans la collecte des déchets?

Question 9 : Quel est le mode d'élimination des déchets utilisé ?

Question 10 : Avez-vous une idée sur le compostage?

Sous question 10.1 : Si OUI, avez-vous fait un projet pilote ?

Sous question 10.2 : Si OUI, le projet a eu succès?

Sous question 10.3: Si NON? Quelles sont les sources de problème de l'échec?

Question 11 : Avez-vous une idée sur les RDF ?

Question 11.1 : Si OUI, est ce que vous êtes près de s'engager dans un projet de production de RDF?

II Résultats et discussion

Les résultats des enquêtes ont permis de soulever les principaux problèmes de la gestion des déchets liés aux citoyens et aux communes territoriales.

II.1 Résultats de l'enquête de la population

Les résultats du questionnaire de la population sont présentés ci-après :

Question 1 : Quel est le nombre de personnes dans le ménage ?

A partir du graphique (*figure 35*) nous constatons que 32,9% des familles enquêtées sont constituées par cinq membres et 22,52% constituées par quatre membres. En revanche, aucune famille parmi les échantillons enquêtés ne se compose pas un seul membre.

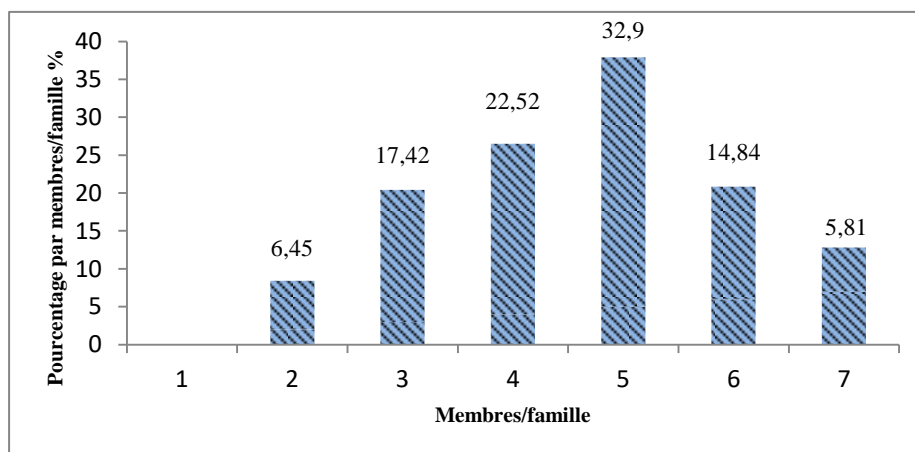


Figure 35: Nombre de membre par famille

Question 2 : Par quel mode vous éliminez votre poubelle?

Plus que la moitié des familles enquêtées éliminent leurs déchets par le mode traditionnel porte à porte, 25,16% des familles utilisent le mode par apport en mettant leurs déchets dans les bacs à ordures ou dans des caissons métalliques et 5,81% utilise tous les modes d'élimination (figure 36).

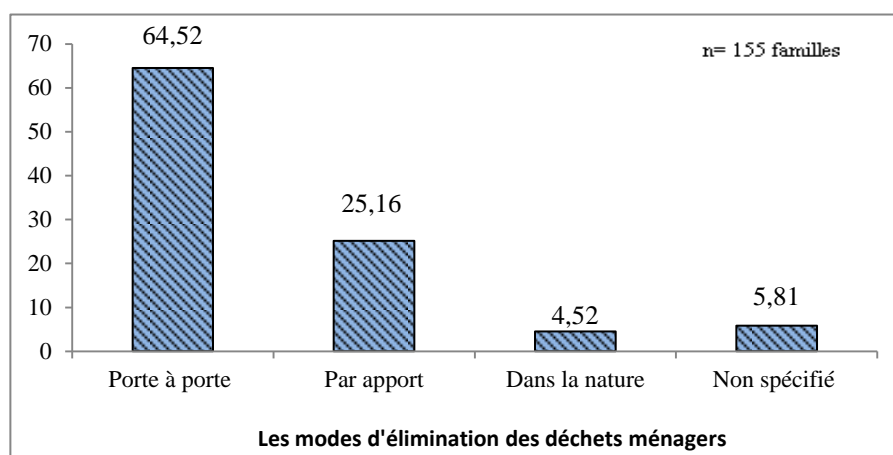


Figure 36: Modes d'élimination des ordures par les enquêtés

Question 3 : Quelle est la fréquence d'élimination de votre poubelle ?

L'élimination des ordures de la maison est une priorité des travaux de ménage, elle dépend de plusieurs facteurs à savoir, la qualité et la quantité des déchets, la disponibilité des éléments de pré-collecte,... Les résultats de l'enquête pour la présente questionne (figure 37) montrent que 50,97% des familles éliminent les ordures une fois par deux jours et 40,65% éliminent les déchets une fois par jour alors que 8,39% des enquêtés se débarrassent de leurs poubelles une fois par trois jours.

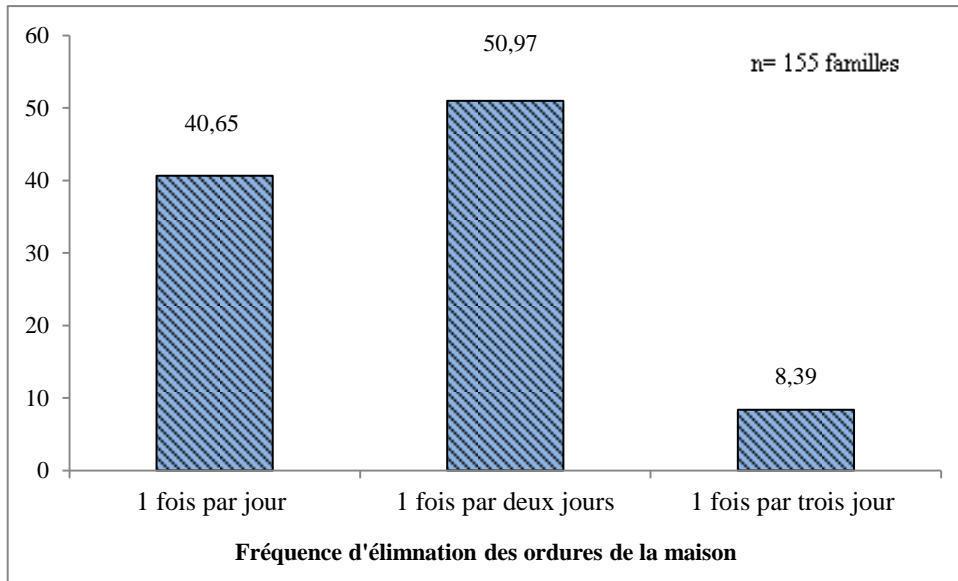


Figure 37: Fréquence d'élimination des ordures par les enquêtés

Question 4 : Quelle est la fraction la plus abondante dans votre poubelle?

La réponse à cette question était la même pour tous les enquêtés. En effet, 100 % ont répondu par l'abondance de la matière fermentescible dans la poubelle.

Question 5 : Avez-vous une idée sur le tri des déchets?

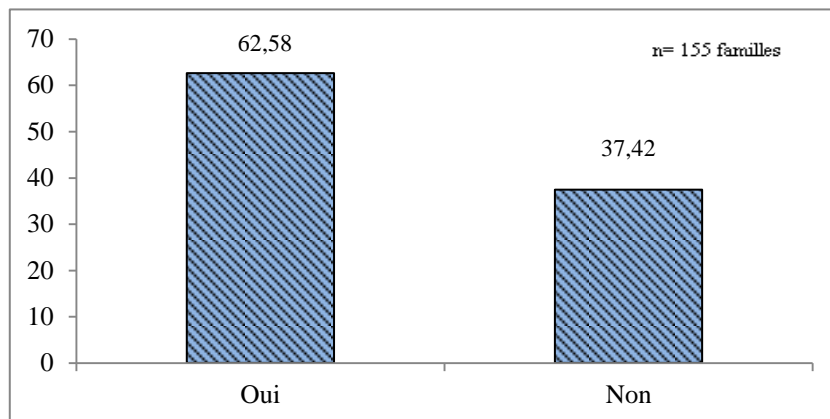


Figure 38: Les enquêtés ayant une idée sur le tri des déchets

A partir des résultats de l'enquête, 62,52% des enquêtés ont une idée générale sur le tri des déchets et 37,2% n'ont jamais entendu par ce terme (*figure 38*).

Sous-questionne 5.1. Si OUI, avez-vous déjà fait le tri à la source?

44,33% des familles qui connaissent le tri ont déjà pratiqué cette opération et 55,67% n'ont jamais fait un tri (*figure 39*).

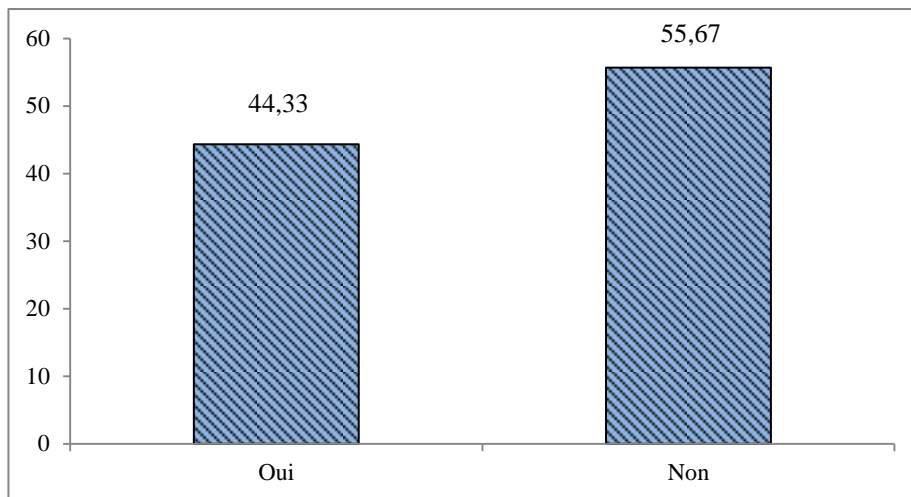


Figure 39: Les enquêtés ayant exercés un tri

Sous-questionne 5.2. Si OUI, qu'elle est la fraction que vous avez triée?

30% des familles qui ont déjà pratiqué le tri ont trié les résidus du pain sec, et 70% des familles ont trié le pain sec et les épluchures des fruits et des légumes (*figure 40*).

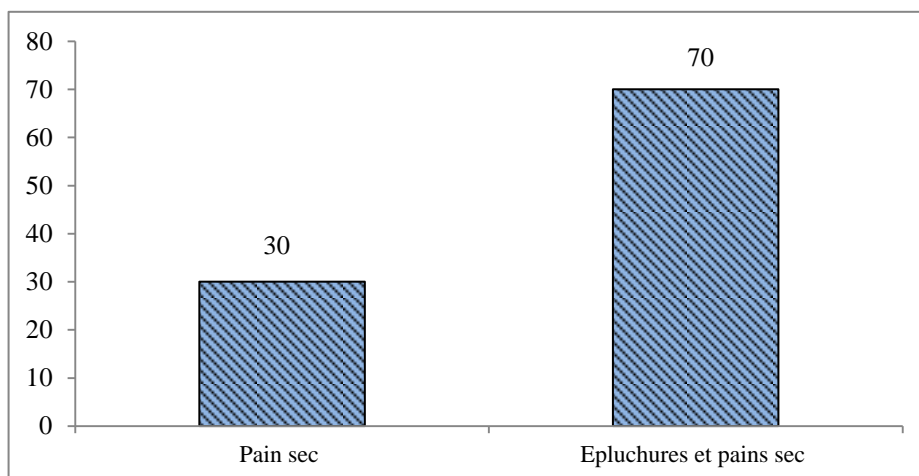


Figure 40: Fractions triées par les enquêtés

Question 6 : Avez-vous fait le compostage des déchets?

Les résultats montrent que 100% des enquêtés n'ont jamais essayé de faire le compostage.

Question 7 : Quelle est la méthode de pré-collecte que vous préférez?

A partir des résultats de l'enquête (*figure 41*), le mode favorable d'élimination des déchets diffère d'une famille à une autre, 41,94% préfère l'élimination des déchets en mode par apport, 32,26% préfère la collecte sélective et 25,8 % préfère le mode traditionnel en porte à porte.

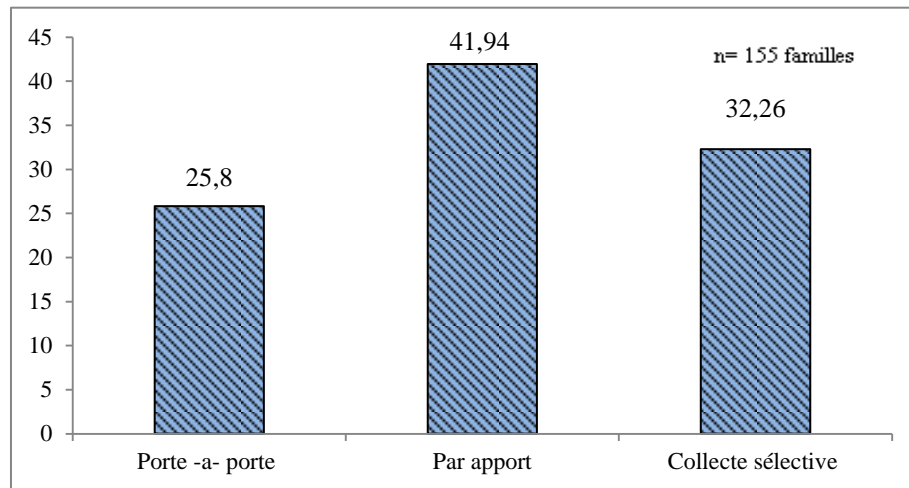


Figure 41: Mode de collecte favorable des déchets par les enquêtés

Question 8 : Avez-vous une idée sur la destination finale de vos déchets?

Les résultats montrent que 100% des enquêtés connaissent que la destination finale des déchets est la décharge provinciale.

Question 9 : Avez-vous une idée sur l'économie circulaire?

97,5% des enquêtés n'ont aucune idée sur l'économie circulaire et que 2,5% ont entendu par le terme (figure 42).

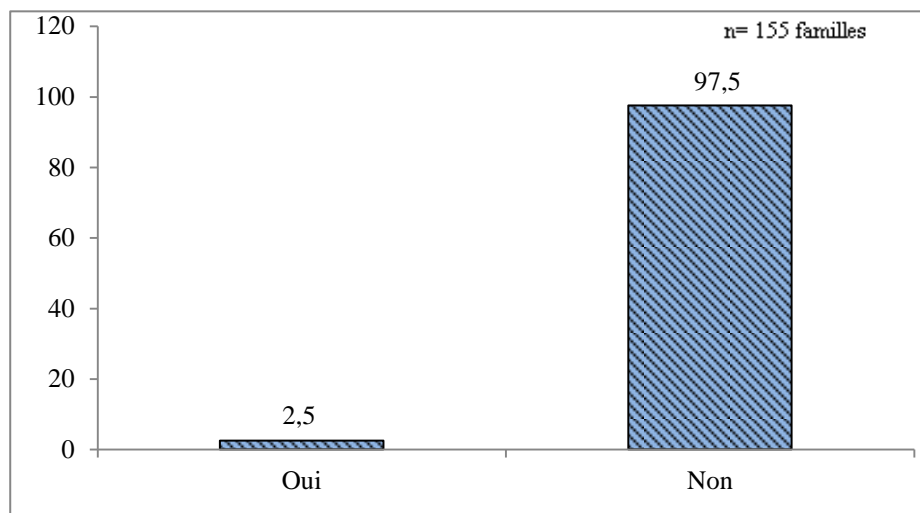


Figure 42: Les enquêtés ayant une idée sur l'économie circulaire

Question 10 : Pouvez-vous s'engager dans un projet de tri à la source ?

L'engagement d'une famille dans une opération de tri des déchets à la source est très difficile. Cette action dépend de l'éco-conception des citoyens, 51,61% des enquêtés ont répondu favorablement sur cette question (figure 43).

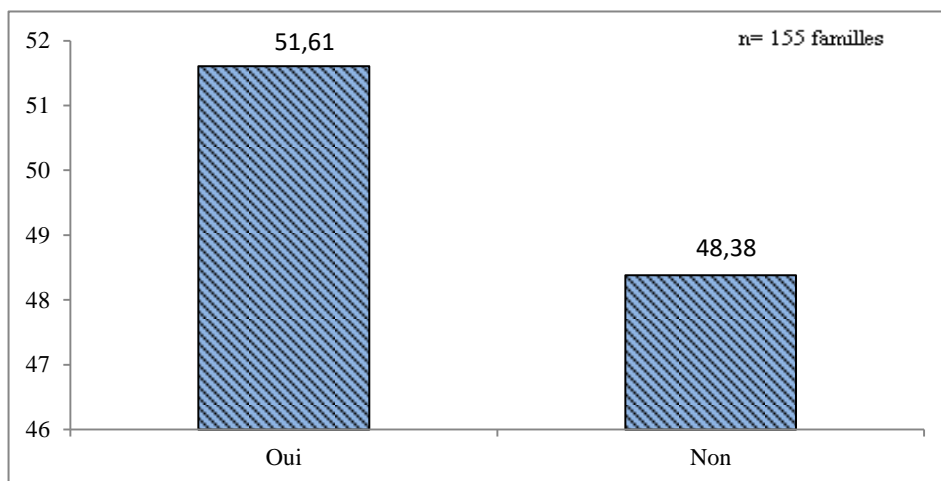


Figure 43: Les enquêtés ayant une volonté de faire un tri à la source

Sous- question 10 : Si Oui, quel est le nombre de fractions que vous pouvez trier?

Plus le nombre de fractions triées est grand plus le produit valorisé serait de bonne qualité, 99% de la population enquêtée pourrait s’engager dans un tri en deux fractions et que 1% sont près de trier leurs déchets en trois fractions (figure 44).

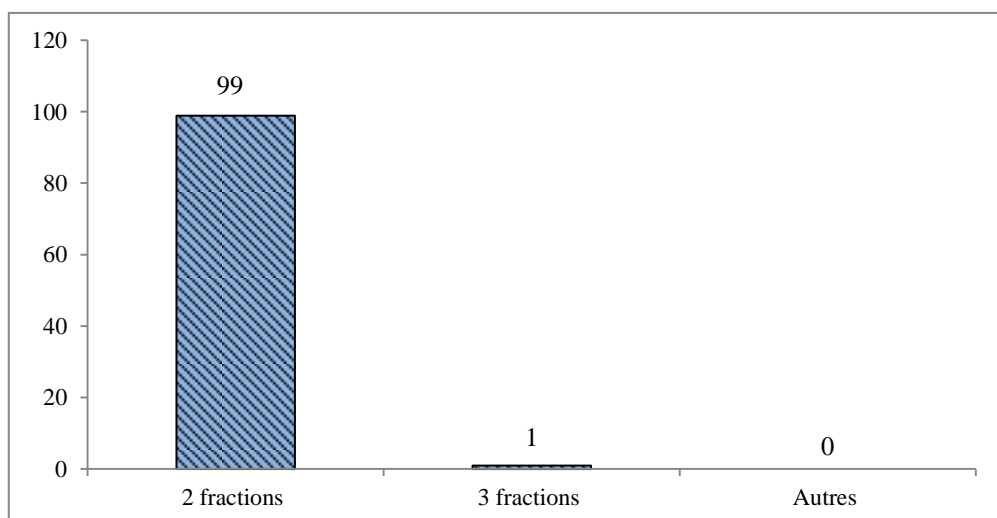


Figure 44: Nombre de fractions pouvant être triées par les enquêtés

II.2 Résultats de l’enquête des communes

Les résultats de l’enquête des services communaux sont présentés dans le *tableau 32*.

Tableau 32: Résultats de l'enquête des communes

N°	Question	Code des communes							
		C2	C3	C6	C9	C13	C14	C18	C21
1	Avez-vous une idée sur la loi de gestion des déchets au Maroc?	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
2	Avez-vous profitez d'une formation en gestion des déchets ?	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
3	Quels sont les types de déchets que vous collectez ?	DMA	DMA	DMA	DMA	DMA	DMA	DMA	DMA
4	Par quel mode vous gérez le service de propreté?	Commune	Commune	Commune	Commune	Délégué	Commune	Commune	Commune
5	Quelle est l'estimation de production journalière des déchets ?	10 t/jour	6 t/jour	4 t/jour	85 t/jour	25 t/jour	3 t/jour	4 t/jour	7 t/jour
6	Quel est le mode de collecte adopté ?	Porte à porte	Porte à porte	Porte à porte	Porte à porte et par apport	Porte à porte et par apport	Porte à porte	Porte à porte	Porte à porte
7	Avez-vous fait une collecte sélective?	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
7.1	Si OUI, quelles sont les fractions collectées?	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Quels sont les problèmes que vous trouvez dans la collecte des déchets?	Non-respect de l'horaire de passage	Non-respect de l'horaire de passage	Non-respect de l'horaire de passage	Non-respect de l'horaire de passage et vandalisme des bacs	Non-respect de l'horaire de passage et vandalisme des bacs	Non-respect de l'horaire de passage	Non-respect de l'horaire de passage	Non-respect de l'horaire de passage
9	Quel est le mode d'élimination des déchets utilisé ?	Mise en décharge	Mise en décharge	Mise en décharge	Mise en décharge	Mise en décharge	Mise en décharge	Mise en dépotoir	Mise en décharge
10	Avez-vous une idée sur le compostage?	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Yes
10.1	Si OUI, avez-vous fait un projet pilote?	-	-	-	Non	Non	Non	-	Non
10.2	Si OUI, le projet a eu succès?	-	-	-	-	-	-	-	-
10.3	Si NON? quelles sont les sources de problème de l'échec?	-	-	-	-	-	-	-	-
11	Avez-vous une idée sur les RDF ?	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
11.1	Si OUI, est ce que vous êtes près de s'engager dans un projet de production de RDF?	Non	-	-	-	-	-	-	-

II.3 Interprétation des résultats des enquêtes

Les résultats des enquêtes nous ont permis d'analyser les principales sources de défaillance du système de gestion des DMA et de les classer en trois niveaux ; organisationnel, conscience et participatif.

II.3.1 *Enquête de la population*

➤ *Au niveau organisationnel*

A partir des résultats des enquêtes, il est remarqué que la majorité des enquêtés éliminent leurs déchets par le mode porte à porte. En effet, le mode d'élimination dépend de la politique de gestion suivie par les services communaux, il y a des communes qui assurent une pré-collecte en se basant sur le mode classique à 100% (porte à porte) c'est le cas de la majorité des communes de la zone d'étude, de ce fait la population n'aura pas autre choix que l'attente du passage du camion de collecte pour se débarrasser de la poubelle, d'autres communes comme Khénifra et M'rirt, mettent en place des bacs dans des points de regroupement et en même temps une collecte en porte à porte est offerte pour que le taux de collecte soit élevé, dans ce cas, les citoyens ont deux choix d'élimination des déchets. [Abbott et al.,\(2011\)](#) a montré dans son étude que la collecte en porte à porte est la plus efficace et notamment dans le cas de la mise en place d'une collecte sélective. Ainsi, la distance entre les bacs et les maisons n'a aucun effet sur l'efficacité de collecte selon l'étude de [Nattapon et al., \(2019\)](#). Les enquêtés qui éliminent les déchets dans la nature soit ils sont dans les communes qui collectent les déchets en porte à porte et le temps de passage du camion ne les convient pas, donc ils cherchent des endroits dans la nature pour y mettre leur déchets ce qui génère des points noirs, soit les enquêtés ont juste le souci de se débarrasser des déchets en dehors de leurs maisons sans avoir aucun intérêt de l'état de l'environnement. Concernant la fréquence d'élimination des déchets, les résultats ont montré que 50% des enquêtés éliminent leur déchet une fois par deux jours, plusieurs paramètres peuvent s'intervenir dans la fréquence d'élimination, à savoir, la disponibilité des moyens de pré-collecte, la quantité des déchets générée chaque jour, le cas de présence des invités ou d'un événement spécial, de ce fait la famille peut se débarrasser des déchets même deux ou trois fois par jour. L'aspect qualitatif peut aussi affecter la fréquence d'élimination de la poubelle, il y a des déchets putrescibles qui dégagent de nuisances odeurs (déchets de poissons, épluchures des fruits et légumes, couches bébés ...), par conséquent, la poubelle est éliminée du ménage le plus vite possible ([Sanjib et Carol, 2014](#)). Ainsi, le paramètre saisonnier à impact sur la fréquence d'élimination des ordures de la maison ; en période hivernale les quantités de déchets produites sont faibles par rapport à la production en période estivale, ainsi les odeurs sont générées d'une manière intensive en période estivale à cause de la température qui stimule les réactions biochimiques ([Ouigmane et al., 2021](#)).

➤ *Au niveau de conscience*

La conscience et le niveau de sensibilisation de la population dans la gestion des ordures est la clé principale pour une gestion efficace du secteur. A partir de quelques questions présentées dans le questionnaire, on a pu détecter qu'il y a une conscience relative des citoyens, tous les enquêtés ont remarqué que la poubelle est constituée principalement de la fraction putrescible. En outre, tous les enquêtés connaissent que la destination finale des déchets dans la zone d'étude est la mise en décharge et plus que la moitié des enquêtés connaissent la notion de tri des déchets. En revanche, 2,5% des enquêtés ont une idée sur l'économie circulaire. Une mauvaise conscience des citoyens peut influencer les habitudes observées et notamment la création des points noirs, le non-respect des endroits d'élimination des ordures et le vandalisme des bacs (Babaei et al., 2015)

➤ *Au niveau participatif*

La participation de la société civile dans une approche intégrée de gestion des ordures est très importante, le succès d'un projet de valorisation des déchets dépend de la participation des citoyens et notamment en matière de tri des déchets. Les résultats de l'enquête de 155 familles dans la zone d'étude ont montré qu'il y a des familles qui pratiquent le tri d'une manière indirecte, les fractions triées ont une valeur économique ; le pain sec est vendu aux grossistes et les matières putrescibles sont utilisées comme aliment des animaux élevés par certaines familles. Par contre, les déchets putrescibles triés ne sont pas utilisés comme matière première pour produire un compost ce qui peut être expliqué par le manque d'espace spécial pour ce faire ou par manque des informations sur les avantages du compost produit à base des ordures. 51% des enquêtés sont prêts pour s'engager dans un projet de tri à la source d'une manière formel en deux fractions, le tri à la source peut être influencé par plusieurs paramètres (l'âge, le sexe, le niveau scolaire, le niveau de vie,...) (Berger, 1997 ; Granzin et Olsen, 1991; Oskamp et al., 1991; Stern et al., 1995). Ainsi, plus le nombre des fractions triées est grande plus l'opération de tri deviendra plus compliquée pour le citoyen et plus aisée dans l'aval de la chaîne de valorisation. Puisque la poubelle de la zone d'étude est riche en matière putrescible qui contribue à l'augmentation du taux de l'humidité, il est alors recommandé de séparer les déchets en deux fractions ; les fractions humides et les fractions sèches.

II.3.2 Enquête des communes

Le secteur de gestion des déchets constitue le plus grand souci pour les municipalités (Ahmed and Ali, 2004 ; Hussein et al., 2018) et notamment dans les pays en développement (Guerrero et al., 2013). Pour soulever les problèmes liés à la gestion des déchets, il n'est pas suffisant d'enquêter que les citoyens qui sont les responsables de la production des déchets. En effet, la source du problème peut être liée aussi à la politique de gestion de propreté par la commune, étant donné que c'est elle qui est le premier responsable de ce secteur comme il est mentionné dans la loi 113.14 (DGCL, 2015).

➤ *Au niveau de formation*

La formation des agents communaux en matière d'assainissement solide est une priorité étant considéré que le secteur de gestion des déchets solides s'est développé pendant les dernières années en introduisant des technologies en pré-collecte, en collecte et en élimination et ou valorisation (Rada et al., 2013). En outre, l'arsenal juridique a été bien développé dans la majorité des pays et notamment au Maroc dont la loi 28-00 a été introduite en 2006 comme il est bien détaillé dans le chapitre 1 de la partie 1 du présent rapport. Deux communes sur les huit enquêtées n'ont aucune idée sur la loi de gestion des déchets au Maroc. En effet, la connaissance du cadre juridique (la loi et les décrets d'application) est très importante afin de bien maîtriser le secteur des déchets et de travailler d'une manière formelle et professionnelle. Cela peut être expliqué par l'absence des formations, aucun service n'a pas profité d'une formation selon les réponses sur la question N°2 du questionnaire. Concernant les connaissances en mode d'élimination et de valorisation, trois services communaux sur huit ont une idée sur le compostage et aucun enquêté n'a aucune information sur la filière de RDF/CSR. En effet, le compostage est la filière la plus étudiée au Maroc dans la gestion des déchets ménagers et le RDF reste une gestion nouvelle pour la majorité des communes. La formation des services de gestion des ordures et des élus est très importante, car le fait de les rendre conscient que les déchets ménagers constituent une source importante en énergie et en matière peut changer les pensées et la politique de la gestion de l'assainissement solide.

➤ *Au niveau organisationnel*

L'organisation dans la gestion des déchets est la base du succès de ce service, les communes doivent avoir un plan d'action comportant les horaires de collecte, les plans des circuits de collecte et de balayage, la gestion des ressources humaines,... Les résultats de l'enquête montrent que les communes distinguent déjà entre les DMA et les déchets dangereux, toutes les communes ne collectent que les DMA selon leurs réponses. En effet, la collecte des déchets dangereux peut causer plusieurs risques sanitaires des éboueurs de collecte (Kandasamy et al., 2013 ; Poole and Basu, 2017 ; Shiferaw et al., 2012). Concernant le mode de gestion des déchets, jusqu'à l'année 2021, toutes les communes assurent la gestion à leurs propres matériels et ressources humaines à l'exception d'une seule commune qui a délégué le service au secteur privé. Le mode de collecte est le porte à porte dans toutes les communes à l'exception de deux communes dont il y a aussi le par apport. Après avoir collecté les déchets, ils sont transportés vers la décharge provinciale pour l'enfouissement.

➤ *Au niveau participatif*

La motivation des services communaux et leur envie pour une gestion durable est exemplaire de ce service peut constituer un point fort de départ d'une gestion intégrée et efficace des déchets. Les communes enquêtées n'ont jamais fait des essais de collecte sélective, ni projet pilote de compostage, la priorité des communes est d'augmenter le taux de collecte et d'entretenir le matériel de pré-collecte ce qui reste très classique et limité. Les municipalités n'ont pas réussi à gérer les déchets solides en raison

des facteurs financiers. Une gestion intégrée des ordures ménagères nécessite des énormes dépenses pour assurer le service (Sharholy et al., 2007), l'absence de soutien financier, les ressources limitées, la réticence des citoyens à payer pour le service sont tous des causes de la défaillance de la gestion des DMA (Sujauddin et al., 2008). Sharholy et al. (2008) ont indiqué que la participation du secteur privé est un facteur susceptible d'améliorer l'efficacité du système.

II.3.3 Récapitulatif

Le succès de la politique d'une gestion des déchets dépend de niveau de conscience des générateurs (citoyens) et les responsables sur l'élimination des déchets (communes ou sociétés délégataires), la participation de la population à un rôle important dans le succès de la gestion des déchets (Keramitsoglou and Tsagarakis, 2013; Krook et al., 2007). Une interaction entre les deux doit être mise en place afin d'enlever tous les conflits qui rend la gestion du service défaillante. La relation doit être basée sur la communication constructive entre les deux parties et notamment dans la phase commune (pré-collecte) comme il est montré dans la *figure 45*.

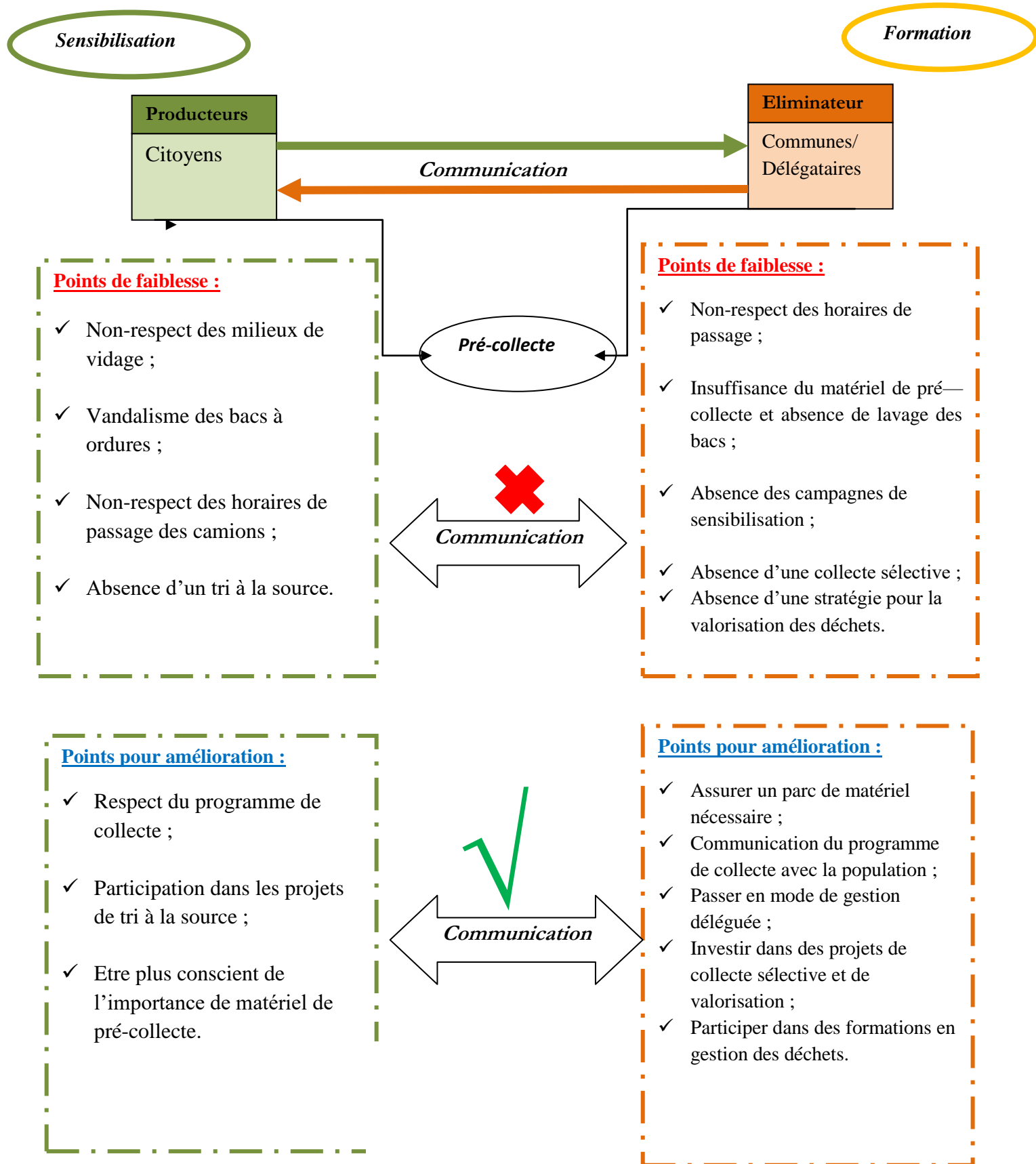


Figure 45: Points de faiblesse et points pour amélioration de la gestion des déchets dans la zone d'étude

CHAPITRE 2 : PROJET PILOTE DE TRI A LA SOURCE DES ORDURES MENAGERES

Le secret de succès d'un traitement et de valorisation des déchets est fortement lié à l'efficacité de tri à la source. En effet, cette opération facilite le traitement des déchets et garantit un produit valorisable de bonne qualité. Plus le nombre de fractions est élevé plus l'opération de tri est efficace. La mise en place et le succès d'un tri à la source dépend de l'approche participative des citoyens.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le comportement des citoyens vis-à-vis le tri à la source des déchets afin d'avoir deux fractions ; une fraction combustible et une fraction non combustible qui peut faire l'objet d'une production de RDF.

I Matériels et méthodes

I.1 Description

Cette partie de la présente étude a été menée afin d'évaluer le degré de conscience de la population en termes de gestion des déchets en mesurant l'efficacité de tri à la source des DMA en fractions combustibles et non combustibles. Le choix de ces deux fractions est justifié par la thématique globale de la présente recherche. En effet, les fractions combustibles triées correctement pourraient être utilisées comme matière première de production d'un RDF de bonne qualité.

L'objectif de ce travail est de mettre en place un projet pilote de tri à la source en distribuant deux poubelles avec des couleurs différentes pour les familles afin de faire un suivi de leurs comportements vis-à-vis la séparation des déchets à la source.

I.2 Echantillon

Parmi 160 familles enquêtées d'une manière aléatoire dans un centre communale qui fait partie de la zone d'étude, 100 familles ont accepté de s'engager dans le projet pilote de tri à la source.

L'échantillon pris représente 4,2% de la population de la commune choisie. En effet, le nombre de ménages est de 2377 selon le dernier recensement global de la population en 2014.

I.3 Méthodologie

Avant de distribuer les poubelles, une rencontre a été organisée avec les familles participantes. Lors de la réunion, l'objectif, la méthodologie et l'intérêt de ce de travail a été expliqué aux familles en présence d'une association active dans le domaine de l'environnement et de développement durable (*figure 46*). Puis, deux poubelles avec des couleurs différentes ont été distribuées pour chaque famille afin de réaliser un tri à la source en deux fractions (mettre les déchets humides et non incinérables

dans la poubelle grise et les déchets secs incinérables dans la poubelle marron) comme il est montré dans le schéma explicatif dans la *figure 47*.



Figure 46: a ; Rencontre avec les familles pour expliquer l'objectif du projet. b ; Flyer distribué par l'association

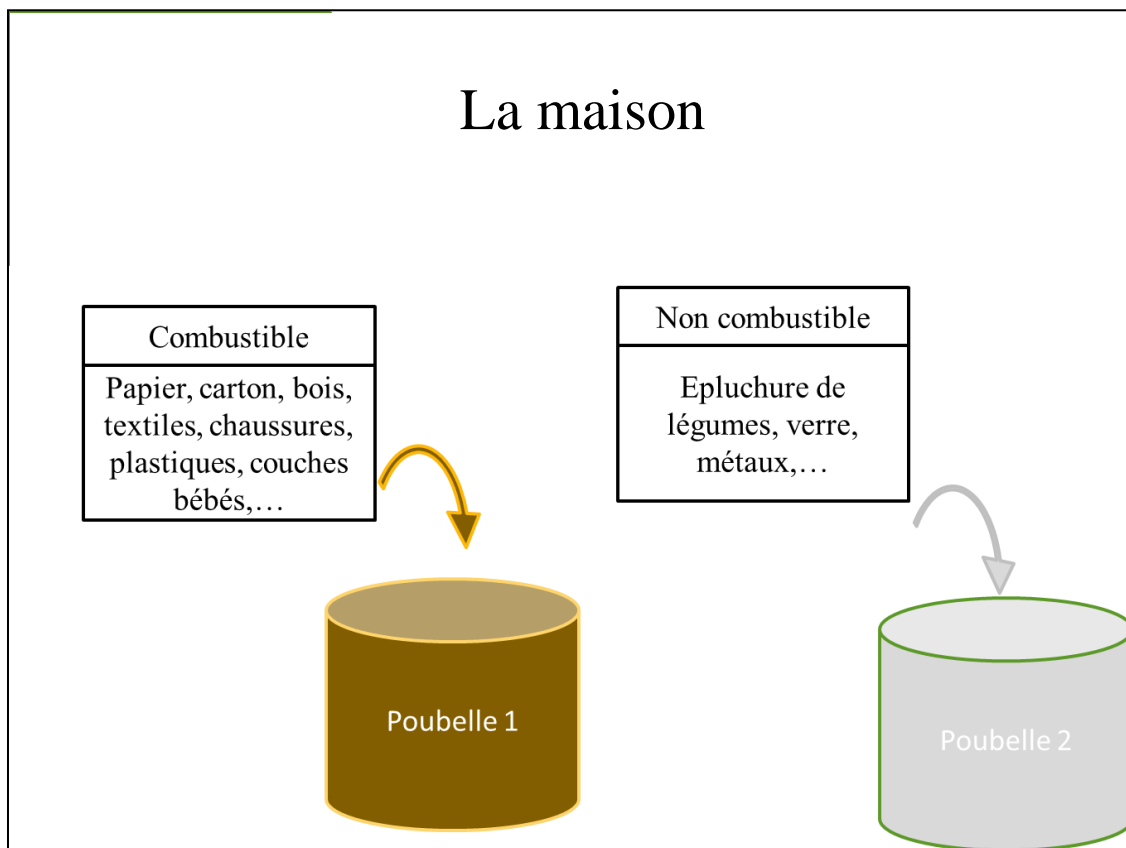


Figure 47: Schéma explicatif de la procédure de tri

Un suivi pour deux mois a eu lieu, à chaque fois, des familles sont choisies pour contrôler leurs poubelles et évaluer l'opération de tri. Le suivi a été subdivisé en trois périodes de 20 jours afin d'analyser la capacité de la population à trier les déchets en une longue période (annexe 1). L'efficacité de séparation des déchets est calculée comme il est montré dans l'équation ci- après (Haibin et al., 2016 ; Nattaponv et al., 2019). Cet indice indique le taux d'élimination correcte des déchets cibles (fractions combustibles).

$$\text{Efficacité de séparation} = \frac{\text{Le poids des déchets correctement éliminés dans la poubelle}}{\text{Le poids des déchets dans la poubelle}} \times 100\%$$

Le suivi a été fait pendant deux mois, durant cette période 60 prélèvements de poubelles ont été fait afin de calculer l'efficacité de séparation. Vers la fin de cette période, des enquêtes des familles participantes dans ce projet ont été menées afin de soulever les principaux défis rencontrés durant cette expérience. Les questions de l'enquête sont :

- ✓ Est-ce que vous êtes satisfait de l'expérience de tri ?
- ✓ Quels sont les problèmes que vous avez rencontré ?
- ✓ Quelles sont vos propositions pour améliorer le tri à la source ?

II Résultats et discussion

II.1 Efficacité de séparation

Les résultats de calcul de l'efficacité de tri à la source sont montrés dans la *figure 48*.

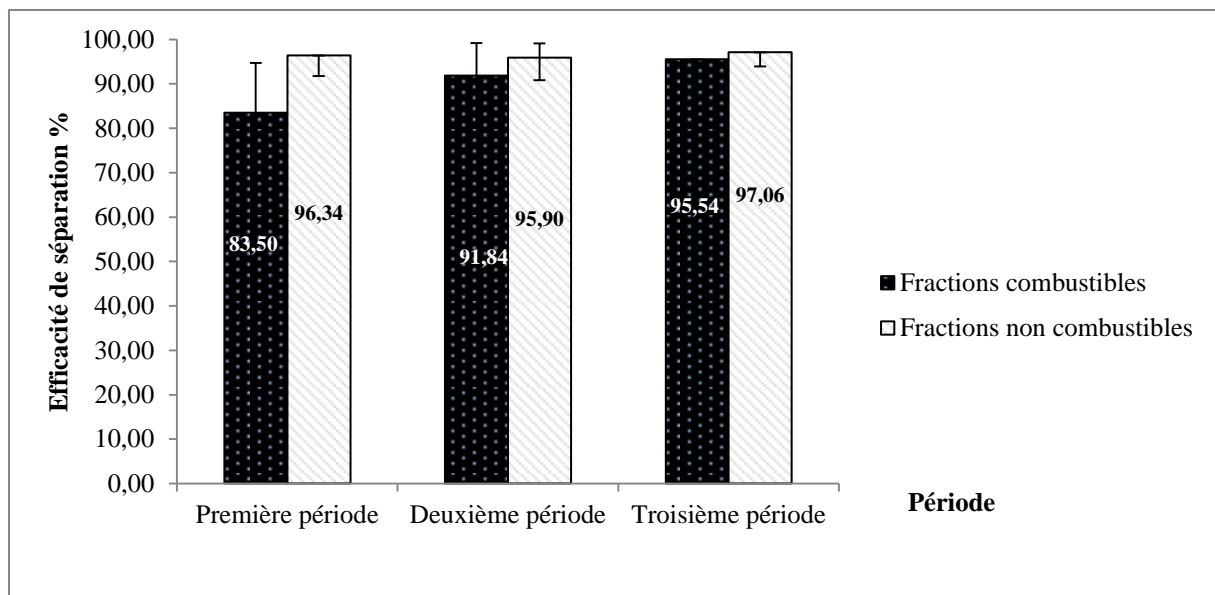


Figure 48: Résultats de calcul de l'efficacité de tri pour les fractions combustibles et non combustibles

A partir des résultats montrés dans la *figure 48*, il est remarqué que l'efficacité de tri des fractions combustibles a passé de 83,5% pendant la première période de suivi à 95,54% dans la troisième période, ce qui montre que la population s'est adaptée avec l'opération de tri. Dans l'étude de [Haibin et al., \(2016\)](#) qui a été menée sur le tri à la source des déchets ménagers dans la ville de Changsha en chine, il a trouvé que le tri en deux fractions est le plus efficient avec une efficacité de tri de 87,8% pour les déchets fermentescibles et 79,5% pour les déchets secs, c'est dans ce propos que le tri en deux fractions a été choisi dans cette étude étant donné que le nombre de fractions a un effet sur l'efficacité

de tri (Keramitsoglou and Tsagarakis, 2018). D'autres paramètres peuvent influencer l'efficacité du tri comme le sexe, l'âge, la communauté sociale et culturelle (Oztekin et al., 2017 ; Zhang et al., 2017). Ainsi, l'éducation à la conception de la classification des déchets est également l'un des facteurs les plus incommodes sur la séparation des déchets (Lee et al., 2017), malgré que nous avons expliqué aux citoyens la classification des fractions combustibles, elles ont été trouvées dans la poubelle réservée aux fractions non combustibles (annexe 1). C'est dans ce propos que l'éducation environnementale est très importante pour l'acquisition d'une éco-conception, elle est considérée comme la solution fondamentale pour une séparation efficace des déchets à la source. En effet, il existe une forte corrélation entre de l'éducation environnementale et les connaissances environnementales (Zsóka et al., 2013). Les personnes les plus éduquées sont plus préoccupés par la qualité de l'environnement et sont plus motivés à adopter un comportement respectueux de l'environnement, car ils sont plus conscients des dommages potentiels (Oğuz et al., 2010 ; Lozano et al., 2013).

Concernant les poubelles réservées à la matière non combustible, il est remarqué que l'efficacité de tri est plus élevée par rapport à celle de la fraction combustible. En effet, les déchets au Maroc sont constitués d'un taux élevé de matière putrescible (Ouigmane et al., 2018), composée principalement des épluchures des légumes. A chaque préparation de repas, ce type de déchets est généré avec un poids massique plus élevé à cause de l'humidité, ils sont donc produits ont un seul moment ce qui facilite leur mise en poubelle réservée aux fractions humides (Haibin et al., 2016). En revanche, les fractions combustibles sont produites à différents moment durant la journée par tous les membres de famille, ce qui explique le nom respect du tri de cette fraction.

II.2 Résultats de l'enquête après le tri

Après la période de suivi de tri, des questions ont été posées aux familles qui ont participé dans ce projet pilote.

- ✓ Est-ce que vous êtes satisfait de l'expérience de tri ?

Les résultats de cette question sont représentés dans la *figure 49*.

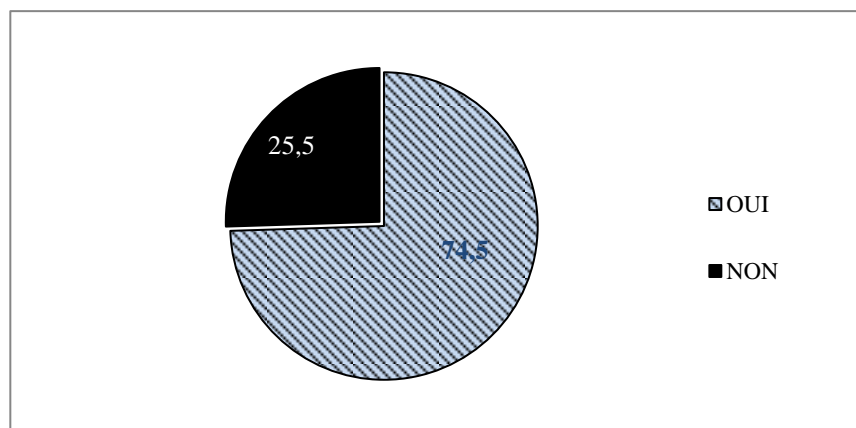


Figure 49: Taux de satisfaction des familles du tri à la source

Le graphique dans la *figure 49* montre que 74,5% des familles sont satisfaites du tri à la source, ce pourcentage est relativement important et pourrait encourager à lancer un projet de tri des déchets. Pour soulever les problèmes rencontrés, la question suivante est posée aux familles :

- ✓ Quels sont les problèmes que vous avez rencontré ?

Les résultats en pourcentage de la question sont montrés dans la *figure 50*.

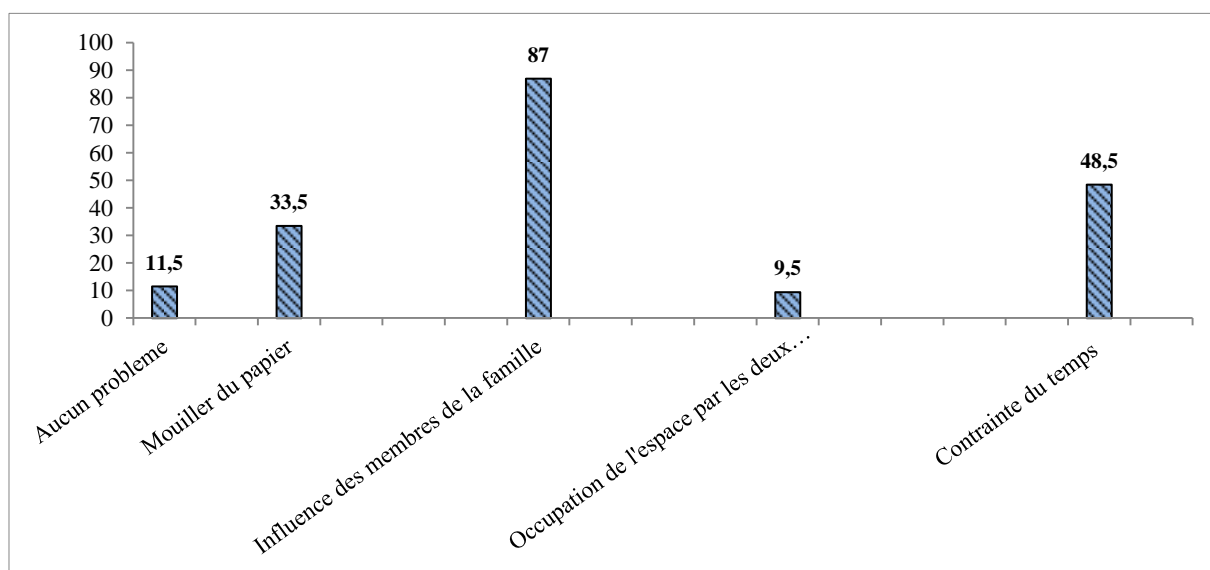


Figure 50: Problèmes rencontrés lors de l'opération de tri

Les résultats de cette question montrent que 11,5% des familles n'ont pas trouvé des problèmes dans le tri à la source. En revanche, 87% ont des problèmes avec les membres de famille et notamment les enfants qui ne respectent pas le tri des fractions, ce qui explique l'influence sur l'efficacité de tri. 48,5% des familles ont des problèmes liés à la contrainte du temps pour séparer les déchets, de ce fait, toutes les ordures produites sont mises en une seule poubelle. 33,5% des familles ont trouvé des problèmes avec les déchets papiers qui sont influencés par l'humidité issue de la matière putrescible ce qui rend leur séparation difficile. Un autre problème rencontré par 9,5% des familles est lié à l'espace d'installation des poubelles, la majorité des familles n'ont pas un jardin ou un endroit devant la maison pour y mettre les deux poubelles car elles occupent assez d'espace dans la cuisine. En gros, les problèmes sont liés à la sensibilisation (membres de famille, contrainte du temps, ...) et quelques aspects techniques (humidité élevée, occupation d'espace...). Afin de connaître quelques solutions qui peuvent contribuer à l'amélioration de tri à la source, la question suivante a été posée aux familles ;

- ✓ Quelles sont vos propositions pour améliorer cette opération ?

Les résultats des réponses à cette question sont montrés dans la *figure 51*.

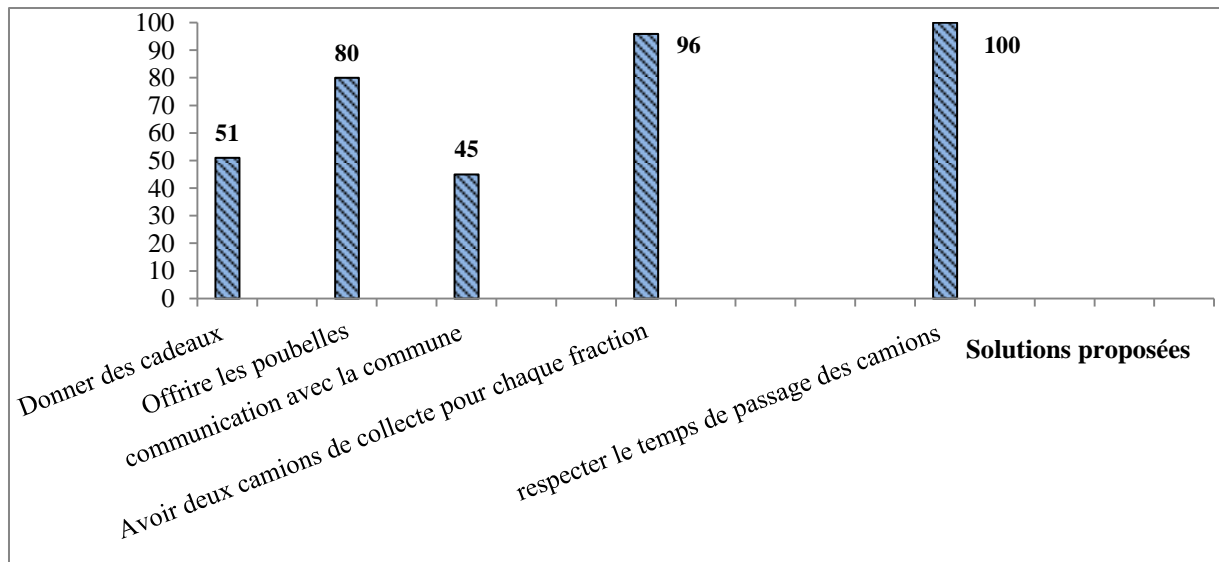


Figure 51: Solutions proposées par les familles pour améliorer la qualité du tri

Les principales solutions proposées par les enquêtés montrent que le problème de tri n'est pas lié seulement aux familles, il faut que les communes ou les sociétés de collecte des déchets contribuent à cette opération. En effet, 100% des familles suggèrent que les camions de collecte doivent respecter le temps de passage avec un partage du programme de collecte avec la population. Ainsi, 96% des citoyens propose la mise en service de deux camions de collecte ; un réservé aux fractions combustibles et le deuxième aux autres fractions et ceci afin de valoriser l'effort de tri qui se fait à la maison. En outre, des familles voient que les responsables de gestion des déchets doivent encourager la population pour s'engager dans l'opération de tri à la source en leur donnant des cadeaux symboliques et les poubelles de tri. Ces gestes symboliques peuvent améliorer l'efficacité de tri. En effet, avant de commencer ce projet pilote, la première question posée par la majorité des familles est liée à la disponibilité des poubelles « Est-ce que vous allez nous donner les poubelles et est-ce qu'on peut les garder chez nous après les deux mois de projet pilote ? ». A partir des réponses, aucune indication sur l'éducation et sensibilisation n'a été mentionnée, étant donné que l'éducation et la formation des petits à un rôle très important dans le changement des comportements des populations (Varotto and Spagnoli, 2017). Le manque des connaissances du public est l'un des plus importants obstacles au succès de toute gestion de déchets (Ma et Hipel, 2016) Au Portugal, les enfants sont identifiés comme des cibles importantes des campagnes de communication et sont impliqués dans les messages et des annonces de recyclage à la télévision et à la radio (Vicente et Reis, 2008). A Tallinn (Estonie), une forte demande de programmes et de campagnes de sensibilisation à l'environnement a conduit à une augmentation du nombre d'heures consacrées aux sciences de l'environnement dans les programmes scolaires (R4R, 2014). Au Canberra (Australie), une initiative des écoles durables avec des sorties pédagogiques vers les unités de recyclage et les décharges est considérée comme étape clé d'éducation et elle est incluse dans la stratégie de gestion des déchets (ACT, 2011 ; Pickin et Randell, 2017). En effet, une série de campagne de sensibilisation d'une manière périodique et continue peut

contribuer au succès de tri des déchets à la source et par la suite le succès de toute la chaîne de gestion des déchets. A Ljublanja, des campagnes de communications avec la population ont été faites d'une façon intensive avant la mise en place d'un plan de gestion des déchets ; de manière impressionnante, la ville a augmenté le taux de recyclage à 61% en 10 ans, ainsi les métaux récupérés sont passés de 16 kg en 2004 à 145 kg par personne en 2014 (Oblad, 2018).

Récapitulatif

L'examen de la gestion des déchets dans le monde entier indique que les villes qui appliquent un système de tri des déchets à la source ont réduit considérablement la mise en décharge et ont augmenté le taux de recyclage (Xevgenos et al., 2015). Pour ce faire, il faut déployer assez d'effort afin d'instaurer un tri à la source dans toutes les villes, vu que le succès d'une valorisation des déchets dépend directement de l'efficacité de tri. Le présent projet pilote, montre que la population peut s'engager dans un tel projet, à condition que les autorités responsables de ce secteur se rapprochent des citoyens par des campagnes de communications et de les motiver par des gestes symboliques (distribuer des poubelles, prix pour les familles qui respectent le tri, ...). De ce fait, les communes peuvent transformer la problématique des déchets en ressources durables à utiliser pour améliorer le revenu. Ainsi, les ONG et les associations ont un rôle primordial dans ce sujet, pour mettre en œuvre ce projet pilote nous avons collaboré avec une association (ECO ATBIR) pour nous aider afin de se rapprocher des familles et de leurs expliquer les objectifs dudit projet.

Conclusion

Pour garantir une gestion efficace des déchets, il faut prendre en considération le volet social, car il a une influence sur le succès ou l'échec de traitement ou de valorisation des ordures. L'objectif de cette partie est d'évaluer l'influence des citoyens et le diagnostic des principaux problèmes liés au tri à la source comme étant l'étape clé de gestion efficace des déchets. Et ceci en faisant des enquêtes des citoyens et des municipalités, il s'est bien vu qu'il y a un conflit entre les producteurs (citoyens) et les responsables sur l'élimination(communes), les principaux problèmes sont liés généralement à un manque de communication entre les deux pôles et notamment d'après les communes qui doivent partager avec la population toutes les informations liées à ce secteur. Et afin d'évaluer la capacité d'engagement de la population dans des projets de l'assainissement solide, un projet pilote de tri à la source a été fait, et il a montré un succès avec des efficacités de séparation relativement importantes pour le cas d'un pays en voie de développement. Ainsi, les principaux problèmes soulevés lors de ce projet sont liés principalement à l'éducation, vu que les enfants impactent sur le tri à la source, de ce fait, l'intégration de la matière des sciences de l'environnement dans les programmes scolaires pourrait améliorer l'éco-conception des jeunes citoyens. Ainsi, les municipalités, doivent s'engager en respectant le temps de collecte, offrir les engins de collecte pour chaque fraction, mise en place d'un numéro vert,...

PARTIE IV : ETUDE DES CARACTERISTIQUES QUANTITATIVES ET QUALITATIVES DES FRACTIONS COMBUSTIBLES ISSUES DES DMA

La valorisation énergétique joue un rôle important dans la minimisation des impacts liés à l'enfouissement des déchets dans les décharges et notamment en terme de réduction des émissions des GES (Méthane, CO₂,...) (Ramachandra et al., 2018 ; Scarlat et al., 2015). Ainsi, les combustibles fossiles sont les énergies les plus utilisées, le coke de pétrole, l'huile et le gaz naturel contribuent à la production de 84% de l'électricité dans le monde (ES-EUA, 2013). Vu que le l'utilisation intense des combustibles fossiles contribue à la pollution et à la génération des GES, les nations ont déployé dernièrement des efforts pour encourager l'utilisation des énergies renouvelables et des combustibles alternatifs (Kousksou et al., 2015 ; Ouda et al., 2013).

Le mode de valorisation énergétique le plus étudié dans les PED et notamment au Maroc est le biogaz issu de la biomasse (Afilal et al., 2013 ; Kousksou et al., 2015 ; Naimi et al., 2016). En revanche, les combustibles solides de récupération (CSR) ou RDF sont peu étudiés dans les PED. Cette filière est assez développée en Europe avec la mise en œuvre de la norme CEN/TC 343, qui règle la filière du CSR/RDF. La norme EN 15359 classe les CSR en cinq catégories comme il est montré dans le *tableau 9*. La co-incinération des CSR dans les industries consommatrices des combustibles fossiles pour produire l'énergie thermique ou électrique a montré plusieurs avantages économiques et environnementaux (AbuQudais et al., 2000 ; Arena et al., 2010 ; Chakraborty et al., 2013 ; Kara, 2012, Porteous et al., 2005, Psomopoulos et al., 2009) , dans ce cadre plusieurs études ont été menées dans les pays développés et en Chine (Cassado et al., 2016 ; Di Leonardo et al., 2016 ; Garcés et al., 2015 ; Nasrullah et al., 2015 ; Natalia et al., 2016 ; Samolada and Zabaniotou, 2014 ; Sever Agdag et al. 2016 ; Ting et al., 2017). Les CSR/RDF peuvent être issus des déchets ménagers, des déchets commerciaux, des refus des MBT et des déchets industriels non dangereux (Nasrullah et al., 2015 ; Rada and Raggazi, 2014). Ainsi, les CSR/RDF peuvent être produits par le mélange de plusieurs catégories avec un pouvoir calorifique élevé (boues de STEP, les grignons d'olive,...) (Casado et al., 2016 ; Lei et al., 2016 ; Tezanoui et al., 2005).

L'objectif de ce travail est d'étudier les fractions combustibles contenues dans les déchets ménagers générés par les communes de la province de Khénifra au Maroc. Le premier chapitre de cette partie sera consacré à la caractérisation quantitative et qualitative des fractions sèches incinérables contenues dans les DMA. Le deuxième chapitre consiste à caractériser six combinaisons de RDF au laboratoire afin d'évaluer l'effet de la composition en fractions combustibles sur la qualité d'un RDF.

CHAPITRE 1 : CARACTERISATION DES FRACTIONS COMBUSTIBLES DANS LA ZONE D'ETUDE

Le présent chapitre vise à caractériser l'aspect qualitatif et quantitatif des fractions combustibles contenues dans les ordures ménagères générées par les communes de la zone d'étude. En premier lieu, la caractérisation a été menée dans la ville de Béni Mellal, puis une deuxième caractérisation a été faite dans les communes de la province de Khénifra en période hivernale et estivale et en milieu urbain et rural.

I Matériels et méthodes

I.1 Méthode de caractérisation des déchets de la ville de Béni Mellal

La première caractérisation a été menée dans la ville de Béni Mellal pour étudier la relation entre la distribution des fractions combustibles contenues dans les DMA et la taille granulométrique.

La caractérisation a été faite pour les neuf secteurs de collecte des déchets dans la ville pendant sept jours. Les pesés de la décharge montrent une production moyenne de 152 tonne/jour, de ce fait 10% des déchets produits chaque jour a été caractérisé durant la campagne de caractérisation.

A la fin de chaque tour de collecte, le camion passe dans le pont bascule afin d'être pesé, puis il se décharge ainsi les déchets sont mélangés et subissent un quartage. 10 % du poids des déchets d'un tour par secteur est prélevé puis transféré à une deuxième plate-forme pour être caractérisé.

L'échantillon prélevé de chaque secteur subit une caractérisation granulométrique et ceci grâce à des tables de granulométrie dédiées à ce faire (*figure52*). Trois tailles granulométriques sont choisies: i) fraction inférieure à 80 mm (G1) ; ii) fraction comprise entre 80 et 250 mm (G2) ;iii) fraction supérieure à 250 mm (G3). La séparation granulométrique est suivie par un tri des déchets des fractions G2 et G3. En revanche, la fraction G1 n'a pas fait objet de tri, car il a été remarqué que la quasi-totalité de cette fraction est constituée par la matière fermentescible.

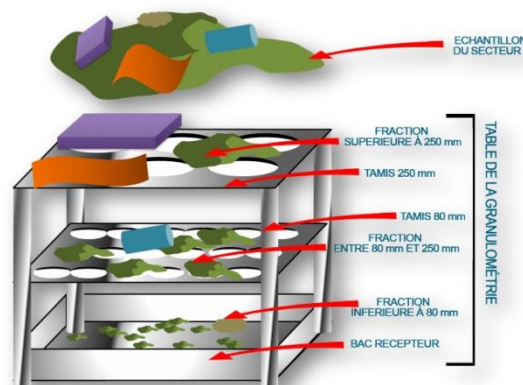
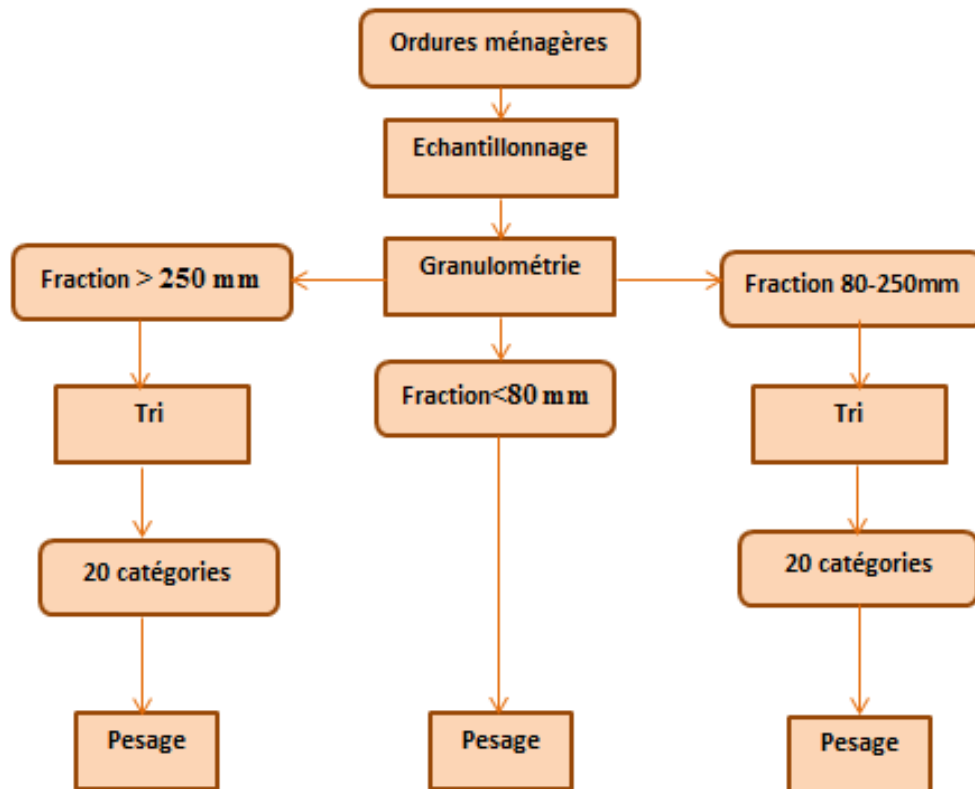


Figure 52: Classification granulométrique des déchets ménagers

Un tri en 20 catégories des déchets (plastique PET, PEHD, PP, PELD (sacs en plastique), PVC, plastique polystyrène, déchets hygiéniques, bois, textiles, carton, carton tétra Pack, carton et papier, aluminium et ou fer, verre, DEEE, DMP, céramique et déchets de démolition, chaussures et élastomères, divers combustibles et matière fermentescible) a été fait.

Le diagramme suivant montre la méthode suivie.



I.2 Méthode de choix des communes de la province de Khénifra

Afin de choisir les communes qui feront l'objet de caractérisation, deux paramètres ont été considérés, le premier est le tonnage produit par chaque commune (les communes dont le tonnage est inférieur à deux tonnes par jour sont exclues de la caractérisation) et le deuxième paramètre est l'éloignement de la commune du barycentre de production des déchets (les communes qui s'éloignent de plus de 40 km du barycentre de production des déchets sont éliminées), ainsi, l'accès à la caractérisation dans certaines commune est un facteur d'exclusion de ces communes. A cause de l'absence des pesés journalières pour chaque commune, le calcul du tonnage journalier a été mené grâce au moyens nationales de production des ordures ménagères en milieu urbain et en milieu rurale et en se basant sur les chiffres démographiques pour chaque commune. Les données sont traitées à l'aide des systèmes d'informations géographique en utilisant le logiciel Arc Gis.

I.2.1 Production des ordures ménagères dans la ZE

Le tonnage journalier produit par chaque commune est calculé selon la formule suivante :

$$Tj = P * \frac{Rp}{1000}$$

Avec :

Tj : Le tonnage journalier produit dans la commune en tonne/jour ;

P : La population de la commune ;

Rp : Le ratio de production des déchets en kg/hab/jour (0,76kg/habitant/jour en milieu urbain et 0,29 kg/hab/jour en milieu rural) (Ouigmane et al., 2017).

Les données de calcul sont présentées dans le *tableau 33*.

Tableau 33: Estimation du tonnage journalier des DMA dans la zone d'étude

Code de la commune	Commune	Population projetée en 2016	Ratio de production des déchets	Tonnage journalier estimé (Tonne/jour) en 2016
C1	Aguelmam Azugza	7477	0,29	2,2
C2	Aguelmous	35582	0,29	10,3
C3	Ait Ishak	19037	0,29	5,5
C4	Ait Saadlli	2524	0,29	0,7
C5	El Borj	3615	0,29	1,0
C6	El Hammam	12364	0,29	3,6
C7	El Kebab	16047	0,29	4,7
C8	Had Bouhssoussen	7386	0,29	2,1
C9	Kerrouchen	6911	0,29	2,0
C10	Khénifra	121254	0,76	92,2
C11	Lehri	9019	0,29	2,6
C12	Mouha Oumou Zyani	8926	0,29	2,6
C13	Moulay Bouaazza	8332	0,29	2,4
C14	M'irt	44420	0,76	33,8
C15	Ouaoumana	9064	0,29	2,6
C16	Oum Errabiaa	9237	0,29	2,7
C17	Sabt Ait Rahou	9063	0,29	2,6
C18	Sidi Amar	2074	0,29	0,6
C19	Sidi Hcine	2874	0,29	0,8
C20	Sidi Hya Oussaad	6783	0,29	2,0
C21	Sidi Lamine	16903	0,29	4,9
C22	Tighassaline	15440	0,29	4,5

Les données sont traitées par le logiciel Arc GIS afin d'élaborer un SIG de tonnage des ordures dans la zone d'étude. La carte de production des ordures est illustrée dans la *figure 53*.

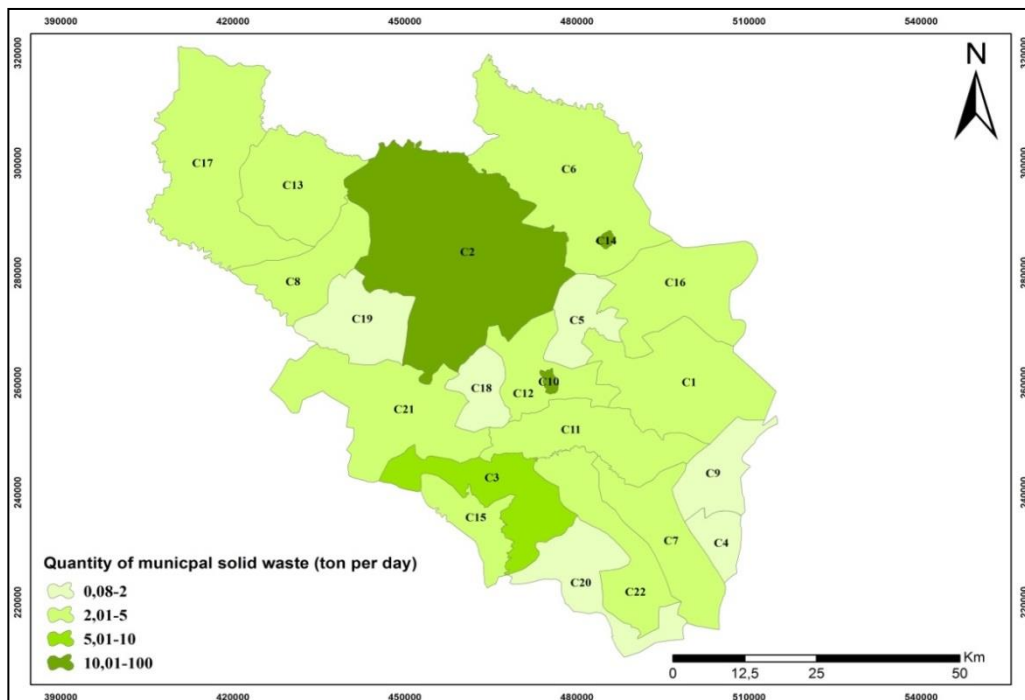


Figure 53: Carte de distribution du tonnage journalier dans la zone d'étude

1.2.2 Eloignement des communes du barycentre de production des déchets

Le barycentre de production des déchets ménagers dans la zone d'étude a été déterminé grâce au SIG comme il est montré dans la carte de la figure 54. Un rayon de 40 km a été pris aux tours du barycentre pour faciliter le choix des communes qui feront l'objet de caractérisation.

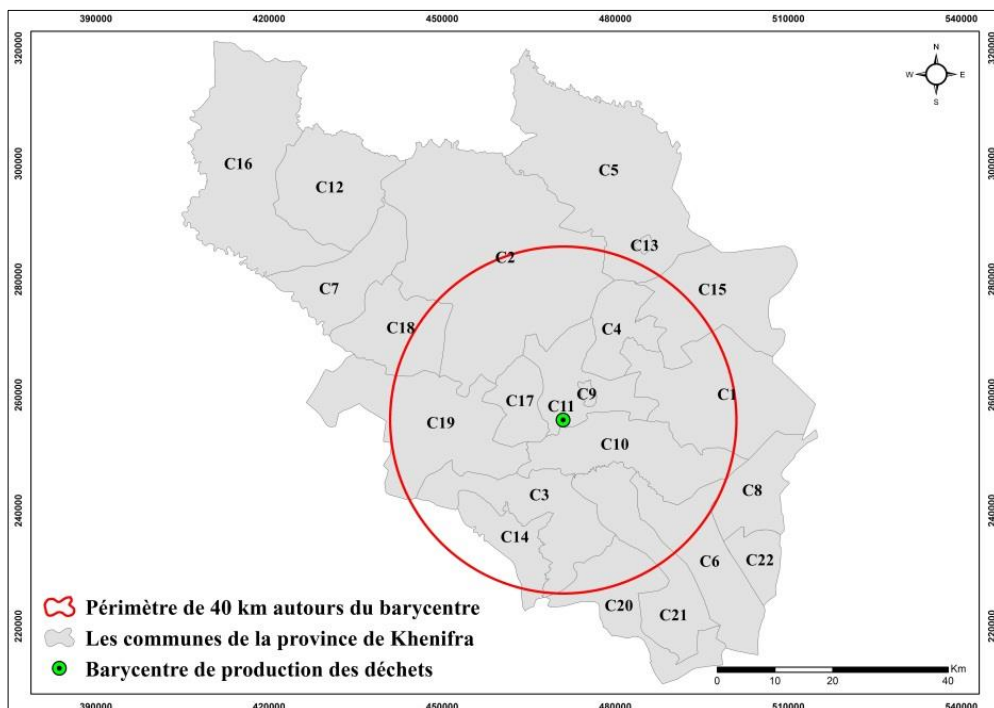


Figure 54: Barycentre de production des déchets dans la province de Khénifra

I.3 Méthode de caractérisation

Les DMA sont des matrices hétérogènes ce qui rend leur caractérisation très difficile (Valkenburg et al., 2008). Ainsi, plusieurs paramètres peuvent influencer la composition des ordures comme la période saisonnière et la nature de la zone (urbaine ou rurale) (Kodow et al., 2015). Deux campagnes ont été menées, la première en hiver 2016 et la deuxième en été 2017. Ainsi, la caractérisation a été faite dans les communes rurales et dans les communes urbaines. La prise d'échantillon est entre 100 et 200 kg pour chaque commune, un total de 3300 kg des ordures a été caractérisé pour huit communes en période estivale et en période hivernale (voir le planning de caractérisation dans l'annexe2). La ville de Khénifra est la seule commune qui connaît une stratification d'habitat dans la ZE. Pour ce faire, l'échantillon a été pris des déchets collectés par le camion de repasse qui fait un trajet en croisant toutes les strates d'habitats de la ville (figure 55). Après avoir mélangé les déchets et réaliser un quartage, l'échantillon est étalé pendant une journée pour perdre l'humidité, puis il subit une classification granulométrique à la base d'une table granulométrique qui sépare les déchets en deux fractions ; Inférieure à 80 mm et supérieure à 80 mm. La fraction inférieure à 80 mm est éliminée car elle contient une grande quantité de matière putrescible qui ne fait pas objet de la présente étude, la fraction supérieure à 80 mm subit un tri en fractions combustibles (textile, papier, carton, plastique, ...) et en fractions non combustibles (matière putrescible, verre, métaux, ...), les fractions non combustibles sont éliminées, alors que les fractions combustibles sont classées en quatre catégories (figure 56). La dernière étape est la pesé de divers catégories de fractions combustibles.

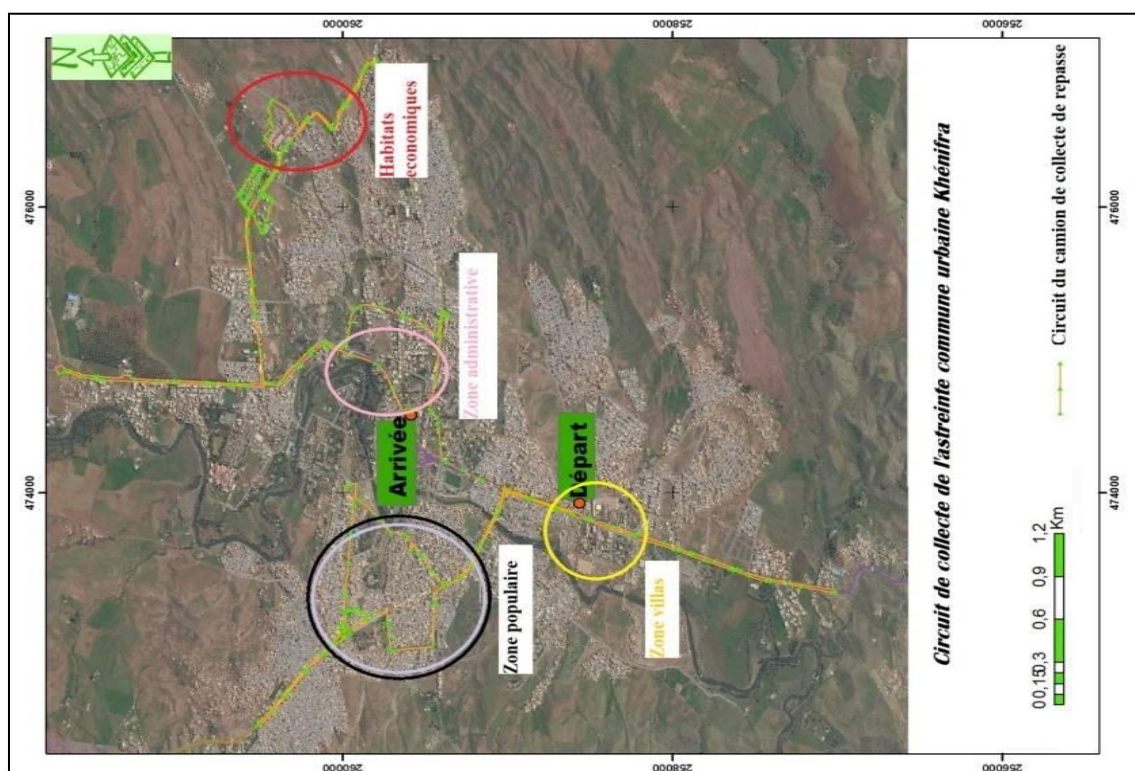


Figure 55: Circuit de camion de repasse dans la ville de Khénifra 2016

Le résumé de la méthode de caractérisation des ordures dans la province de Khénifra est schématisé dans l'organigramme de la *figure 56*.

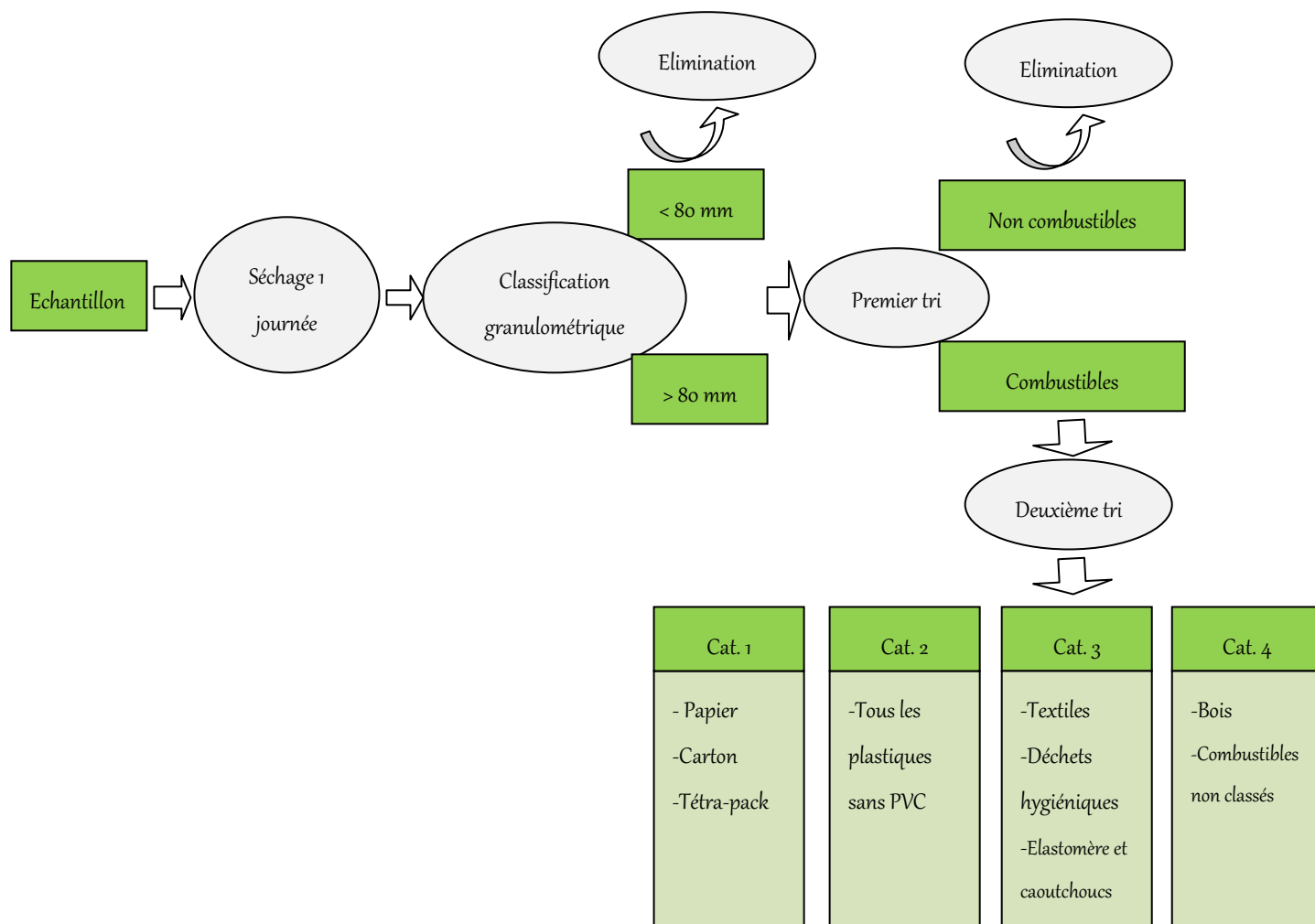


Figure 56: Méthode de caractérisation des fractions combustibles contenues dans les DMA de la zone d'étude

II Résultats et discussion

II.1 Caractérisation des déchets de la ville de Béni Mellal

La distribution des fractions combustibles (textiles, carton, plastique,...) qui peuvent être entré dans la composition des combustibles solides de récupération en fonction de la taille granulométrique G2 (entre 80 et 250 mm) et G3 (supérieur à 250 mm), est représentée dans les graphiques de la *figure 57*

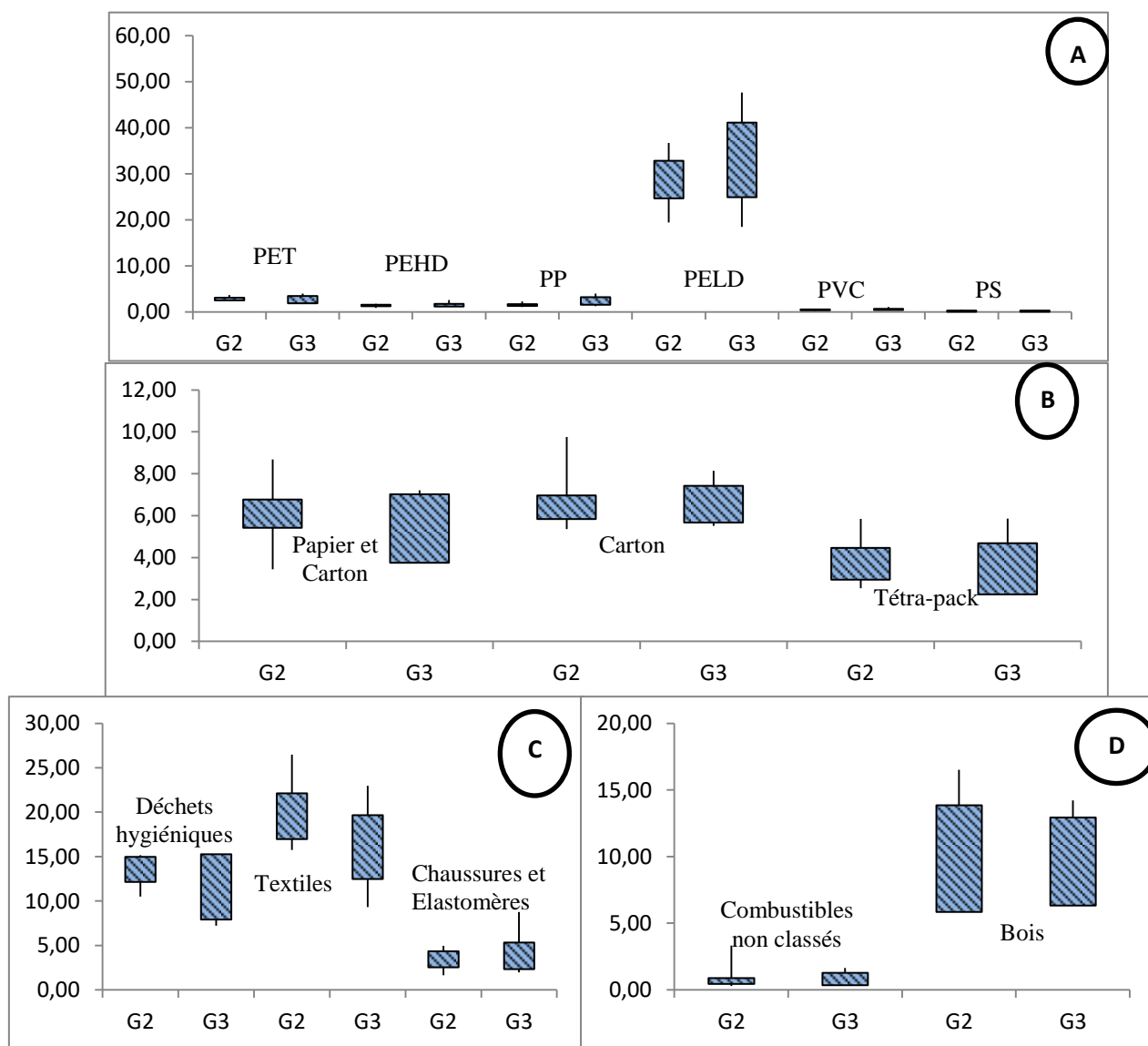


Figure 57: Distribution des fractions combustibles en fonction de la taille granulométrique. A : Fractions de la catégorie 1 ; B : Fractions de la catégorie 2 ; C : Fractions de la catégorie 3 ; D : Fractions de la catégorie 4

Les résultats comparatifs montrent que la taille granulométrique n'a pas une grande influence sur la distribution de diverses fractions combustibles, et notamment pour les plastiques, le bois, les chaussures et élastomères. Une faible différence dans la distribution concerne les textiles et les déchets hygiéniques dont la distribution est importante pour la taille granulométrique G2 par rapport à la taille granulométrique G3. Sur la base de ces résultats de la ville de Béni Mellal, la caractérisation des fractions combustibles dans les DMA de la province de Khénifra tiendra en considération la taille granulométrique supérieure à 80 mm.

II.2 Résultats de l'étude éliminatoire des communes

Le traitement des données gouvernant le choix des communes a été élaboré par le SIG, ainsi les résultats finals du choix des communes sont représentés dans la carte (figure 58).

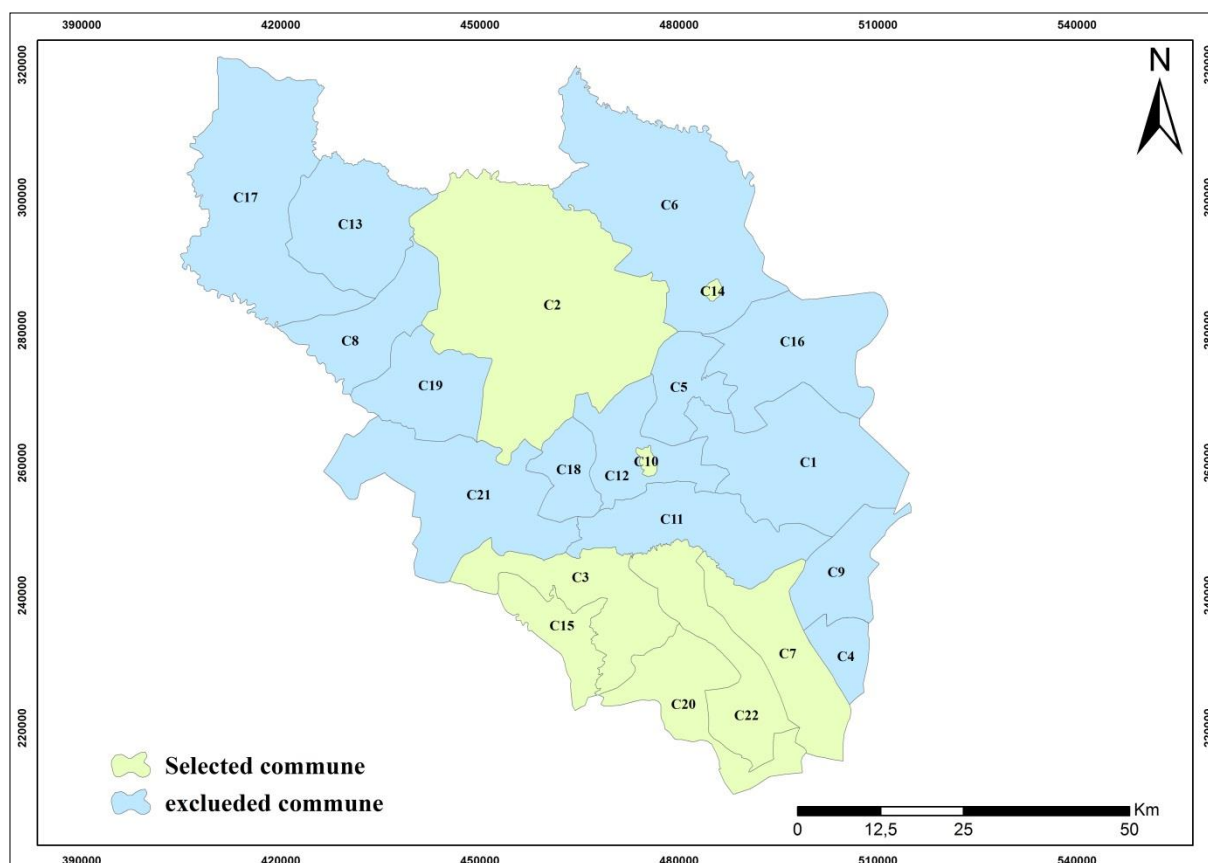


Figure 58: Carte des communes sélectionnées pour la caractérisation des DMA

Huit communes ont été choisies pour subir la caractérisation des déchets dont six communes sont rurales et deux sont urbaines. Les communes sont représentées dans le *tableau 34*.

Tableau 34: Données sur les communes choisies pour la caractérisation des DMA

Commune	Code	Type	Tonnage journalier estimé kg/hab/jour 2016	Distance du centre communal par rapport au barycentre de production des déchets Km
Aguelmous	C2	Rurale	10,3	30,7
Ait Ishak	C3	Rurale	5,5	15
El Kebab	C7	Rurale	4,7	24,6
Khénifra	C10	Urbaine	92,2	6,7
M'ritt	C14	Urbaine	33,8	33,3
Ouaouamana	C15	Rurale	2,6	22,1
Sidi Hya Osaad	C20	Rurale	2,0	26,8
Tighassaline	C22	Rurale	4,5	13,8

II.3 Résultats de caractérisation des déchets de la zone d'étude

II.3.1 Résultats de caractérisation en fonction de la taille granulométrique

II.3.1.1 Impact de la saison

Les fractions combustibles contenues dans les déchets ménagers de la zone d'étude ont été caractérisées en période hivernale (Janvier 2017) et en période estivale (Juin 2016) dans les communes

choisies. Les résultats de caractérisation des fractions combustibles dans les diverses communes sont montrés dans la *figure 59*.

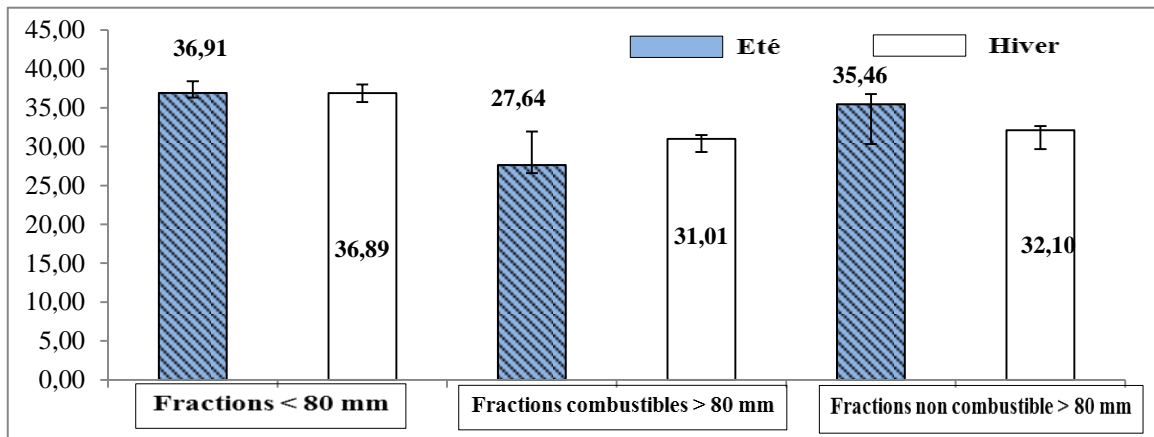


Figure 59: Résultats de caractérisation des fractions combustibles dans les diverses communes en fonction de la taille granulométrique en été et en hiver

Il est remarqué que la saison n'a pas influencé le pourcentage massique de la fraction inférieure à 80 mm avec une moyenne de 36,91% en été et 36,89% en hiver, cette fraction est constituée majoritairement par des déchets fermentescibles. Concernant la fraction combustible dont la taille est supérieure à 80 mm qui fait l'objet de la présente étude, on constate que le pourcentage en hiver est relativement élevé (31,01%) par rapport à la période estivale dont le pourcentage atteint une moyenne de 27,64%.

II.3.1.2 Impact du type de zone

Les résultats comparatifs des pourcentages massiques des fractions de déchets en fonction de la taille granulométrique en milieu urbain et en milieu rural sont représentés dans la *figure 60*.

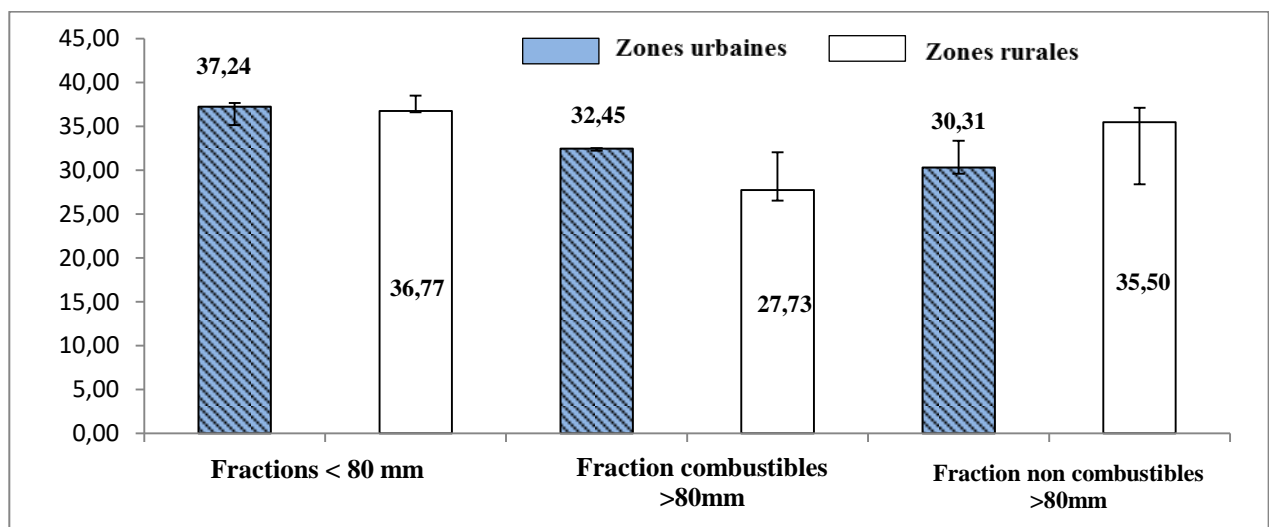


Figure 60: Résultats de caractérisation des fractions combustibles dans les diverses communes en fonction de la taille granulométrique dans les zones urbaines et rurales

A partir des résultats montrés dans le graphique, on constate qu'il y a un impact du type de la zone sur la distribution des fractions combustibles. En effet, la moyenne des fractions combustibles dans les zones urbaines et rurales est 32,45% et 27,73% respectivement. En revanche, la matière putrescible est plus générée dans les zones rurales par rapport aux zones urbaines pour les fractions inférieures à 80 mm et les non combustibles dont la taille est supérieure à 80 mm.

II.3.2 Résultats de caractérisation des fractions combustibles

Après avoir trié les fractions combustibles, elles subissent un deuxième tri en quatre catégories comme il est mentionné dans la *figure 56*. Les résultats de la distribution des catégories seront présentés en fonction de saison et du type de zone.

II.3.2.1 Impact de la saison

La distribution des quatre catégories constituant la partie combustible dans les ordures ménagères dans la zone d'étude en fonction de la saison est représentée dans la *figure 61*.

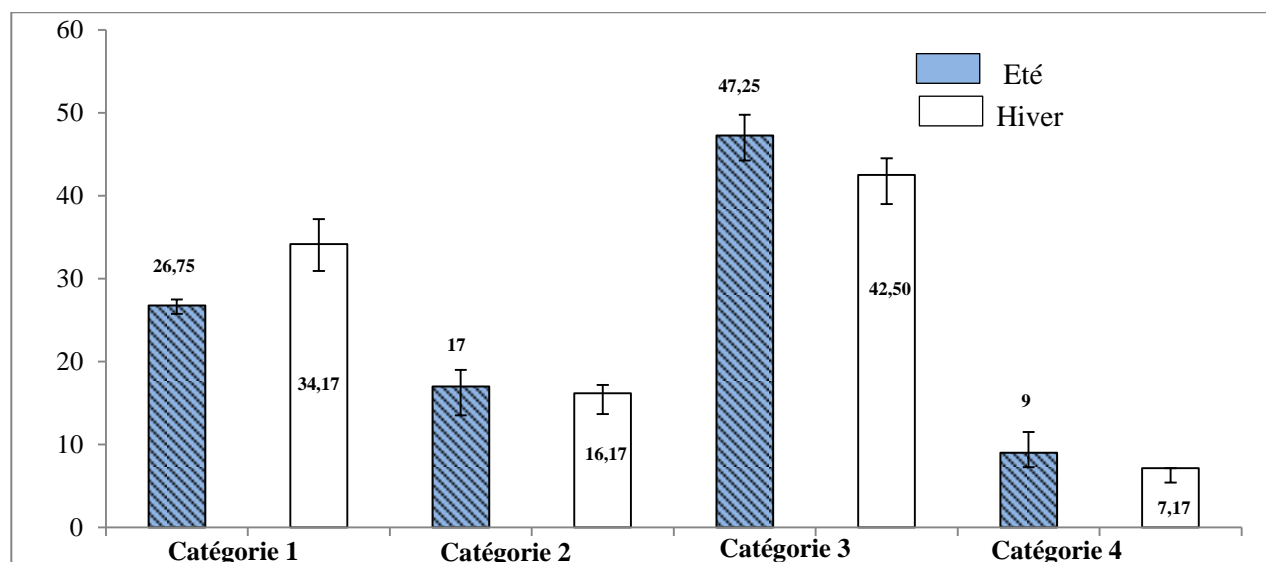


Figure 61: Résultats de caractérisation des quatre catégories des fractions combustibles en été et en hiver

Il est remarqué que la saison a une influence sur la distribution des fractions combustibles et notamment la catégorie 1 comportant le papier, le carton et le tétra-pack dont le pourcentage en période hivernale est relativement élevé (34,17%) par rapport à la période estivale dont le pourcentage massique atteint une moyenne de 26,75%. De même pour la catégorie 3, la saison a un impact sur la distribution des fractions. En effet, la catégorie 3 est plus abondante en période estivale par rapport à la période hivernale. En revanche, pour les catégories 2 et 4, l'impact de la saison est faible. Les résultats de variation des fractions constituant chaque catégorie seront présentés dans la partie de discussion des résultats.

II.3.2.2 Impact du type de zone

La distribution des quatre catégories constituant la partie combustible dans les ordures ménagères dans la zone d'étude en fonction du type de milieu est montrée dans la figure 62.

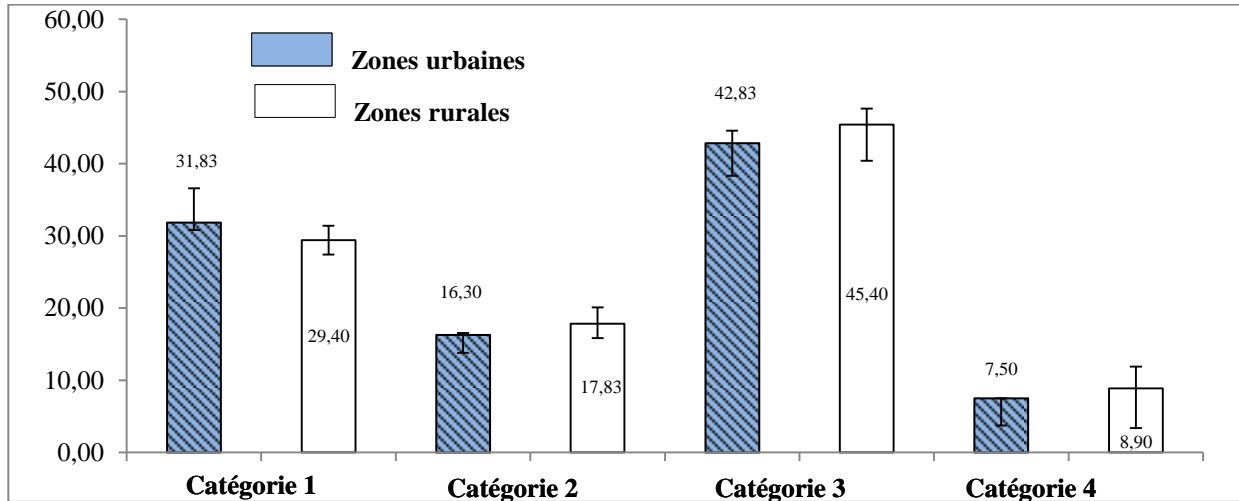


Figure 62: Résultats de caractérisation des quatre catégories de combustibles dans le milieu urbain et rural

L'impact de la typologie des zones sur les quatre catégories des fractions combustibles est moins important comme le cas des saisons, on constate que le pourcentage de la catégorie 3 est de 42,83% en zones urbaines et 45,40% en zones rurales. Concernant la catégorie 1, le pourcentage est de 31,83% en zones urbaines et 29,40% en zones rurales. La variation des fractions au sein des catégories sera présentée et discutée dans la partie de discussion des résultats.

III Discussion des résultats

III.1 Taille granulométrique des déchets

Les déchets ménagers sont des matrices très hétérogènes de point de vue composition et de point de vue granulométrique. Une chaîne de valorisation des déchets doit prendre ce paramètre en considération en mettant des trommels avec des tailles bien définies pour la séparation des déchets. Les parties combustibles dans les déchets ont généralement une taille supérieure à 80 mm. La présente étude a donné des informations sur la distribution des RDF en fonction de la taille en milieu urbain et rural et en période estivale et hivernale. En comparant les résultats de la présente étude avec ceux de la ville de Béni Mellal (Ouigmane et al., 2017) on constate que le pourcentage des fractions inférieures à 80 mm est presque le même (37,24% en zones rurales, 36,77% en zones urbaines et 35,38% dans la ville de Béni Mellal). Concernant la fraction combustible dont la taille est supérieure à 80 mm, les résultats ont montré qu'il y a une différence entre le pourcentage de cette partie en milieu urbain (32,45%) et en milieu rural (27,73%). En revanche, la partie combustible constitue 26,38% dans les déchets de Béni

Mellal malgré que la zone est urbaine, ce qui peut être expliqué par la présence d'autres fractions non combustibles dans les déchets avec un poids élevé (verre, déchets de démolition, ...) qui influencent le pourcentage massique des RDF. Ainsi, le type de saison a un impact sur la distribution des fractions combustibles avec une moyenne de 27,64% en été et 31,01% en hiver. L'augmentation des déchets combustibles en période hivernale est liée aux attitudes de consommation des citoyens en période froide et en période chaude.

III.2 Distribution des catégories des combustibles

Afin de bien analyser la distribution des fractions combustibles en période hivernale et estivale et en zones urbaines et rurales, une caractérisation a été menée en quatre catégories.

III.2.1 Distribution en fonction des saisons

La catégorie 1 constituée par le papier, le carton et le tétra-pack, est plus abondante en hiver avec un pourcentage massique de 34,17% contre 26,75% en été. Afin d'analyser et chercher la source de cette différence on va se focaliser sur la variation des constituants de cette catégorie (*figure 63*)

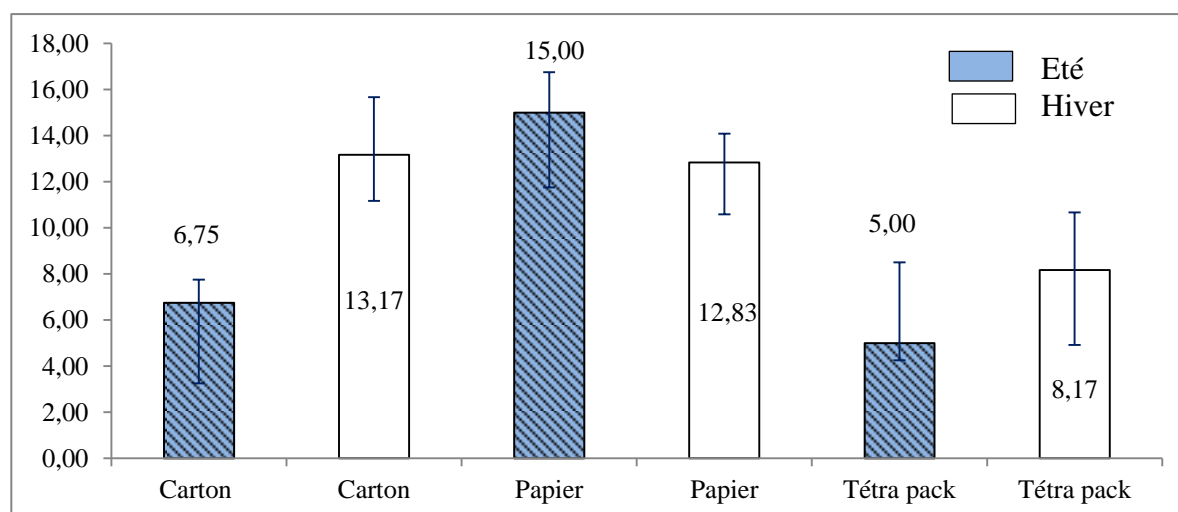


Figure 63: Distribution des fractions constituantes la catégorie 1 en période hivernale et estivale

On constate que le papier est plus abondant pendant l'hiver avec un pourcentage de 15%, par contre en été il ne présente que 12,83%. Cette différence peut être expliquée par le fait qu'en hiver les établissements scolaires et les imprimeries connaissent une forte production des déchets composés principalement de papier, par contre pendant les vacances estivales, ces dernières diminuent. La même remarque a été soulevée dans l'étude de caractérisation des DMA d'une ville en Algérie et dans la ville de Mohammedia au Maroc avec une abondance de papier pendant la période hivernale (EL Maguiri et al., 2014 ; Guermoud et Addou, 2014). D'autre part, l'étude menée par Ayeleru et al., (2018) à Juhansbourg a montré une abondance de papier en été (18%) par rapport à l'hiver (12%). Le tétra-pack aussi connaît une production relativement élevée en hiver d'où la forte consommation des produits

laitiers dans les cafés en hiver plus qu'en été suite à ce qui a été confirmé par un sondage des surveillants des cafés dans la zone d'étude. Ainsi, la production élevée du carton en hiver est due à la forte consommation des produits emballés en hiver.

La caractérisation des déchets générés dans la ville de Chihuahua au Mexique a montré que le pourcentage massique de plastique est plus élevé en été en raison de la consommation de boissons dans des bouteilles en plastique pendant les saisons chaudes (Guadalupe et al., 2009). Alors que dans la présente étude, le pourcentage massique du plastique (catégorie 2) reste constant sans aucun impact de la saison. Ce dernier résultat est en accord avec ce qui a été rapporté dans une étude menée sur les déchets de la ville de Mohammedia au Maroc (EL Maguiri et al., 2014).

La catégorie 3 est plus abondante en période estivale (47,25%) par rapport à la période hivernale (42,50%). La distribution des fractions constituant la catégorie 3 est montrée dans la *figure 64*.

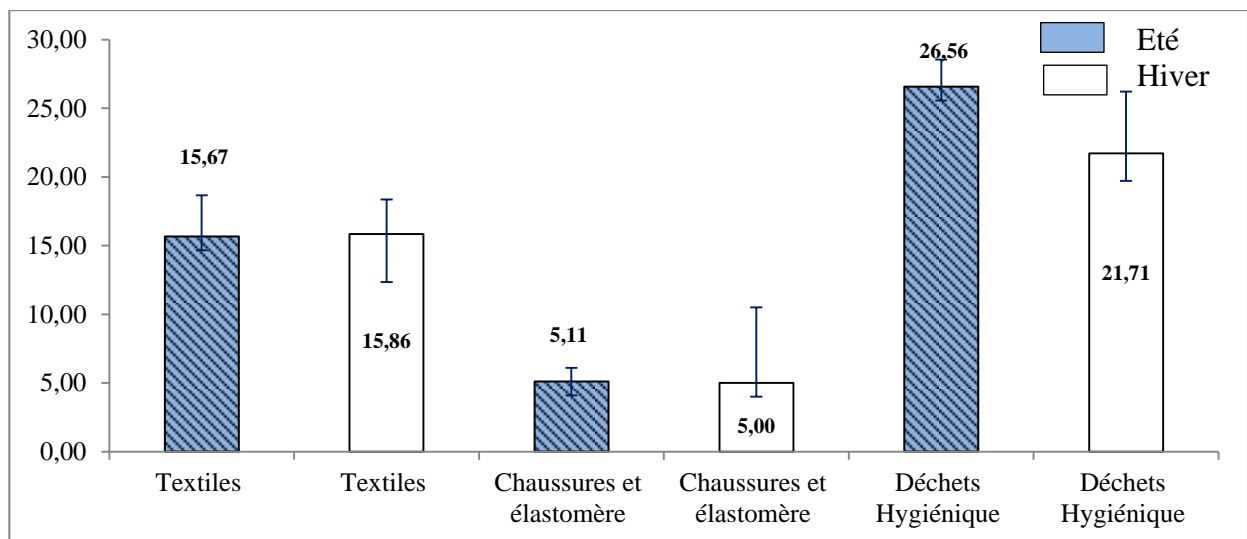


Figure 64: Distribution des fractions constituant la catégorie 3 en période hivernale et estivale

On remarque que les pourcentages massiques des textiles et des chaussures et élastomères ont resté constants pendant les deux saisons. En revanche, les déchets hygiéniques qui ont fait la différence dans cette catégorie, leur pourcentage en été et en hiver est 26,56% et 21,71% respectivement. Les déchets hygiéniques sont constitués principalement des couches bébés ce qui explique cette différence. En effet, pendant la saison chaude, les mamans augmentent dans la fréquence d'utilisation des couches bébés de leurs enfants à cause des mauvaises odeurs qui sont accentuées par l'effet des hautes températures (Karimi et Brouwers, 2020 ; Arena et al., 2016).

En ce qui concerne la dernière catégorie constituée par le bois et les combustibles non classés, le pourcentage en hiver est de 7,37% et 9% en été. Cette différence est influencée par les déchets de bois qui sont plus abondants dans les ordures en été (4,22%) contre 2,71% en hiver. Cette différence est peut être due à l'utilisation du bois dans le chauffage en hiver et notamment dans les centres ruraux.

III.2.2 Distribution en fonction des zones

La distribution des catégories en fonction de la zone (urbaine ou rurale) a montré des fluctuations relativement moins importantes.

La catégorie 1 a un pourcentage massique de 31,83% en zones urbaines et 29,40% en zones rurales. Le graphique de la *figure 65* représente la comparaison des trois constituants de la première catégorie en fonction des zones.

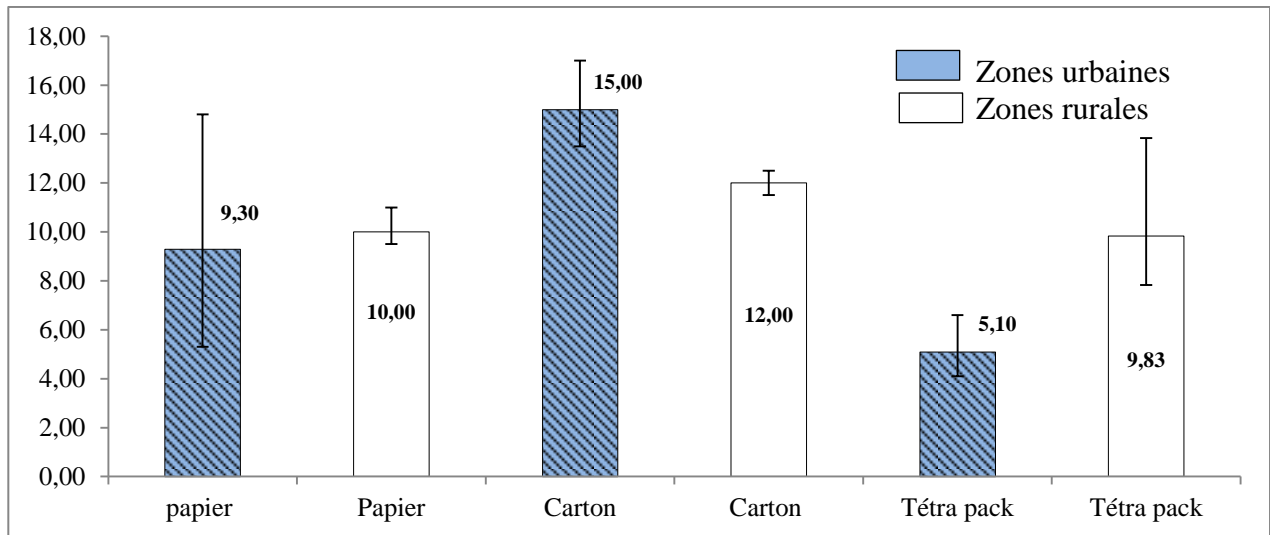


Figure 65: Distribution des fractions de la catégorie 1 dans les zones urbaines et rurales

La comparaison des fractions de la catégorie 1 montre que le pourcentage massique du papier est relativement élevé dans le milieu urbain (10%) ce qui est due à la présence des administrations et un nombre élevé des imprimeries et des établissements scolaires dans les villes. Pour le carton, il est assez abondant dans le milieu rural à cause de la présence de grandes épiceries qui jettent les cartons avec les déchets ménagers, par contre les centres commerciaux des zones urbaines vendent les produits de cartons aux récupérateurs pour des fins de réutilisation et ou recyclage. Pour les tétra-packs, leurs quantités est assez élevées dans les zones urbaines d'où la consommation des produits emballés (jus, lait, ...), par contre dans les zones rurales, la population a encore l'habitude d'acheter du lait non emballé dans des bouteilles réutilisables.

Concernant le plastique, le pourcentage massique dans les zones rurales est relativement élevé (17,53%) par rapport au pourcentage massique dans les zones urbaines (16,30%), cette différence peut être due à l'intervention des chiffonniers qui récupèrent les plastiques recyclables des bacs à ordures, et puisque la campagne de caractérisation des zones urbaines a été faite dans la décharge donc la masse du plastique va diminuer.

La comparaison de la catégorie 3 en fonction de la zone montre que le pourcentage massique dans les zones rurales est assez élevé (45,40%) par rapport aux zones urbaines (42,53%), la comparaison entre les constituants de la présente catégorie est représentée dans la *figure 66*.

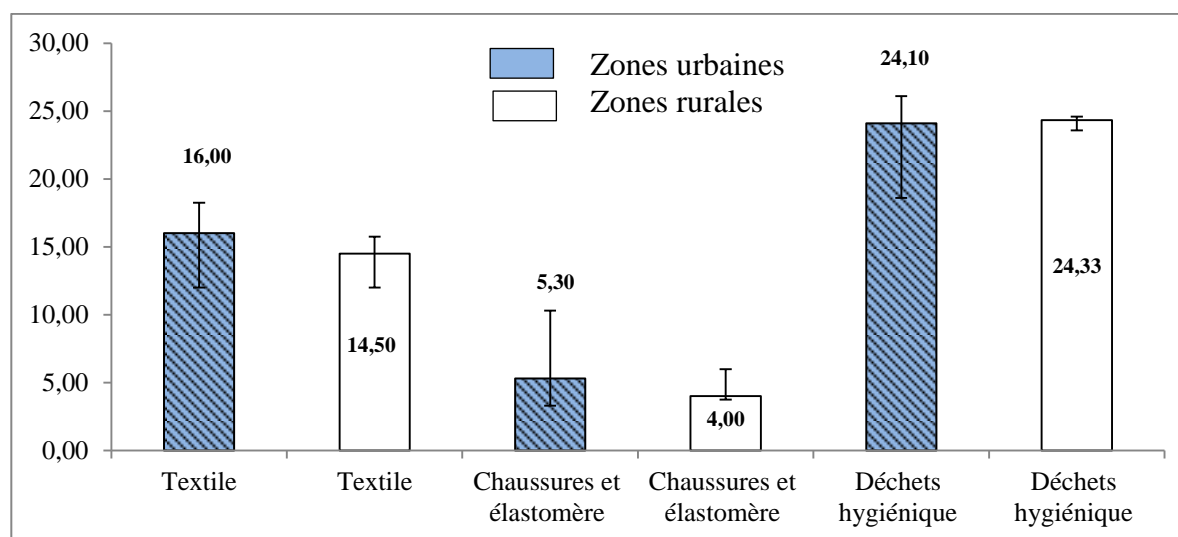


Figure 66: Distribution des fractions constituant la catégorie 3 dans les zones urbaines et rurales

On remarque que les déchets hygiéniques, les chaussures et élastomères ont presque le même pourcentage massique. En revanche, la fraction des textiles est assez élevée dans les zones rurales par rapport aux zones urbaines.

Pour la dernière catégorie, le bois dans les zones rurales représente 4,20% et 2,17% dans les zones urbaines. Dans les zones rurales il y a encore des habitants qui utilisent le bois dans le chauffage et pour la cuisson des aliments, par la suite, les résidus sont mélangés avec les ordures ménagères. Par contre, les combustibles non classés sont similaires dans les zones urbaines et rurales.

Le *tableau 35* montre la comparaison des fractions combustibles dans la présente étude avec d'autres travaux de recherche dans des pays en voie de développement.

Tableau 35: Comparaison des résultats de distribution des fractions combustibles dans la zone d'étude avec d'autres zones dans des PED

Lieu	Granulométrie	Plastique %	Papier et carton %	Textile s %	Divers combustibles %	Auteur
Lomé	>100 mm	46,5	17,13	21	15,38	Koledzi. 2011
Nouakchout	>100 mm	46,92	25,77	25	2,07	Aloueimine, 2006
Ghana	Déchets totaux	63,16	22	9	6	Kodwo et al., 2015
Naama (Algerie)	>100 mm	20	25,07	53,83	1,32	Youb et al., 2014
Béni Mellal	> 80 mm	37,6	16,28	34,43	11,71	Ouigmane et al., 2017
La présente étude	> 80 mm	16,5	30,5	45	8,5	-

A partir des données représentées dans le *tableau 35*, on constate que le plastique est la fraction combustible la plus abondante dans les déchets au Ghana, à Nouakchout et à Lomé. En revanche, le pourcentage du plastique est relativement faible dans la ville de Naama en Algérie et dans la ville de Béni Mellal au Maroc. Concernant la présente étude, le plastique est moins abondant ce qui est due à la fermeture de plusieurs usines de production du plastique au Maroc suite à l'adoption de la loi 77-15, qui interdit l'utilisation des sacs en plastique. Dans l'autre partie, le textile est plus abondant dans les déchets Maghrébins et cette fraction est faible au Ghana avec 9%. La quantité du papier et carton est plus abondante dans la présente étude avec un pourcentage massique de 30,5% et à Nouakchout et Naama le pourcentage est de 25%, en revanche cette fraction est faible dans la ville de Béni Mellal (16,28%) ce qui peut être due à la collective sélective du carton dans quelques quartiers de la ville.

Conclusion

La caractérisation des ordures ménagères à un rôle très important dans une politique de gestion des déchets, car elle donne des informations de l'ordre globale sur le type de filière de traitement à adopter. Comme première étape de ce projet de recherche qui vise à étudier la faisabilité de production des RDF à partir des DMA dans les PED, une caractérisation des fractions combustibles a été menée. Les principales conclusions sont :

- Le pourcentage des fractions combustibles issues des DMA secs qui pourrait faire objet d'une production de RDF est de 32,45% en milieu urbain et 27,73% en milieu rurale ;
- Les fractions combustibles qui pourrait faire objet d'une production de RDF est de 27,64% en été et 31,01% en hiver ;
- Dans la partie combustible, la catégorie la plus importante est celle constituée de textile et des déchets hygiéniques avec une moyenne de 45% ;
- La composition d'un RDF de la zone d'étude est 30,5% de papiers, carton et tétra pack, 16,50% de plastique, 45% de textiles, déchets hygiénique, chaussures et élastomères et 8,5% du bois et des combustibles non classés.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES FRACTIONS COMBUSTIBLES CONTENUES DANS LES DMA DE LA ZONE D'ETUDE

La filière de production des RDF/SRF est assez développée en Europe avec la mise en œuvre d'une norme CEN/TC 343, qui règle le secteur des CSR. La norme EN 15359 classe les CSR en cinq classes de qualité comme il est montré dans le *tableau 9*.

L'objectif de ce chapitre est de caractériser plusieurs échantillons de RDF avec un changement dans leur composition en fractions combustibles afin d'évaluer l'impact de la composition sur la qualité d'un combustible alternatif, et ceci en déterminant plusieurs paramètres de qualité comme le pouvoir calorifique inférieur (PCI), le taux des cendres, les chlorures, la composition élémentaire, et les métaux lourds. Par la suite, quatre modèles seront analysés afin de déterminer le plus prédictif du PCI de RDF produit par les déchets de la zone d'étude.

I Matériels et méthodes

I.1 Constitution des combinaisons

Afin d'étudier l'influence de la composition sur la qualité d'un RDF, six combinaisons ont été préparées en modifiant les pourcentages des fractions qui les constituent, une combinaison est préparée suite aux résultats trouvés dans le premier chapitre de cette partie en respectant les pourcentages massiques de chaque catégorie. En outre, cinq autres combinaisons ont été préparées avec un changement dans la composition des pourcentages de chaque catégorie. Ainsi, les boues de STEP et les grignons d'olive sont introduits dans deux autres combinaisons. Les pourcentages massiques de chaque combinaison sont représentés dans le graphique de la *figure 67*.

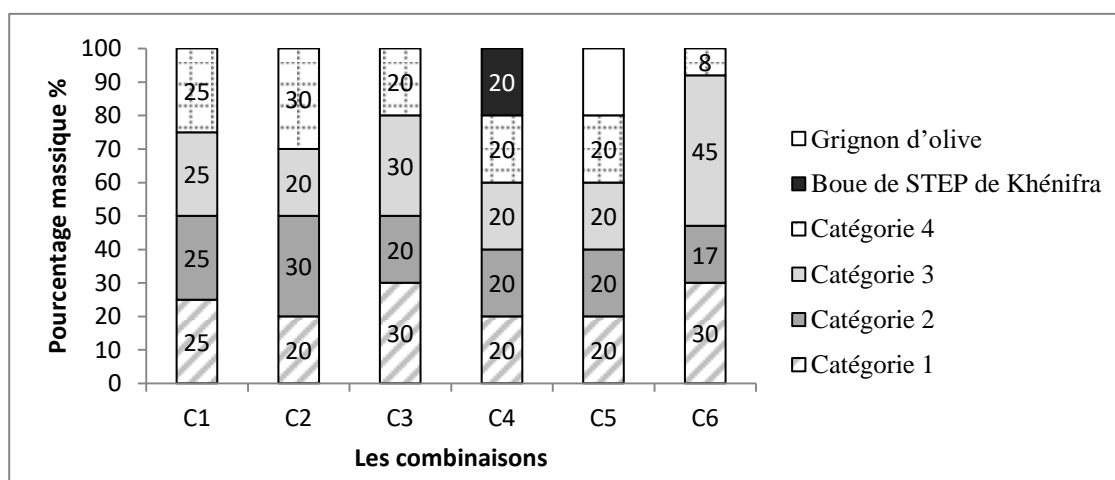


Figure 67: Composition en pourcentage massique de chaque combinaison

I.2 . Préparation des échantillons

La première étape est la préparation des combinaisons en se basant sur les pourcentages massiques de chaque catégorie. Par la suite, l'humidité est déterminée pour chaque combinaison. Puis, les échantillons sont séchés à 105 °C pendant deux heures. Après, ils subissent un broyage en utilisant un broyeur électrique de type SM 300 - RETSCH afin d'avoir une taille granulométrique inférieure à 2 mm (*figure 68*). La préparation des échantillons pour les analyses suit les normes européennes standards de CSR [EN 15413](#) et [15442 \(2011\)](#).

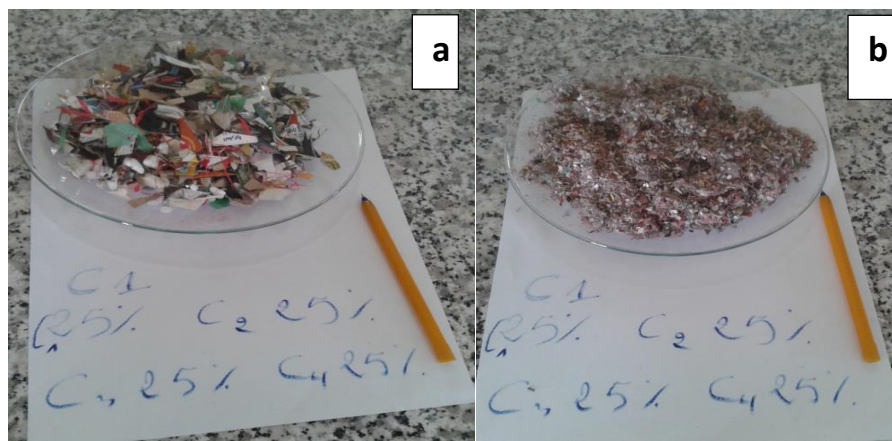


Figure 68: a- Echantillon avant broyage; b- Echantillon après broyage

I.3 Analyse des échantillons

Les six combinaisons ont été analysées au laboratoire afin de déterminer leurs différentes caractéristiques qualitatives. Dans ce propos, le pouvoir calorifique, la composition élémentaire (Carbone, Oxygène, Soufre, Azote), l'humidité, le taux des cendres, les métaux lourds et les chlorures ont été déterminés. Pour chaque élément, cinq répétitions d'analyse sont faites et trois répétitions pour les métaux lourds.

Le pouvoir calorifique inférieure (PCI) a été déterminé à l'aide d'une bombe calorimétrique étalonnée par l'acide benzoïque en suivant la démarche décrite dans la norme [EN 15400 \(2011\)](#), le résultat de PCI est mentionné directement sur l'écran de l'appareil. Les résultats expérimentaux seront comparés avec des modèles empiriques comme il est montré dans le *tableau 36* ([Kathiravale et al. 2003](#)).

Tableau 36: Modèles théoriques pour la détermination du PCI

Modèle	Equation
Chang	$PCI = 8561.11 + 179.72H + 63.89S + 111.17 O + 91.11Cl + 66.94N$
Scheurer-Kestner	$PCI = 81(C - 3/4O) + 342.5H + 22.5S + 57(3/4)O - 6(9H + W)$
Dulong	$PCI = 81C + 342.5(H - O/5) + 22.5S - 6(9H - W)$
Steuer	$PCI = 81(C - 30/8) + 57(30/8) + 345(H - O/16) + 25S - 6(9H + W)$

Avec :

C : Pourcentage en Carbone ; **H** : Pourcentage en Hydrogène ; **O** : Pourcentage en Oxygène ; **S** : Pourcentage en Soufre ; **W** : Taux d'humidité.

Le taux des cendres a été déterminé en prenant 1g de chaque échantillon et le mettre dans un four à moufle pendant deux heures et à 550°C selon la norme [EN 15403, \(2011\)](#).

La détermination du Carbone, Hydrogène et du Soufre a été faite grâce au CHS 580 Determinator en introduisant un gramme de l'échantillon. L'Oxygène a été déduit suite à la soustraction selon le modèle empirique suivant :

$$O(\text{wt}\%) = 100 - H(\text{wt}\%) - C(\text{wt}\%) - N(\text{wt}\%) - S(\text{wt}\%) - \text{Taux des cendres (wt}\%)$$

La détermination des chlorures a été faite selon la norme [EN 15408, \(2011\)](#) en utilisant la bombe calorimétrique déjà utilisée pour la détermination du PCI. Les composés chlorés ont été convertis en chlorures qui ont été absorbés et dissous dans une solution d'absorption de KOH. Puis, un barbotage a été réalisé afin de récupérer la solution et analyser les chlorures à l'aide de la chromatographie ionique.

Les métaux lourds ont été déterminés grâce à l'ICP AOS 5100 après avoir minéralisé les échantillons des RDF par l'acide fluorhydrique et l'acide nitrique dans un digesteur microwave digestion ETHOS EASY en suivant la norme [EN15411 \(2011\)](#).

II Résultats et discussion

II.1 PCI

Le graphique représenté dans la *figure 69* montre les résultats d'analyse de PCI pour les six combinaisons de RDF.

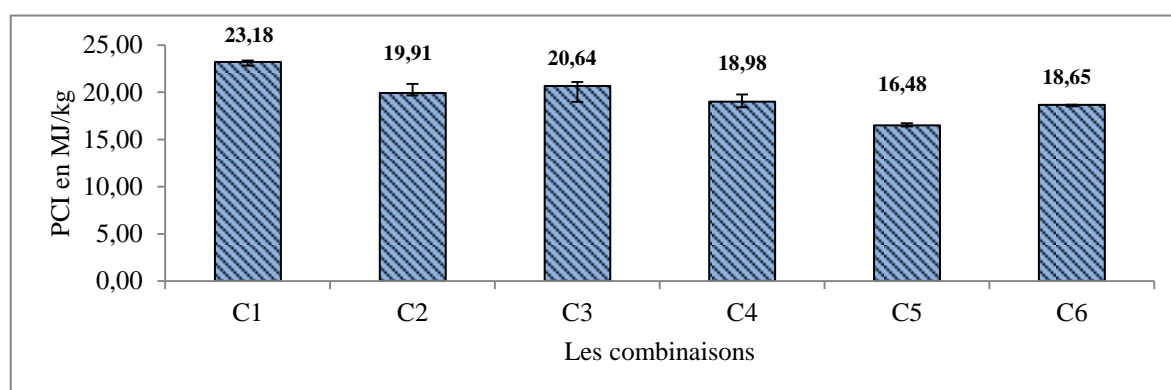


Figure 69: Résultats des analyses de PCI pour les six combinaisons

Les résultats ont montré que la combinaison (C1) a la valeur de PCI la plus élevée (23,18MJ kg⁻¹) en raison de la présence du textile et du plastique avec des pourcentages égaux. La valeur de PCI est influencée par la faible teneur en textile dans la combinaison C2 et du plastique dans la combinaison

C3. D'autre part, la valeur la plus faible de PCI est enregistrée dans la combinaison (C5) qui est influencée par l'ajout de 20% de grignons d'olive. Concernant la combinaison 4 qui contient 20% des boues d'épuration des eaux usées, la valeur du PCI (18,98 MJ kg⁻¹) est faible par rapport aux combinaisons C1, C2 et C3. Cette différence peut être expliquée par la présence des boues générées par la station d'épuration des eaux usées (STEP) de la ville de Khénifra qui se caractérise par la présence d'un taux élevé de sable (Aadraoui et al., 2019). En ce qui concerne le PCI des fractions sèches dans les DMA de la zone d'étude, il atteint 18,65 MJ kg⁻¹ ce qui est une valeur importante pour la co-incinération dans le four à ciment. (Lie et al., 2016) ont trouvé une valeur de PCI de 16,1 MJ kg⁻¹ pour un substrat composé de 24% de plastique, 23,5% de papier et de carton, 5,5% de déchets horticoles, 19,5% de bio-déchets et 19,5% de fumier de poulet. Un pourcentage élevé en textiles peut influencer la valeur de PCI. Dans l'étude de Kara (2012), il a trouvé que la valeur du PCI est de 14,49MJ kg⁻¹ pour un RDF composé de 67% de textiles, 17% de papier et 17% de plastique. Dans la présente étude, le textile est plus important dans la combinaison 3, ce qui peut expliquer la baisse de la valeur du PCI par rapport à la combinaison C1. D'autre part, les fractions plastiques sont caractérisées par une valeur énergétique élevée (Lei et al., 2016). Par conséquent, Garcés et al., (2016) a trouvé que la présence du plastique en grande quantité peut améliorer la valeur énergétique des déchets; avec des pourcentages de plastique de 65% et 15,68%, l'auteur a trouvé une valeur de PCI de 32 MJ kg⁻¹ et 25,36 MJ kg⁻¹ respectivement. Dans le cas de la présente étude, la combinaison 2 qui a un pourcentage élevé en plastique, la valeur de PCI trouvé est 19.91MJ kg⁻¹, cette valeur est influencée par la présence de combustibles non classés dans cette combinaison.

Selon la norme EN 15359 (2011), les combinaisons C1 et C3 sont dans la classe de qualité 2 en termes de PCI, tandis que C2, C4, C5 et C6 sont dans la classe 3.

II.2 Humidité

L'humidité des six combinaisons est presque la même, puisque un séchage a été adopté au préalable dans les mêmes conditions. Les résultats d'analyse de l'humidité sont montrés dans le *tableau 37*.

Tableau 37: Résultats des analyses de l'humidité des six combinaisons

Les combinaisons	Valeur moyenne d'humidité %	Ecart type corrigé	Marge d'erreur
C1	14,20	0,57	0,50
C2	12,90	0,55	0,48
C3	13,00	0,71	0,62
C4	13,90	1,34	1,18
C5	14,10	0,55	0,48
C6	14,20	1,30	1,14

II.3 Taux des cendres

Les résultats du taux des cendres pour les six combinaisons sont représentés dans le graphique de la *figure 70*.

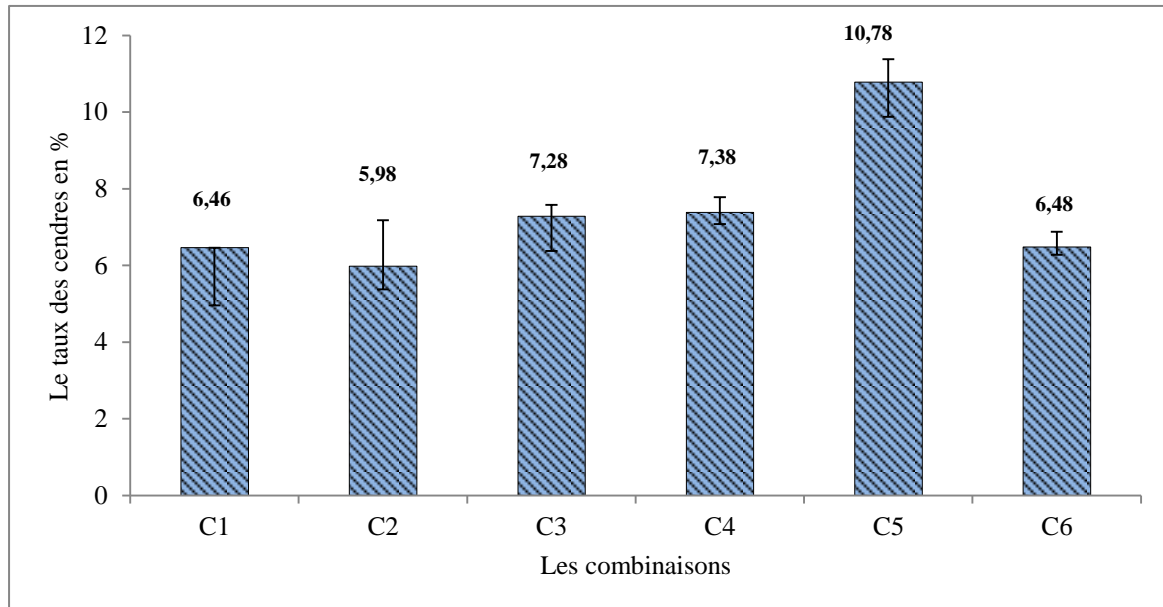


Figure 70: Résultats des analyses de taux des cendres pour les six combinaisons

Concernant le taux des cendres, il est compris entre 5,98 % et 7,38% pour toutes les combinaisons à l'exception de C5 qui atteint 10,73% car les boues de STEP de Khénifra sont caractérisées par la présence des sables à cause du caractère hydrologique de la ville ([Aadraoui et al., 2019](#)). [Kara, \(2012\)](#) a trouvé une valeur de 7,7% pour un RDF composé de 66% de textiles, 17% du papier et 17 % du plastique. [Danijela et al., \(2015\)](#) a trouvé un taux des cendres de 0,11% dans son étude sur les boues de STEP et dans l'étude de [Sever et al., \(2016\)](#), le taux des cendres pour deux types de RDF est de 12,9% et 14,9%. Les cendres générées lors de l'utilisation des combustibles de substitution dans les cimenteries peuvent être incorporées dans la composition du clinker en évitant la génération d'un déchet secondaire. Néanmoins, un taux élevé en cendres peut influencer la qualité du produit du ciment. Dans l'étude de [Cassado et al., \(2016\)](#), ils ont trouvé une valeur élevée du taux des cendres (25%) pour un RDF issu d'un traitement mécano-biologique. Ce paramètre est influencé par la présence des impuretés dans les déchets et notamment les sables, les métaux et les morceaux de verre.

II.4 Composition élémentaire

Le graphique de la *figure 71* représente les résultats de la composition élémentaire des échantillons en matière du Carbone, Hydrogène, Soufre, Azote et Oxygène.

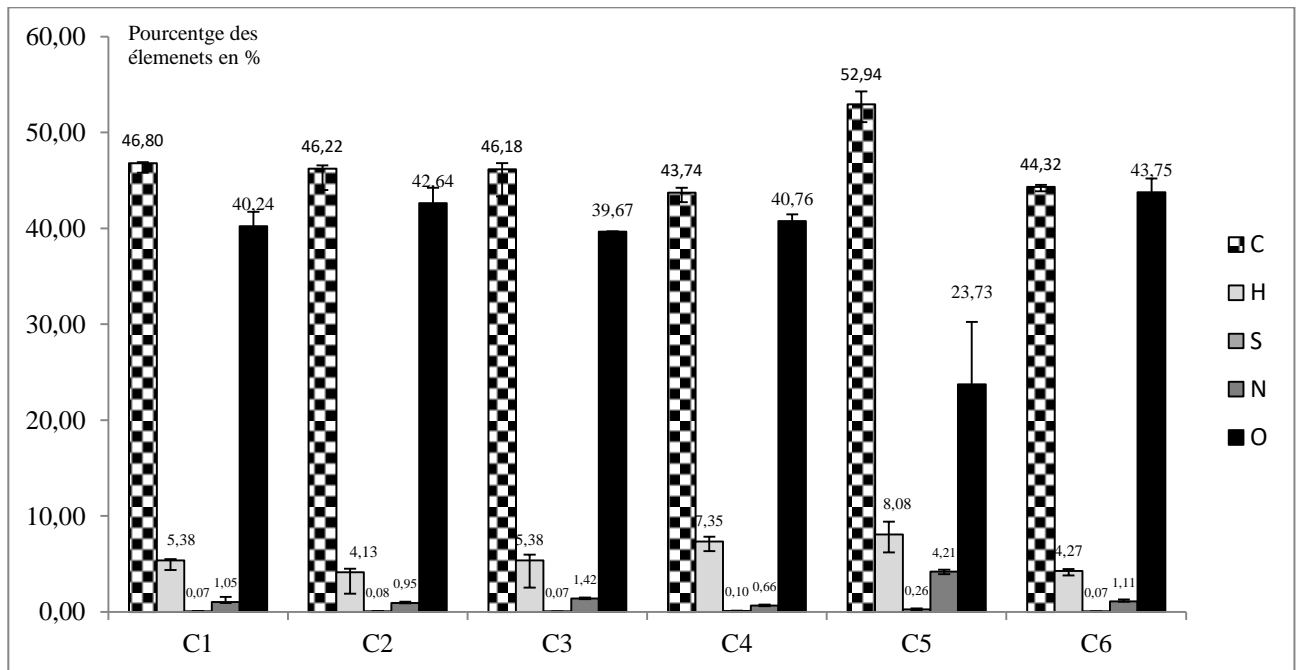


Figure 71: Résultats des analyses de la composition élémentaire des six combinaisons

On constate que les boues de STEP ont une influence sur le pourcentage du Carbone dans la combinaison 4 qui présente le taux le plus faible (42,54%) parmi toutes les combinaisons, ce qui est due au taux élevé en cendre apporté par les boues caractérisées par la présence des sables. Alors que le taux du Carbone atteint la valeur maximale dans la combinaison C5 (52,94%), le taux élevé dans cette combinaison est lié à la présence de 20% de biomasse (grignons d'olives). Concernant les autres combinaisons constituées par les fractions des déchets, le taux du Carbone varie entre 44,32% et 46,80%. En termes du Soufre qui constitue une source importante des émissions gazeuses (SO_2), il est négligeable pour toutes les combinaisons à l'exception de C5 dont le pourcentage atteint 0,26%. Dans d'autres études qui entre dans le même cadre, [Teznaoui et al., \(2015\)](#) ont trouvé la composition élémentaire (H ; 5,9%, C ; 48,9%, O ; 41,9%, S ; 0,24% et N ; 0,53%) pour un déchet modèle composé de 54 % de bois 25% de Carton 19% de PET 3% PA . Pour les déchets ménagers la composition élémentaire est de (H ; 3,2% ; C ; 24,21% ; O ; 15,59%, S ; 0,12% et N ; 0,68%) ([Pirota et al., 2013](#)), le taux du Carbone est faible car les déchets ménagers sont hétérogènes et contient les métaux, le verre et les sables. Pour les boues de STEP, [Danijela et al., \(2015\)](#) ont trouvé la composition élémentaire suivante (H ; 6,4%, C ; 52,5%, O ; 31,1%, S ; 0,8% et N ; 9,2%) le taux du Carbone est élevé dans ces boues vu la présence intense de la biomasse avec un taux faible des cendres.

II.5 Chlorures

Les résultats des analyses des chlorures sont montrés dans le graphique de la *figure 72*.

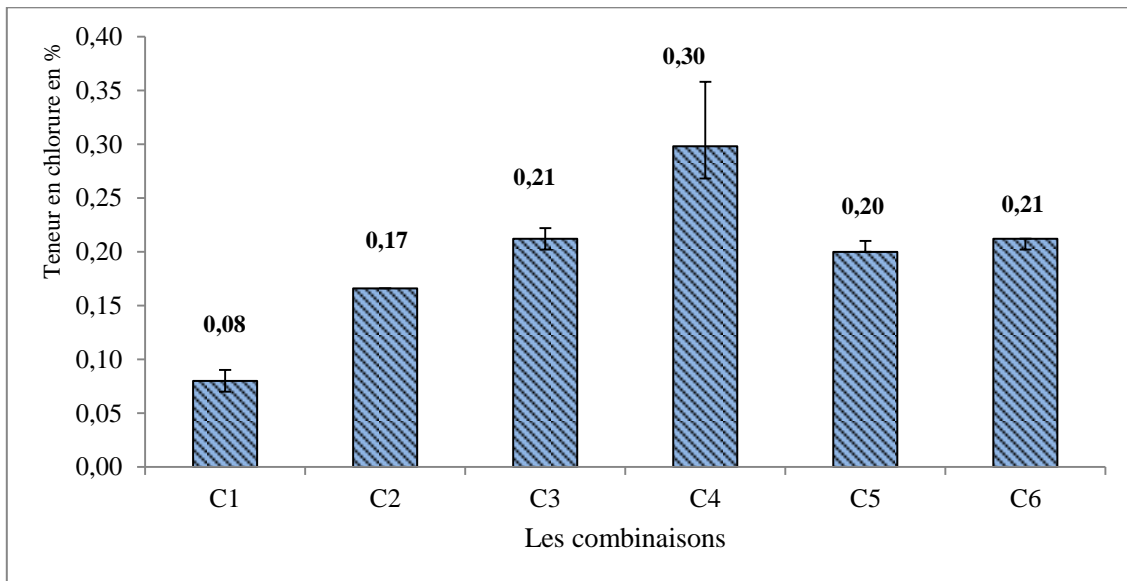


Figure 72 : Résultats des analyses des chlorures dans les six combinaisons

La concentration en chlorures est faible avec une valeur minimale dans la combinaison (C1) (0,08%). En revanche, la concentration atteint la valeur maximale dans la combinaison (C4) qui contient les boues de STEP avec une teneur de 0,30%, cette valeur peut être due aux produits chlorés utilisés dans les ménages et qui passent dans les égouts afin d'atteindre les STEP. Les valeurs trouvées restent faibles par rapport aux autres études qui ont été menées. [Kara, \(2012\)](#) a trouvé une valeur de 0,95%. [Garcias et al., \(2016\)](#) a trouvé une valeur élevée de chlorure (3,19%) pour un RDF constitué de 43,3% d'emballage, 15,68% de sac en plastique, 17% de cellulose et 24,03% de textiles, cette valeur est influencée par la présence des matières contenant les chlorures est notamment certains types de plastiques comme le PVC. Ce paramètre est très important car le taux élevé des chlorures dans les CSR peut provoquer des problèmes techniques et environnementaux via la formation des acides qui altèrent le matériel et contribuent à la production des PCDDs ([Velis et al., 2012](#)). Concernant la classification en termes de chlorures selon la norme [EN 15359](#), les combinaisons C1, C2 et C5 sont de classe de qualité 1 et les autres combinaisons sont dans la classe 2 (*tableau 9*).

II.6 Métaux lourds

Les résultats de l'analyse des métaux lourds dans les diverses combinaisons sont représentés dans le *tableau 38*.

Tableau 38: Résultats des analyses des métaux dans les combinaisons

Concentration en métaux lourds (ppm)	C1	C2	C3	C4	C5	C6
As	0,01	0,01	0,01	5,99	0,01	2,72
Ba	837,32	980,49	973,84	1003,61	1601,3	1208,16
Cd	0,42	0,9	0,01	1,47	1,2	0,63
Co	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr	31,16	45,52	66,41	37,41	58,12	53,49
Cu	48,73	30,43	44,46	27,12	90,76	32,76
Mn	34,54	46,28	63,1	29,72	79,47	43,09
Ni	10,12	12,22	15,93	10,85	14,09	8,49
Se	0,01	0,82	0,01	0,01	0,01	5,67
Zn	290,34	416,98	1215,65	2103,1	582,45	164,51
Pb	260,18	251,45	204,46	178,7	255,2	229,55

Les résultats ont montré une variation dans la concentration pour chaque combinaison, pour le plomb, la concentration est comprise entre 260,18 ppm pour (C1) et 178,7 ppm pour (C4). [Lie et al., \(2016\)](#) a trouvé des valeurs faibles en termes du Plomb (entre 5,9 ppm et 13ppm) pour trois échantillons différents alors que [Garcias et al., \(2016\)](#) a trouvé une valeur de 495 ppm. En effet, le mélange des piles avec les déchets et le taux élevé en carton et bois peintes provoque une forte concentration en plomb. Les valeurs de l’Arsenic et du Cadmium restent assez faibles sauf pour la combinaison (C6) dont les concentrations sont 2,72 ppm et 0,63 ppm respectivement. Dans les études de [Danijela et al., \(2016\)](#) et [Kara \(2012\)](#), les concentrations de cadmium sont 1,10 ppm et 1,60 ppm.

III Comparaison des résultats expérimentaux avec les modèles empiriques

Afin de choisir le modèle le plus prédictif de la valeur du PCI des RDF, des comparaisons ont été faite pour quatre modèles (*tableau 36*). Deux cas ont été pris en considération ; une corrélation de PCI pour le RDF dont la composition est constituée par les quatre catégories de combustibles et une deuxième corrélation de PCI de toutes les combinaisons de RDF.

Les graphiques représentés dans la *figure 73* montrent une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par quatre modèles empiriques. Les combinaisons prises en compte dans cette comparaison tiens en compte les RDF composés des fractions combustibles (les

quatre catégories). Pour le cas des six combinaisons incluant ceux composées des boues de STEP et des grignons d'olive, leurs résultats de comparaison sont présentés dans la *figure 74*.

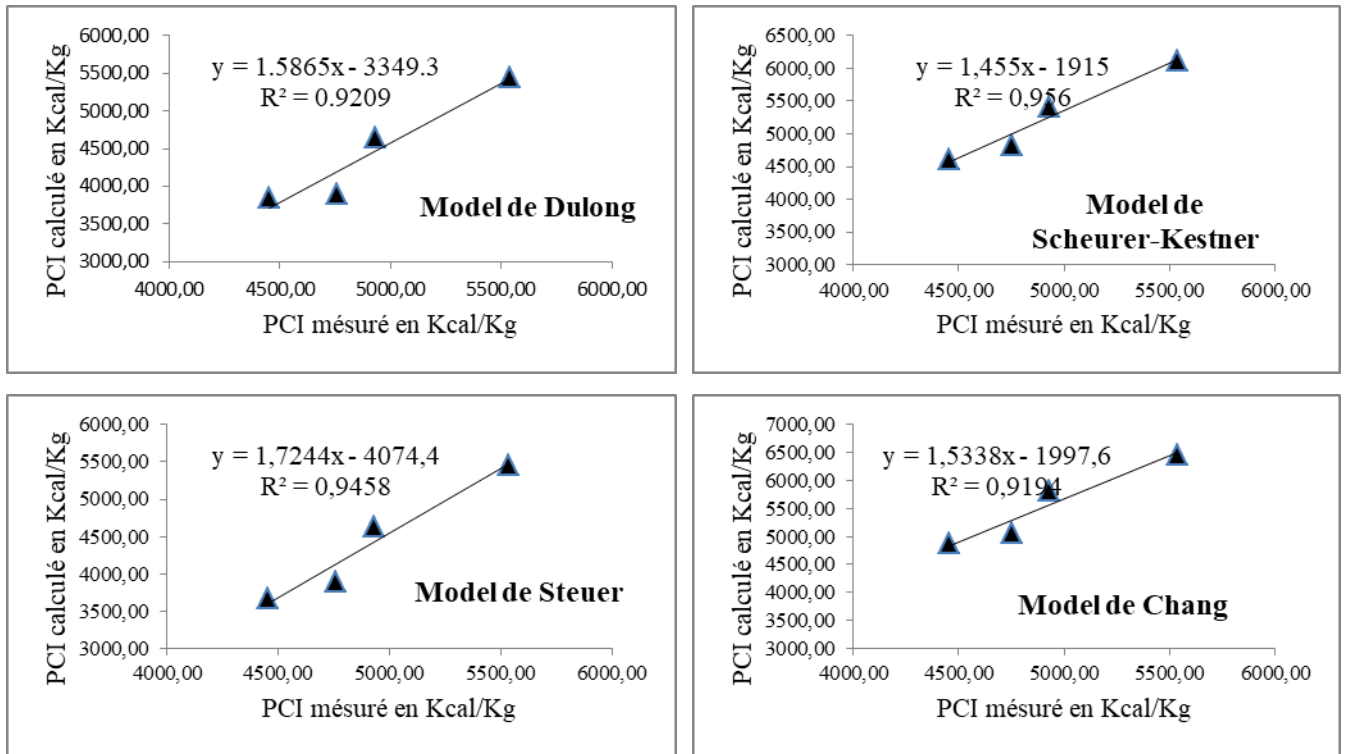


Figure 73: Comparaison des résultats prédictifs et des résultats mesurés de PCI pour les combinaisons constituées des quatre catégories des fractions combustibles

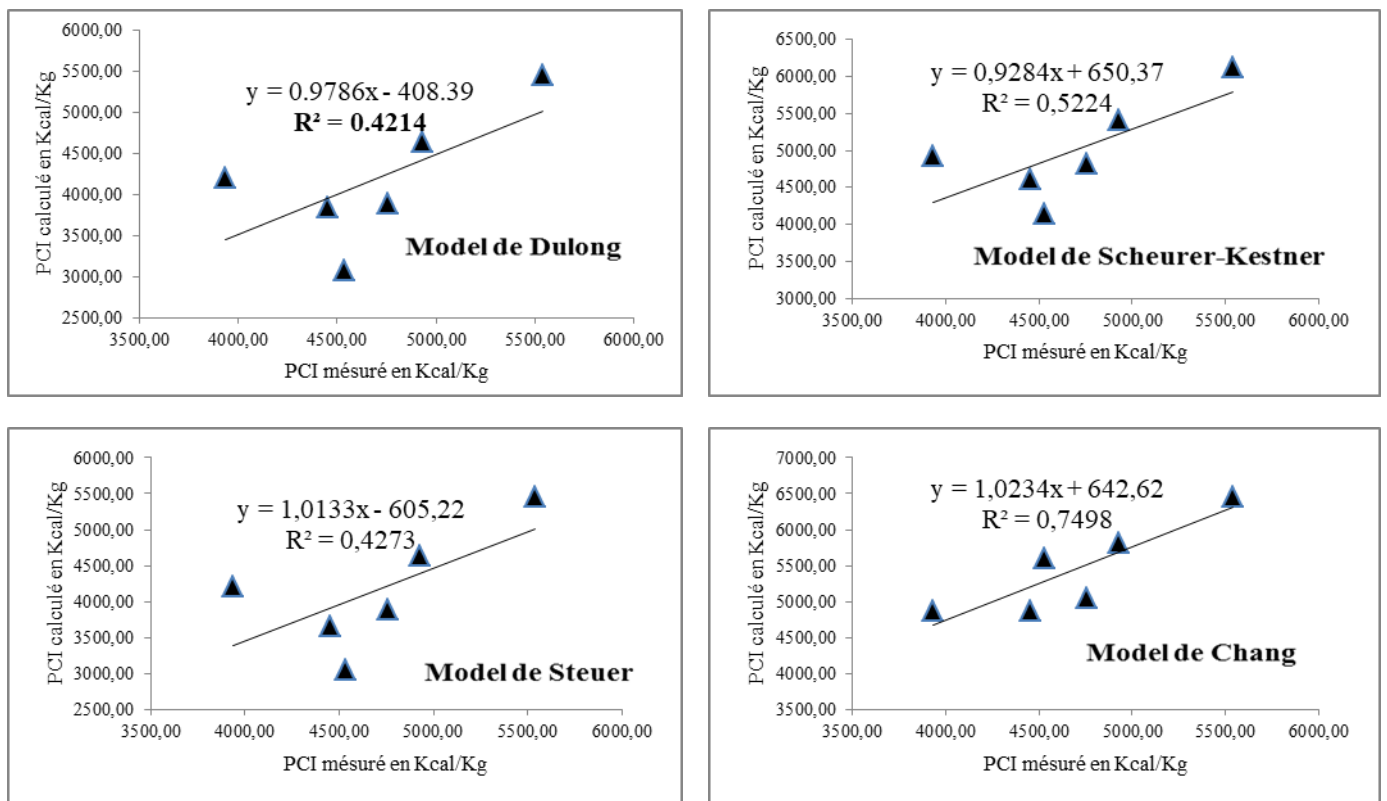


Figure 74 : Comparaison des résultats prédictifs et des résultats mesurés de PCI pour les six combinaisons

Les quatre modèles empiriques utilisés pour prédire le PCI sont en fonction de la composition élémentaire. Concernant le modèle de Dulong, il a été développé en premier lieu pour prédire le PCI du charbon, mais une fois modifié, il est également utilisé pour prédire le PCI des DMA. Pour les Modèles Dulong, Scheurer – Kestner et Steuer, le Carbone, l'Hydrogène, l'Oxygène et le Soufre sont les principaux prédicteurs de la valeur calorifique. Alors que le modèle de Chang ne tient pas compte du Carbone mais le Chlore et l'Azote sont présents dans ce modèle.

La *figure 73* montre une comparaison entre le PCI prédit par les modèles empiriques et le PCI expérimental trouvé pour les combinaisons qui ne contient pas les boues de STEP ni les grignons d'olive. Les résultats montrent que le modèle de Scheurer-Kestner est le plus prédictif avec un coefficient de corrélation ($R^2=0,95$), par contre le modèle de Chang a le coefficient le plus faible parmi les quatre modèles ($R^2=0,91$). Liu et al., (1996) ont trouvé que la valeur du PCI en utilisant le modèle de Schreuer-Kestner est similaire aux résultats expérimentaux menés sur les déchets ménagers. Dans l'étude de Garcès et al., (2016), ils ont trouvé que le modèle de Schreuer-Kestner qui prédit les résultats de PCI pour les déchets collectés en Novembre par contre ils ont trouvé que le modèle de Chang est le mieux pour la prédiction des déchets collectés en Avril.

Les graphiques de la *figure 74* montrent une comparaison entre le PCI prédit par les modèles empiriques et le PCI expérimental trouvé pour toutes les combinaisons incluant C4 et C5 qui contient les boues de STEP et les grignons d'olives. Les résultats ont montré une dispersion pour les quatre modèles avec un coefficient élevé dans le cas de l'utilisation du modèle de Chang ($R^2=0,75$). En revanche, les coefficients des trois autres modèles sont faibles ce qui ne donne pas une prédiction de PCI par corrélation, d'où l'impact des boues de STEP et les grignons d'olive dont la composition élémentaire est différentes de celles des fractions combustibles contenues dans les ordures.

Conclusion

Le deuxième chapitre de cette partie nous a permis de tirer plusieurs conclusions sur les RDF :

- ✓ Le PCI est un paramètre qui dépend de la composition de RDF en fractions combustibles ;
- ✓ La valeur de PCI des déchets après séchage est de 18,65 MJ/kg ;
- ✓ Les fractions sèches incinérables constituent 30% du flux total des déchets ;
- ✓ Les métaux lourds de RDF de la zone d'étude sont dans la norme ;
- ✓ Le mélange des RDF avec d'autres sous-produits comme les boues de STEP et les grignons d'olive a un impact sur la qualité de RDF ;
- ✓ Le modèle prédictif du PCI d'un RDF constitué par des fractions combustibles est celui de Scheurer – Kestner.

PARTIE V : ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DE LA VALORISATION DES FRACTIONS COMBUSTIBLES ISSUES DES DMA

L'investissement dans un projet de gestion de déchets nécessite une étude de faisabilité économique afin d'évaluer le bénéfice ou le déficit de l'investisseur et une étude environnementale pour évaluer les impacts négatifs et positifs du projet. L'objectif de cette partie est de réaliser une étude de faisabilité économique et d'évaluer les avantages environnementaux liés à une valorisation des combustibles solides de récupération dans une cimenterie.

CHAPITRE 1 : ETUDE DE FAISABILITE ECONOMIQUE

Les cimenteries sont des industries énergivores qui utilisent des tonnages énormes de combustibles fossiles (coke de pétrole, fuel, charbon,...) pour assurer l'énergie thermique nécessaire à la production du clinker. L'étude technique a montré que les déchets ménagers pourraient constituer une source importante en énergie à utiliser dans les usines consommatrices des énergies fossiles. Une chaîne de production des RDF en vue de co-incinération dans les fours à ciment permettra une minimisation du volume des déchets, la réduction des émissions des GES, l'augmentation de durée de vie des décharges et la minimisation de l'utilisation des énergies fossiles épuisables. Ainsi, pour le cas d'un PED, les fours des cimenteries sont plus avantageux et économiques par rapport à la construction des incinérateurs dédiés à la gestion des déchets et des unités de transformation des RDF en énergie électrique.

Ce chapitre est consacré à l'étude de la faisabilité financière de la production des RDF comme source d'énergie. Deux aspects seront étudiés, le premier concerne le besoin quantitatif en RDF pour substituer les combustibles fossiles utilisés dans les fours à ciment et le deuxième aspect vise à étudier la faisabilité financière d'un projet de production des RDF comme combustible alternatif.

I Données générales sur la co-incinération de RDF et la cimenterie de la zone d'étude

I.1 Présentation de la cimenterie

La présente étude concernera les communes de la province de Khénifra afin de chercher un modèle de gestion intégrée des déchets ménagers, et ceci en produisant un combustible alternatif à base des fractions combustibles contenues dans les DMA pour être utilisé dans les fours à ciment. Jusqu'à 2020, le Maroc présente 12 cimenteries distribuées sur le territoire du Royaume comme il est montré dans la *figure 15*. La mesure de la localisation géographique de la cimenterie a été prise en considération avec le choix de l'usine à ciment la plus proche de la zone d'étude (*figure 75*).

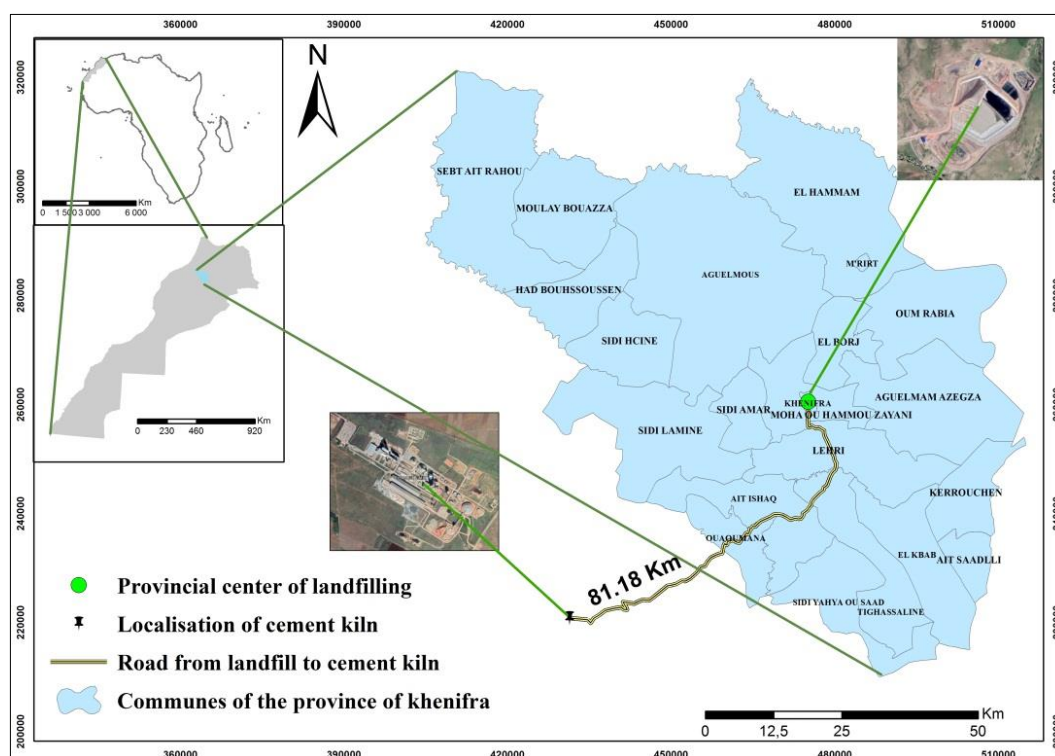


Figure 75: Localisation de la cimenterie par rapport à la province de Khénifra

I.2 Consommation des combustibles fossiles

La production du clinker est l'une des opérations les plus consommatrices d'énergie. La production d'un kilogramme de clinker nécessite 730 kcal/kg d'énergie (CIMAT, 2017). Pour assurer cette demande, les cimenteries utilisent des énergies fossiles (coke de pétrole, fuel, ...). Le calcul tient en compte les besoins en pet coke (PC) nécessaire pour la production d'une tonne de clinker. De ce fait, les besoins calorifiques pour obtenir une tonne de clinker sont calculés.

I.3 Approche de l'étude

Dans la présente analyse économique, le bénéfice de la cimenterie sera évalué si le RDF issu DMA générés dans les communes de la province de Khénifra est utilisé sous forme du substituant des combustibles fossiles (PC) à utiliser pour la production du clinker.

En se basant sur les données de la cimenterie, le besoin en tonne de pet coke pour produire une tonne de clinker a été déterminé. Les données à utiliser pour le calcul du tonnage du pet coke sont : l'énergie nécessaire pour produire une tonne de clinker en Kcal/kg et le PCI du pet coke. La connaissance de la production annuelle en clinker permettra la détermination de la quantité annuelle du PC utilisé.

I.4 Taux de substitution

Le taux de substitution des RDF dans les cimenteries peut atteindre des pourcentages très élevés jusqu'à 45% en fonction du procédé. Dans le cas de la présente étude, un pourcentage de substitution de 15% a été choisi en se basant sur les résultats de l'étude de Kara (2012) et Hemidat et al. (2019) qui ont trouvé qu'un pourcentage de 15% est le taux de substitution le plus optimal de point de vue technique et environnemental.

I.5 Besoin en RDF dans la cimenterie

Pour calculer la quantité de RDF nécessaire pour atteindre un pourcentage de 15% de substitution du pet coke, le contenu énergétique du RDF a été pris en compte en se basant sur la valeur du PCI déterminée pour les déchets de la zone d'étude. En effet, une tonne de pet coke n'a pas le même pouvoir calorifique qu'une tonne de RDF. Les données utilisées pour le calcul de RDF nécessaire pour substituer 15% du pet coke sont montrées dans le *tableau 39*.

Tableau 39: Données de calcul de besoin en RDF

Energie nécessaire pour produire un kilogramme de clinker CIMAT (2017)	730 Kcal/Kg
PCI du pet coke	7500 Kcal/Kg
PCI de RDF de la zone d'étude	4454Kcal/Kg
Production annuelle du clinker	1 000 000

I.5.1 Besoin en énergie

La quantité d'énergie nécessaire pour produire un kilogramme de clinker est 730 Kcal/ kg. Donc la quantité d'énergie à tirer des RDF avec une substitution de 15% est donnée comme suit :

$$ERDF = \frac{730 \times 15}{100} = 109,5 \text{ Kcal}$$

$$EPC = \frac{730 \times 85}{100} = 620,5 \text{ Kcal}$$

Avec :

ERDF est l'énergie nécessaire de RDF avec un taux de substitution de 15% pour produire un kilogramme de clinker.

EPC est l'énergie nécessaire de pet coke avec un taux de substitution de 85% pour produire un kilogramme de clinker.

I.5.2 Besoin en quantité massique

Le PCI de RDF de la zone d'étude est de 4453 Kcal/kg, donc la quantité de RDF nécessaire pour produire un kilogramme de clinker dans le cas d'une substitution de 15% est:

$$\text{Masse de RDF correspondant à } 109,5 \text{ Kcal} = 109,5 \text{ Kcal} \times \frac{1}{\text{PCI RDF}} = 0,024 \text{ kg}$$

Avec :

PCI RDF est le pouvoir calorifique inférieur de RDF (pour le cas de cette étude, il égale à 4454Kcal/kg).

La quantité nécessaire en pet coke est donnée comme suit :

$$\text{Masse de pet coke correspondant à } 620,5 \text{ Kcal} = 620,5 \text{ Kcal} \times \frac{1}{\text{PCI PC}} = 0,083 \text{ kg}$$

Avec :

PCI PC est le pouvoir calorifique inférieur de Pet coke (pour le cas de cette étude il égale à 7500 Kcal/kg).

La production d'une tonne de clinker nécessite 0,024 tonne de RDF et 0,083 tonne de pet coke.

I.6 Consommation des combustibles en fonction du temps

La capacité de production de la cimenterie proche de la zone d'étude est de 1 600 000 tonnes de ciment par ans, le calcul qui va être fait dans la présente étude concernera le revient économique en utilisant le RDF comme substituant de coke de pétrole pour produire 1 million de tonnes du clinker par ans. Le *tableau 40* montre la production par jour et par heure en clinker.

Tableau 40: Production du clinker par ans, par jour et par heure

Production tonne/an	Production tonne/jour	Production tonne/H
1 000 000	2 739,72	114,16

A la base de la production du clinker en fonction du temps, le tonnage des combustibles utilisés sera déduit.

$$\begin{aligned} \text{Consommation en } \frac{\text{RDF}}{\text{heure}} \\ = \text{Production en } \frac{\text{clinker}}{\text{heure}} \times \text{masse de RDF nécessaire pour produire une tonne de clinker} \end{aligned}$$

$$\text{Consommation en } \frac{\text{RDF}}{\text{heure}} = 114,6 \times 0,024 = 2,75 \text{ tonne par heure}$$

La même formule est utilisée pour calculer la consommation en pet coke par heure :

$$\text{Consommation en Pet } \frac{\text{coke}}{\text{heure}} = 114,6 \times 0,083 = 9,51 \text{ tonne par heure}$$

Récapitulatif

Comme il est montré dans les études expérimentales de [Hemidat et al., \(2019\)](#) et [Kara \(2012\)](#), 15% de RDF est le pourcentage de substitution optimal pour produire un clinker de bonne qualité. Le *tableau 41* montre l'économie en termes de pet coke.

Tableau 41 : Résultats de calcul de l'économie de pet coke

Taux de substitution en RDF %	Consommation de pet coke en %	Consommation de pet coke (kg/h)	Consommation de RDF (kg/h)	Economie de pet coke (kg/h)
0	100	11116,2	0	0
15	85	9511,8	2750,4	1604,4

L'utilisation de 15% de RDF pourrait permettre d'économiser 1604,4 kg/heure de pet coke, donc l'économie annuelle de pet coke est :

$$1,6044 \frac{\text{tonnes}}{\text{heure}} \times 24 \frac{\text{heure}}{\text{jour}} \times 365 \frac{\text{jours}}{\text{ans}} = 14054,54 \frac{\text{tonne}}{\text{ans}}$$

De ce fait, 14054,54 tonne de pet coke pourrait être économisé annuellement si la cimenterie utilise un RDF avec un PCI de 4454kcal/kg et un pourcentage de substitution de 15%.

II Faisabilité économique de la production de RDF

II.1 Méthodologie

II.1.1 Valeur actuelle nette

La réalisation d'une étude de rentabilité est nécessaire avant la prise de décision dans un investissement. L'objectif de cette partie est de mener une étude de faisabilité financière de projet de substitution du pet coke par les RDF dans la province de Khénifra. Tous les prix sont exprimés en Dirham Marocain (MAD); une feuille de calcul a été développée pour analyser la performance économique de l'investissement dans un projet de production de RDF. La valeur actuelle nette (VAN) et l'indice de profitabilité (IP) sont des outils financiers standardisés pour évaluer la rentabilité des projets. Un scénario donné est considéré économiquement attractif si la VAN est supérieure à zéro et

si l'IP est supérieure à 1. Les formules suivantes sont utilisées pour déterminer la VAN et l'IP (Antonio et al. 2002 and Di Maria; Pavesi 2005).

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n CF(1+t)^{-i}$$

$$IP = \frac{\sum_{i=1}^n CF(1+t)^{-i}}{I}$$

Avec :

I₀: l'investissement initial ; **CF** : cash-flow ; **n** : durée de vie, **t** : taux d'actualisation ; **IP** : Indice de profitabilité.

La VAN mesure l'avantage absolu susceptible d'être retiré d'un investissement. Elle constitue :

- ✓ Un critère de rejet pour chaque projet dont elle est négative;
- ✓ Un critère de sélection entre deux projets (rétention de celui avec la VAN la plus élevée).

L'IP constitue un critère de rejet pour tout projet avec un IP inférieur à 1. Pour deux ou plusieurs projets, celui choisi sera dont l'indice de profitabilité est le plus élevé.

II.1.2 Approche de l'étude

L'élimination des déchets ménagers est une responsabilité des municipalités, les communes doivent trouver une solution pour les éliminer. Comme il a été mentionné dans la deuxième partie de ce rapport, la province de Khénifra est dotée d'un centre d'enfouissement et de valorisation pour recevoir tous les déchets des 22 communes de la province. Le groupement des communes de Khénifra a délégué la gestion de la décharge au secteur privé pour un contrat de 20 ans. Le cahier des charges stipule que la société doit enfouir d'une manière contrôlée les déchets avec la récupération de 10% des matières recyclables. L'hypothèse qui a été postulée dans cette étude est que la partie combustible (fractions sèches incinérables) sera éliminée du flux total des déchets et transformée en RDF à utiliser dans les fours à ciment pour augmenter la durée de vie de la décharge.

Trois scénarios seront pris en considération ; le premier vise à produire le RDF par le délégataire de la décharge et le vendre à la cimenterie à un prix compétitif aux combustibles fossiles, le deuxième scénario stipule que la cimenterie va produire le RDF pour l'utiliser sans achat et le troisième scénario vise à produire le RDF par les communes et le vendre à la cimenterie. Les trois scénarios sont schématisés dans la *figure 76*.

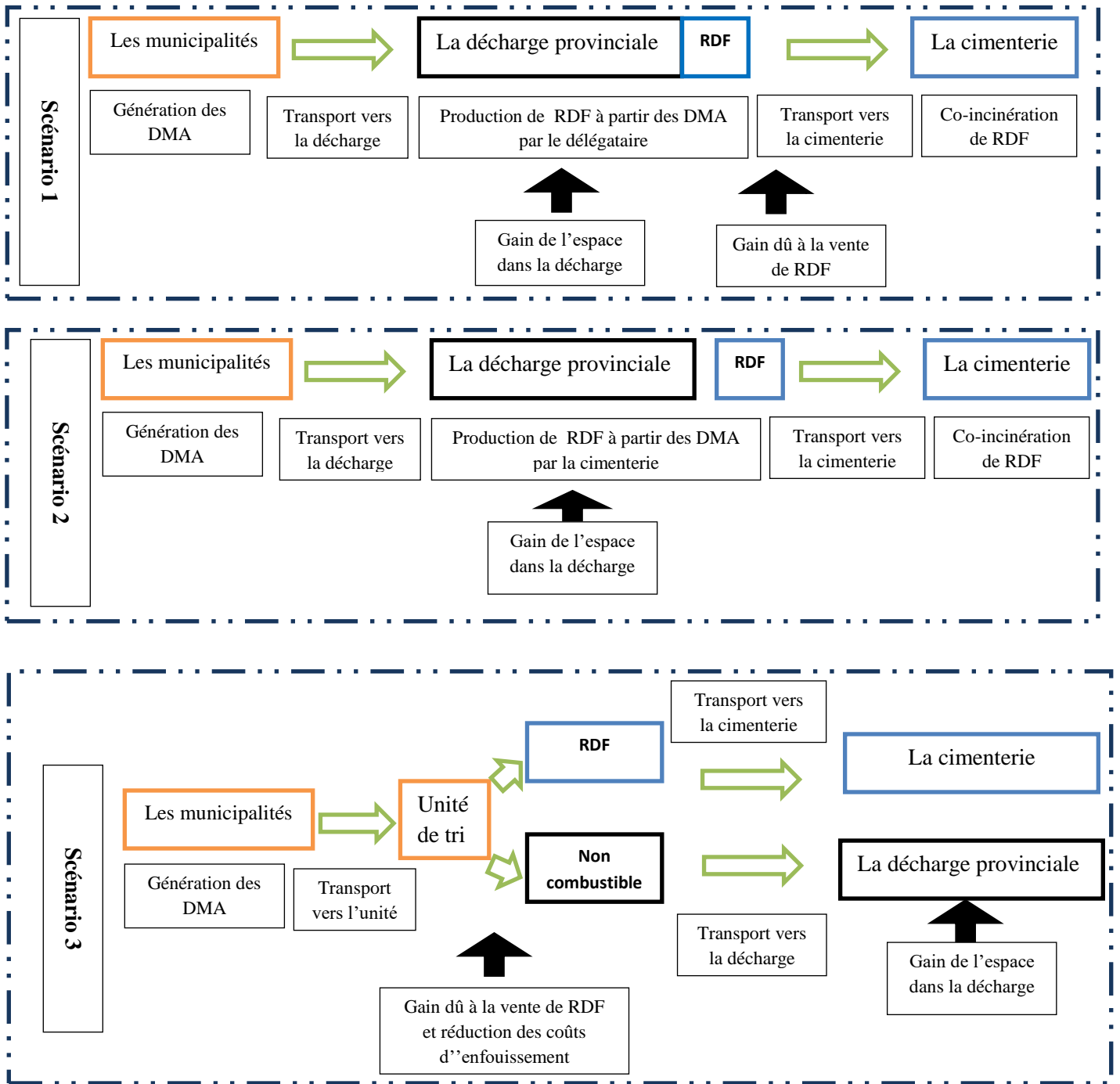


Figure 76: Les scénarios proposés pour la production du RDF.

II.1.3 Estimation des coûts

II.1.3.1. Estimation du prix de RDF

En raison de l'absence d'un marché de vente de RDF au Maroc, la formule suivante a été utilisée afin d'estimer le prix à la tonne de RDF (Pedro, 2016).

$$\text{Prix de RDF (MAD/tonne)} = \text{PCF (MAD/tonne)} * 0,59 - \text{CIE (MAD/tonne)}$$

Avec :

PCF : Prix des combustibles fossiles, nous avons pris un prix de coke de pétrole de 800MAD/tonne.

0,59 : C'est le rapport $\text{PCI}_{\text{RDF}} / \text{PCI}_{\text{pet coke}}$

II.1.3.2. Coûts d'investissement

L'investissement total en capital est la somme des coûts directs et des coûts indirects d'installation. Il a été calculé en utilisant la méthode des facteurs (Antonio et al., 2002 ; Di Maria et al., 2005), comme il est montré dans le *tableau 42*. L'investissement I_0 est celui de l'unité de production de RDF (tamis trommel, convoyeur, broyeur, équipement de tri, petit matériel,...) et des engins de transports (bennes TP et chargeurs). La durée de vie du projet est 10 ans.

Tableau 42: Facteurs pour l'estimation de l'investissement en capital de l'unité de production de RDF

Élément du coût	Valeur en MAD	Durée d'amortissement en ans
Coût de l'équipement acheté	A	10
Installation de l'équipement	0.3A	0
Instrumentation	0.15A	10
Tuyauterie	0.1A	10
Installations électriques	0.15A	0
Bâtiments	0.25A	0
Services et préparation du site	0.3A	0
Terrain*	0.05A	0
Coût total direct	B=2.3A	
Ingénierie et main d'œuvre de supervision	0.1B	0
Dépenses de construction	0.1B	0
Frais généraux	0.1B	0
Engin de collecte	Y	5
Total des dépenses en immobilisations	C=1.3B+Y=2.99A+Y	

* Le prix de terrain n'a été pris en considération pour le premier scénario.

II.1.3.3. Coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation et d'entretien sont généralement divisés en coûts d'exploitation fixes (la maintenance, la main d'œuvre d'exploitation, la supervision, l'exploitation de l'usine, les frais de laboratoire, l'assurance et les taxes locales, ...), en coûts d'exploitation variables (les matières premières, le matériel d'exploitation divers et le transport,...), et les frais généraux (les frais d'administration, les frais de distribution et de commercialisation, les frais de recherche et de développement,...). Les coûts d'exploitation annuels ont été calculés selon la méthode factorielle comme il est montré dans le *tableau 43* (Antonio et al., 2002 ; Di Maria et al., 2005).

Tableau 43: Facteurs pour l'estimation des coûts d'exploitation de l'unité de production de RDF

Élément du coût	Valeur
Consommation d'énergie	D
Main-d'œuvre	E
Main-d'œuvre d'entretien	0.1C
Maintenance de matériel	0.015C
Taxe locale	0.02C
Assurance	0.01C
Coût de traitement	$F = (0.145C) + D + (1E)$
Coût d'administration	$(0.15 E) + (0.15C)$
Distribution et vente	0.05F
charges financières	0.05C
Transport de RDF	G
Élimination des résidus de procédé	H
Coût d'exploitation annuel	$I = (0.352C) + (1.05D) + (1.2 E) + G + H$

II.1.4 Scénario 1

II.1.4.1. Contexte de l'investissement

Le délégataire de la décharge est l'investisseur dans le projet de production de RDF. Il va réserver un espace au sein de la décharge pour y construire une unité de production de RDF. Le RDF produit sera vendu à la cimenterie la plus proche à un prix compétitif aux combustibles fossiles (*figure 77*).

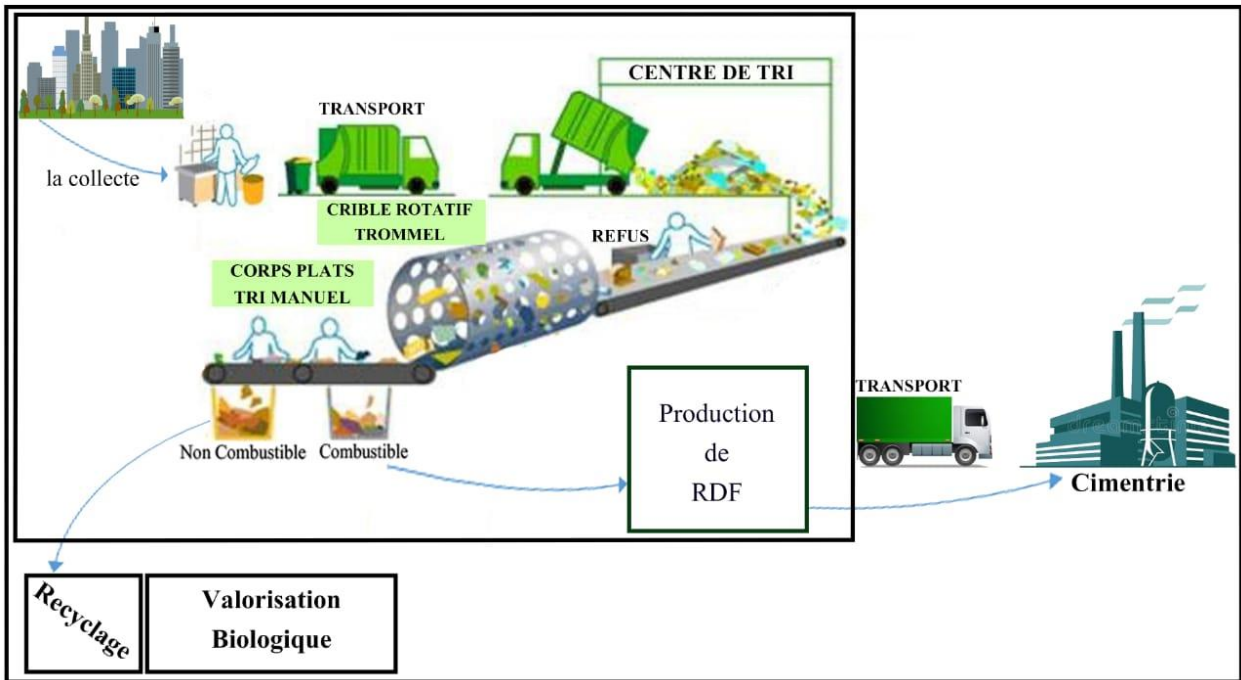


Figure 77: Scénario de production et de valorisation de RDF

II.1.4.2. Chiffre d'affaire

Le gain qui va faire le délégataire dans cet investissement est le revient de la vente de RDF à la cimenterie. Ainsi, le potentiel des déchets combustibles susceptibles d'être utilisés dans la production de RDF dans la zone d'étude est calculé grâce à la formule ci-après:

$$Q_{RDF} = RP * P_m * (1 + (TA/100))^{n-m} * 365 * R_{RDF}$$

Avec : Q_{RDF} est la quantité de RDF ; RP : Ratio de production journalière des déchets adopté pour chaque commune; P_m : Population de l'année m (estimée grâce au recensement de la population au Maroc en 2014); TA : Taux d'accroissement de la population pour chaque commune ; R_{RDF} : Le pourcentage de RDF dans les déchets.

Le chiffre d'affaire est déduit en utilisant la formule suivante :

$$\text{Chiffre d'affaire } S1 = Q_{RDF} * \text{Prix de RDF (MAD/tonne)}$$

II.1.5 Scénario 2

II.1.5.1. Contexte de l'investissement

Le deuxième scénario stipule que la cimenterie va produire le RDF pour l'utiliser dans son four comme substituant de pet coke. Il va acheter un terrain à côté de la décharge pour y construire une unité de production de RDF à partir des fractions sèches des déchets générés par les ménages.

II.1.5.2. Chiffre d'affaire

Le gain de la cimenterie réside dans l'économie de coke de pétrole suite à sa substitution par 15% de RDF. Le coke de pétrole économisé sera multiplié fois 800MAD/tonne. Les données de calcul de l'économie de coke de pétrole sur dix ans d'exploitation sont montrées dans le *tableau 44*.

Tableau 44: Economie de coke pétrole par la cimenterie sur 10 ans

Année	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Tonnage annuel de clinker (tonne/ans)	1000000	1010000	1020000	1030000	1040000	1050000	1060000	1070000	1080000	1090000
Quantité de RDF nécessaire pour 15% de substitution (tonne/ans)	24000	24240	24480	24720	24960	25200	25440	25680	25920	26160
Quantité de pet coke nécessaire pour 85% (tonne/ans)	83000	83830	84660	85490	86320	87150	87980	88810	89640	90470
Quantité de pet coke nécessaire pour 100% (tonne/ans)	97000	97970	98940	99910	100880	101850	102820	103790	104760	105730
Economie de pet coke (tonne/ans) *	14000	14140	14280	14420	14560	14700	14840	14980	15120	15260

* L'économie du coke de pétrole est déduite en soustrayant la quantité de coke de pétrole utilisée sans substitution et avec substitution

Le chiffre d'affaire est déduit en utilisant la formule suivante :

$$\text{Chiffre d'affaire S2} = \text{Economie en coke de pétrole} * \text{le prix de coke de pétrole}$$

Etant donné que le prix de coke de pétrole est variable et dépend fortement du prix de pétrole, un prix moyen sur huit ans a été pris dans le dimensionnement de cette étude (800 MAD/tonne) (CDG capital research, 2018). Ainsi, le choix de 15% de substitution est justifié par le pourcentage optimale trouvé dans la littérature (Kara, 2012 ; Hemidat et al., 2019).

II.1.6 Scénario 3

II.1.6.1. Contexte de l'investissement

L'investisseur dans ce scénario est le groupement des communes. Un terrain sera acheté pour y construire l'unité de production de RDF. Les fractions combustibles seront utilisées pour produire le RDF, alors que les fractions non combustibles seront envoyées à la décharge. Le RDF produit sera vendu à la cimenterie la plus proche à un prix compétitif aux combustibles fossiles.

II.1.6.2. Chiffre d'affaire

Le gain qui va faire le groupement des communes dans cet investissement est le reviens de la vente de RDF à la cimenterie plus la minimisation des coûts d'enfouissement dans la décharge. Le prix d'enfouissement est 240 MAD/ tonne. La même formule du scénario 1 a été utilisée pour estimer le potentiel annuel en RDF.

Le chiffre d'affaire est déduit en utilisant la formule suivante :

$$\text{Chiffre d'affaire S3} = (Q_{\text{RDF}} * \text{Prix de RDF (MAD/tonne)}) + (Q_{\text{FC}} * 240 \text{ MAD})$$

Avec : Q_{RDF} : Est la quantité de RDF produit par ans ;

Q_{FC} : Est la quantité des fractions combustibles non mises en décharge.

II.2 Résultats et discussion

II.2.1. Coûts d'investissement et d'exploitation

Les résultats de l'estimation de l'investissement et les résultats des coûts d'exploitation sont montrés dans le *tableau 45*.

Tableau 45: Résultats d'estimation de l'investissement en capitale et d'investissement en MAD

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Total des dépenses en immobilisations	9 897 500	10 073 000	10 073 000
Coût d'exploitation annuel	5 303 920	5 365 696	5 365 696

Les coûts d'investissement et d'exploitation pour les trois scénarios sont les mêmes à l'exception du scénario 1, car le délégataire va profiter du terrain de la décharge pour y construire l'unité de production de RDF. En revanche, pour les scénarios 2 et 3, le terrain sera acquis par l'investisseur. Le détail de calcul des coûts d'investissement et d'exploitation est montré dans les *tableaux 46 et 47*.

Tableau 46 : Résultats d'estimation de l'investissement en capitale en MAD

Élément du coût	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Coût de l'équipement acheté	2700000	2700000	2700000
Installation de l'équipement	810000	810000	810000
Instrumentation	405000	405000	405000
Tuyauterie	270000	270000	270000
Installations électriques	405000	405000	405000

Bâtiments	675000	675000	675000
Services et préparation du site	810000	810000	810000
Terrain	-	135000	135000
Coût total direct	6075000	6210000	6210000
Ingénierie et main d'œuvre de supervision	607500	621000	621000
Dépenses de construction	607500	621000	621000
Frais généraux	607500	621000	621000
Engin de transport	2000000	2000000	2000000
Total des dépenses en immobilisations	9 897 500	10 073 000	10 073 000

Tableau 47: Résultats d'estimation des coûts d'exploitation en MAD

Élément de coût	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Consommation d'énergie	120000	120000	120000
Main-d'œuvre	720000	720000	720000
Main-d'œuvre d'entretien	72000	72000	72000
Maintenance de matériel	148463	151095	151095
Taxe locale	197950	201460	201460
Assurance	98975	100730	100730
Coût d'administration	1592625	1618950	1618950
Distribution et vente	117357	118629.25	118629.25
charges financières	494875	503650	503650
Transport de RDF	730000	730000	730000
Élimination des résidus de procédé	100000	100000	100000
Coût d'exploitation annuel	5 381 994	5 443 814.25	5 443 814.25

II.2.2. Estimation du prix de RDF

Les résultats d'estimation du prix de vente de RDF sur 10 ans d'investissement sont montrés dans le *tableau 48*.

Tableau 48: Résultats d'estimation des prix de vente de RDF en MAD/tonne

Année d'exploitation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prix de coke de pétrole PCF (MAD/tonne)	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
$PCI_{RDF}/PCI_{pet\ coke}$	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Coûts d'investissement (10^4 MAD/ans)	507,1	77,8	77,8	77,8	77,8	77,8	37,8	37,8	37,8	37,8
Coûts d'exploitation (10^4 MAD/ans)	1 043,6696	614,8	615,8	616,8	617,8	618,8	579,8	580,8	581,8	582,8
Potentiel en RDF dans la zone d'étude (10^3 tonne/ans)	25,766	26,044	26,329	26,62	26,917	27,22	27,53	27,847	28,17	28,5
Prix estimé de RDF (MAD/tonne de RDF)	67	236	239	241	244	246	263	266	268	270

Il est constaté que le prix de RDF augmente avec le temps, ce dernier pourrait atteindre 270 MAD/tonne dans la dixième année d'exploitation. Un changement dans la qualité de RDF et du prix de coke de pétrole peut influencer négativement ou positivement le prix de vente.

II.2.3. Chiffre d'affaire

Les résultats de l'estimation des chiffres d'affaires pour les trois scénarios pendant 10 ans sont représentés dans la *figure 78*.

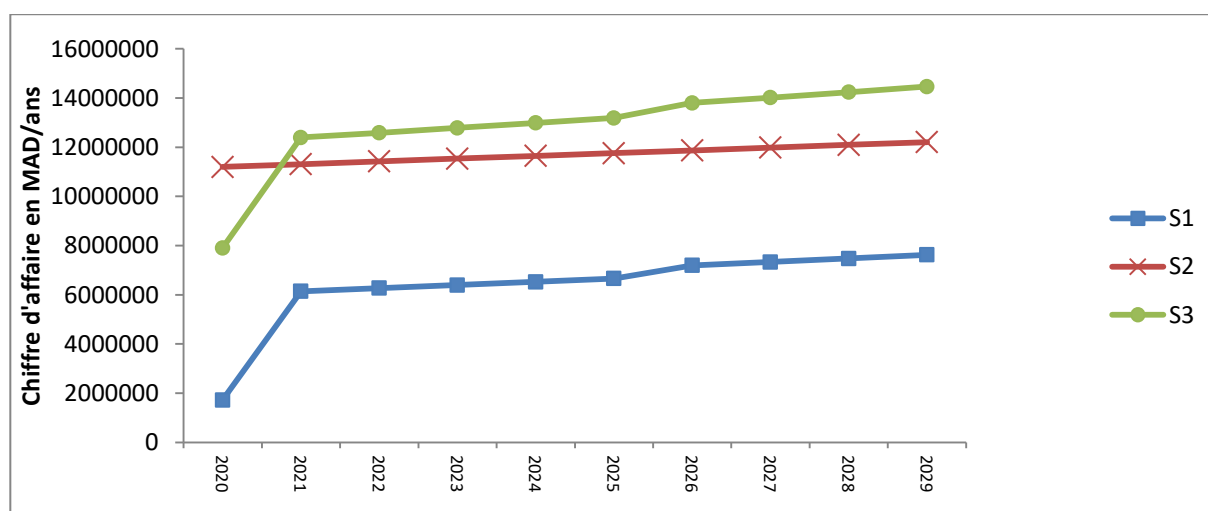


Figure 78: Résultats de calcul des chiffres d'affaires des trois scénarios

A partir des résultats de calcul des chiffres d'affaires, il est remarqué que le scénario 3 est le plus avantageux, le chiffre d'affaire pourrait passer de 7 908 537MAD pendant la première année à 14 463 726 MAD pendant la dixième année en fonction de l'évolution de prix de vente de RDF. En revanche, le chiffre d'affaire du scénario 1 est petit par rapport aux autres scénarios avec un chiffre de 1 724 751MAD en première année qui pourrait atteindre 7 623 818 MAD en dixième année d'exploitation.

II.2.3. VAN et IP

Le détail de calcul des VAN pour les trois scénarios est représenté dans les *tableaux 49, 50 et 51*.

Tableau 49 : Résultats de calcul de la VAN pour le scénario 1

Années	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Chiffre d'affaire en DH (HT)		1 724 751	6 144 934	6 269 302	6 396 589	6 526 832	6 660 072	7 196 349	7 335 704	7 478 180	7 623 819
Estimation des coûts exploitation		5 365 696	5 370 000	5 380 000	5 390 000	5 400 000	5 410 000	5 420 000	5 430 000	5 440 000	5 450 000
Dotations aux amortissements		4 936 000	778 000	778 000	778 000	778 000	778 000	378 000	378 000	378 000	378 000
Résultats bruts		-8576945	-3066	111302	228589	348832	472072	1398349	1527704	1660180	1795819
IS*		-2573083	-920	33391	68577	104650	141622	419505	458311	498054	538746
Résultats net		-6003861	-2146	77912	160012	244183	330451	978845	1069393	1162126	1257073
CAF	9 897 500	-1 067 861	775 854	855 912	938 012	1 022 183	1 108 451	1 356 845	1 447 393	1 540 126	1 635 073
Augmentation du BFR	1500000	1800000	2000000								
Récupération de BFR											5300000
Cash-flow	-11397500	-2867861	-1224146	855912	938012	1022183	1108451	1356845	1447393	1540126	6935073
Cash-flow actualisé	-11397500	-2389885	-850101	495319	452359	410792	371218	378670	336617	298487	1120053
Cash-flow cumulé	-11397500	-13787385	-14637486	-14142167	-13689807	-13279015	-12907797	-12529127	-12192510	-11894023	-10 773 970

* IS est de 30%

Tableau 50: Résultats de calcul de la VAN pour le scénario 2

Années	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Chiffre d'affaire en DH (HT)		11200000	11312000	11424000	11536000	11648000	11760000	11872000	11984000	12096000	12208000
Estimation des coûts exploitation		5365696	5370000	5380000	5390000	5400000	5410000	5420000	5430000	5440000	5450000
Dotation aux amortissements		5071000	778000	778000	778000	778000	778000	378000	378000	378000	378000
Résultats bruts		763304	5164000	5266000	5368000	5470000	5572000	6074000	6176000	6278000	6380000
IS		228991	1549200	1579800	1610400	1641000	1671600	1822200	1852800	1883400	1914000
Résultats net		534313	3614800	3686200	3757600	3829000	3900400	4251800	4323200	4394600	4466000
CAF	10073000	5605313	4392800	4464200	4535600	4607000	4678400	4629800	4701200	4772600	4844000
Cash-flow	-10073000	5605313	4392800	4464200	4535600	4607000	4678400	4629800	4701200	4772600	4844000
Cash-flow actualisé	-10073000	4671094	3050556	2583449	2187307	1851450	1566787	1292092	1093349	924962	782333
Cash-flow cumulé	-10073000	-5401906	-2351350	232099	2419406	4270856	5837642	7129735	8223083	9148045	9 930 378

Tableau 51 : Résultats de calcul de la VAN pour le scénario 3

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Chiffre d'affaire en DH (HT)		7908538	12395579	12588270	12785363	12986917	13192991	13803646	14018944	14238949	14463727
Estimation des coûts d'exploitation		5365696	5370000	5380000	5390000	5400000	5410000	5420000	5430000	5440000	5450000
Dotation aux amortissements		5071000	778000	778000	778000	778000	778000	378000	378000	378000	378000
Résultats bruts		-2528158	6247579	6430270	6617363	6808917	7004991	8005646	8210944	8420949	8635727
IS		-758447	1874274	1929081	1985209	2042675	2101497	2401694	2463283	2526285	2590718
Résultats net		-1769711	4373305	4501189	4632154	4766242	4903493	5603952	5747661	5894665	6045009
CAF	10073000	3301289	5151305	5279189	5410154	5544242	5681493	5981952	6125661	6272665	6423009
Augmentation du BFR*	1500000	1800000	2000000								
Récupération de BRF											5300000
Cash-flow	-11573000	1501289	3151305	5279189	5410154	5544242	5681493	5981952	6125661	6272665	11723009
Cash-flow actualisé	-11573000	1251074	2188406	3055086	2609063	2228106	1902721	1669453	1424633	1215684	1893331
Cash-flow cumulé	-11573000	-10321926	-8133519	-5078433	-2469370	-241263	1661457	3330910	4755543	5971227	7 864 559

*Le BFR a été estimé par le stockage de RDF en première année et en deuxième année de l'exploitation

La comparaison entre les VAN des trois scénarios est montrée dans la *figure 79*.

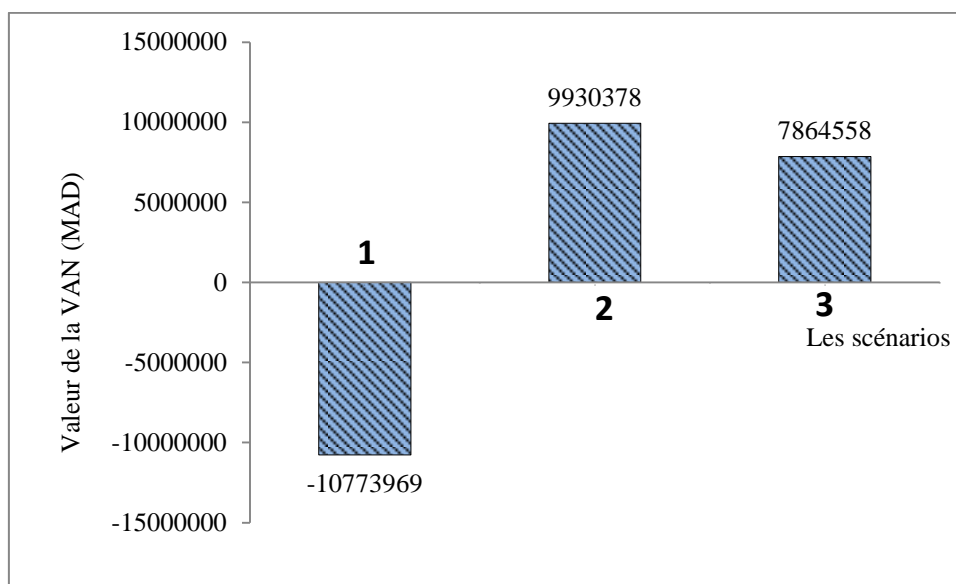


Figure 79: Comparaison des VAN des trois scénarios

- ✓ La VAN trouvée pour le scénario 1 est -10 773 969 MAD. L'IP n'est pas calculé puisque la VAN est négative ;
- ✓ La VAN calculée pour le scénario 2 est 9 930 378 MAD supérieure à zéro, donc le projet est rentable. L'indice de profitabilité calculé est 1,98 ;
- ✓ La valeur de la VAN pour le scénario 3 est 7 864 558 MAD supérieure à zéro, donc le projet est rentable. L'indice de profitabilité calculé est 1,78.

A partir des résultats comparatifs, on constate que le scénario d'investissement 2 est le plus favorable et avantageux avec une VAN plus élevée et un IP important grâce à la consommation directe du RDF produit par la cimenterie sans achat. Le troisième scénario est avantageux puisque la valeur de la VAN est relativement grande, de même pour l'indice de profitabilité (IP) qui atteint 1,78. En effet, La nouvelle loi des communes territoriales 113-14 (DGCL, 2016) a donné la possibilité aux communes pour créer des sociétés. De ce fait, un tel investissement pourrait aider les communes pour pallier aux problèmes financiers qu'elles connaissent et en même temps gérer les déchets d'une manière durable. En revanche, le scénario 1 n'est pas rentable puisque la VAN trouvée est inférieure à zéro ce qui est dû au faible prix de vente de RDF. Afin de visualiser l'impact du prix de RDF sur la VAN et sur le gain de cimenterie, une simulation a été menée avec la fixation du prix de RDF sur 10 ans d'exploitation. Les prix de vente ont été variés de 30MAD/tonne jusqu'à 500 MAD/tonne de RDF. Les résultats sont présentés dans *figure 80*.

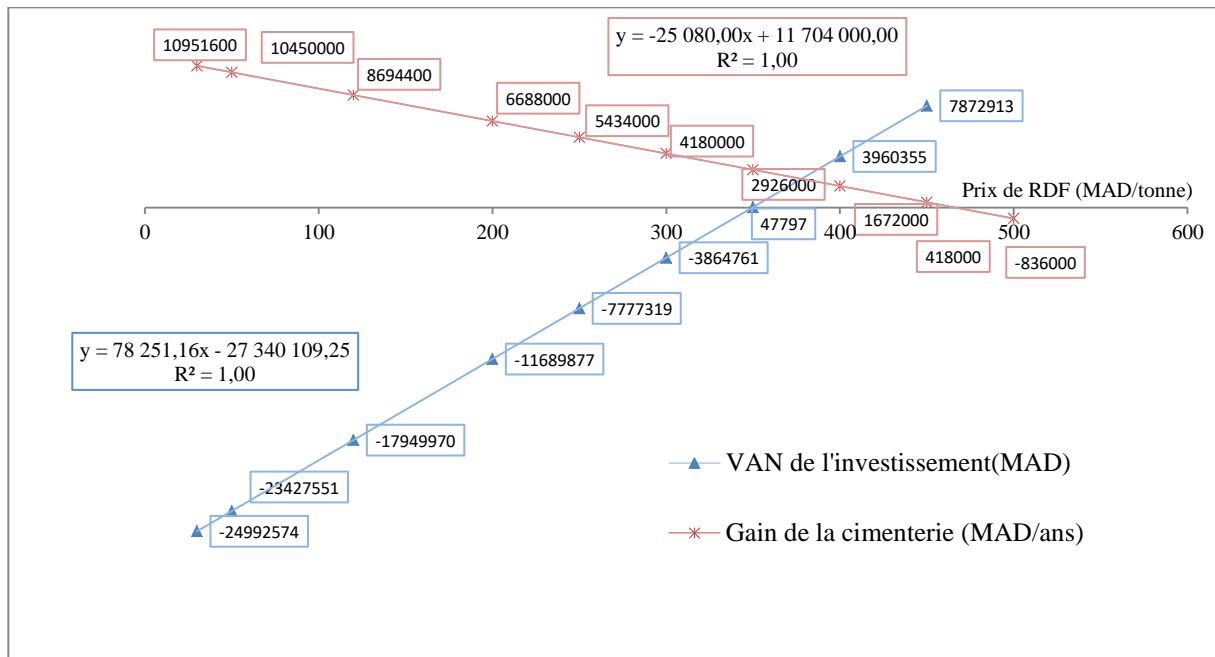


Figure 80: Impact du prix de vente de RDF sur la VAN et sur le gain économique de la cimenterie

A partir d'un prix de 466,66 MAD à la tonne de RDF, la cimenterie ne profite et ne perd rien, un chiffre inférieure à ce prix est considéré avantageux pour l'usine. En revanche, si le prix de RDF est supérieur à 466,66 MAD/tonne, le coke de pétrole devient bénéfique financièrement pour la cimenterie. Dans l'autre partie, la valeur minimale de prix de vente de RDF pour que le projet soit rentable pour la société (scénario 1) est de 349 MAD/tonne dès la première année d'investissement, un chiffre inférieure à ce prix rend le projet non rentable pour la société. D'autres chaînes de traitement peuvent être ajoutées à l'unité de production de RDF (compostage, récupération des métaux,...) afin d'améliorer le reviens de la société. Dans l'étude d'Antonio et al., (2002), plusieurs scénarios ont été étudié et ils ont trouvé que la production de RDF sans autres chaînes de traitement est faisable économiquement. En Thaïlande une étude de faisabilité a été menée pour évaluer le rendement de production d'électricité à partir de 220 tonnes par jour de RDF, il a été suggéré qu'un projet de centrale électrique d'une capacité de production de 5 à 13 MW puisse être développé (Srisaeng et al.,2017). Dans l'étude de Reza et al. (2013), il a trouvé dans son étude que la production de RDF en vue d'une utilisation dans les fours des cimenteries est viable économiquement avec un bénéfice net de 122,6 USD/tonne de RDF. Kara et al., (2012) a trouvé qu'une cimenterie en turque peut économiser 122,6USD/heure si le pet coke est substitué par 15% de RDF (17660 tonne/ans de RDF). Hemidat et al., (2019) a trouvé dans son étude menée sur une cimenterie en Jordanie qu'il peut économiser 486 USD/heure avec un taux de substitution de 15% équivalant à 35 424 tons/ans de RDF. Le tableau 52 montre les bénéfices de chaque scénario sur la cimenterie, le délégataire de la décharge et le groupement des communes.

Tableau 52: Les bénéfices liés à la production et l'utilisation de RDF par la cimenterie

	Groupement des communes	Cimenterie	Délégataire de la décharge
Scénario 1	<p>Economique : Aucun avantage ;</p> <p>Environnemental : Réduction des déchets enfouis dans les territoires des communes ;</p> <p>Social : Satisfaction de la population de la qualité de service.</p>	<p>Economique : Si le prix de vente de RDF est 349MAD/tonne, la cimenterie pourrait faire des gains suite à la réduction de la consommation de PC ;</p> <p>Environnemental : Réduction des émissions gazeuses issues de PC ;</p> <p>Social : Pas d'avantage social.</p>	<p>Economique : Gain effectué suite à la vente de RDF à 349MAD/tonne ;</p> <p>Environnemental : Augmentation de la durée de vie de la décharge et minimisation des impacts liés aux lixiviats et au biogaz ;</p> <p>Social : Recrutement de la main d'œuvre.</p>
Scénario 2	<p>Economique : Aucun avantage ;</p> <p>Environnemental : Réduction des déchets enfouis dans les territoires des communes ;</p> <p>Social : Satisfaction de la population de la qualité de service.</p>	<p>Economique : Gain de la cimenterie suite à la substitution de coke de pétrole par le RDF qu'elle produit ;</p> <p>Environnemental : Réduction des émissions gazeuses issues de PC ;</p> <p>Social : Recrutement de la main d'œuvre.</p>	<p>Economique : Aucun avantage ;</p> <p>Environnemental : augmentation de la durée de vie de la décharge et minimisation des impacts liés aux lixiviats et biogaz ;</p> <p>Social : aucun avantage.</p>
Scénario 3	<p>Economique : Gain suite à la vente de RDF et gain suite à la minimisation des frais de la mise en décharge ;</p> <p>Environnemental : Réduction des déchets enfouis dans les territoires des communes</p> <p>Social : Satisfaction de la population de la qualité de service et recrutement de la main d'œuvre</p>	<p>Economique : Gain suite à l'achat du RDF à un prix compétitif aux combustibles fossiles ;</p> <p>Environnemental : Réduction des émissions gazeuses issues de PC ;</p> <p>Social : Pas d'avantage social.</p>	<p>Economique : Aucun avantage;</p> <p>Environnemental : Augmentation de la durée de vie de la décharge et minimisation des impacts liés aux lixiviats et biogaz ;</p> <p>Social : Pas d'avantage social.</p>

Conclusion

Le présent chapitre a été conçu pour étudier la faisabilité financière de la production de RDF à partir des DMA générés par les communes de la province de Khénifra et d'évaluer leur utilisation comme combustible de substitution pour la production du clinker. Les résultats de l'analyse des trois scénarios montrent que l'investissement dans un projet de production de RDF par le groupement des communes et par la cimenterie pourrait être rentable. En revanche, le projet est non rentable pour le délégataire de la décharge avec un prix de vente de RDF inférieure à 349 MAD/tonne.

Les résultats de cette recherche fournissent des renseignements clés sur l'aspect financier à long terme du traitement des DMA, ce qui pourrait servir de base à élaborer un plan de traitement des déchets dans les régions où se trouve des cimenteries utilisant les combustibles fossiles comme source d'énergie.

CHAPITRE II : AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX DE LA VALORISATION DE RDF

Dans le but d'évaluer les impacts environnementaux de l'utilisation de RDF comme mode de valorisation énergétique et d'élimination des déchets ménagers, quelques aspects environnementaux seront évalués. En premier lieu, un test de lixiviation sera mené afin de réaliser une évaluation comparative de la qualité des lixiviats générés par l'enfouissement des déchets totaux et des déchets dépourvus des fractions combustibles. Puis, des calculs seront faits pour évaluer la réduction des GES émises par l'incinération dans un four à ciment si le RDF est utilisé comme substituant de coke de pétrole.

Le scénario montré dans la *figure 81* sera pris en considération dans l'étude des avantages environnementaux.

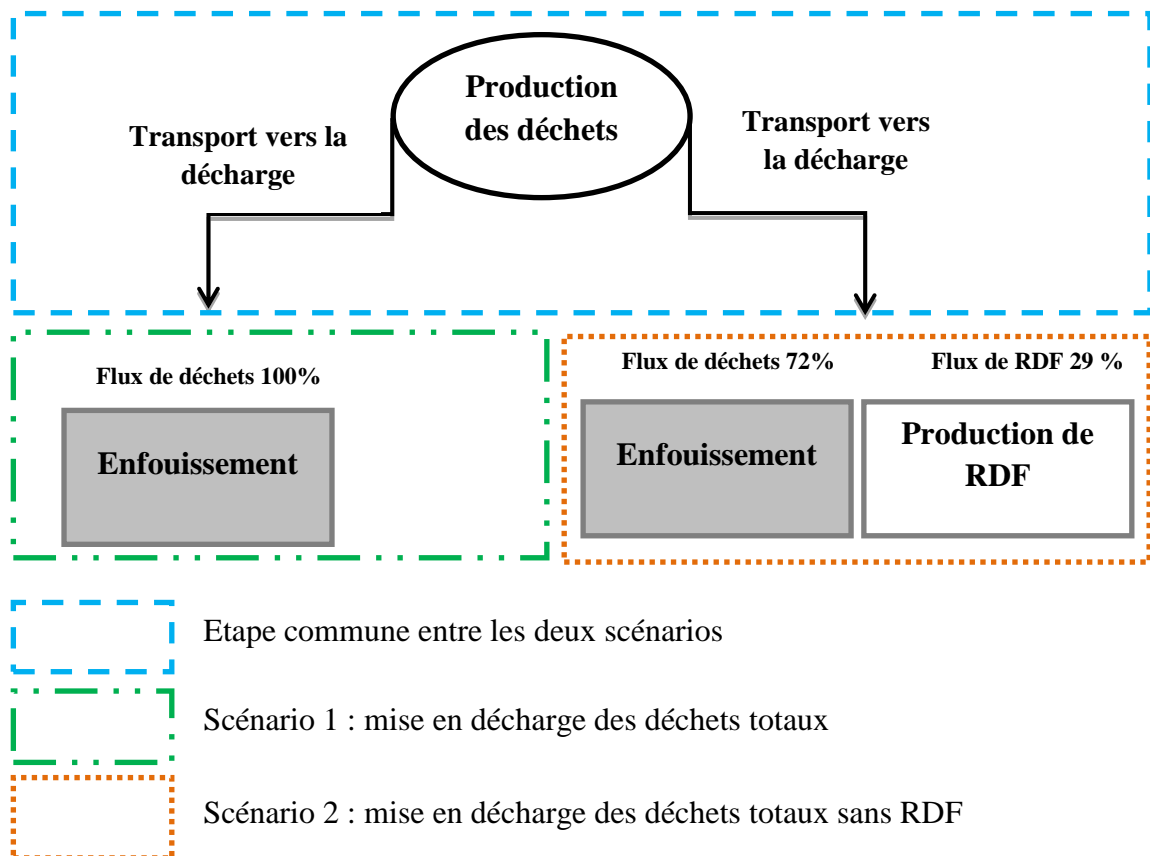


Figure 81: Les deux scénarios proposés pour l'étude de la lixiviation des déchets

I Matériels et méthodes

I.1 Test de lixiviation

Un test de lixiviation pourrait être utilisé pour simuler le phénomène de lixiviation dans les décharges. Le comportement à la lixiviation des ordures peut être mené grâce à des Tests de Lixiviation (TL) qui

permettent dans certaines conditions d'évaluer le potentiel de relargage des composés rapidement ou lentement mobilisables. Le protocole normalisé français (EN 12457/1-4) est le plus utilisé dans le cas des DMA malgré les critiques liés à la reproduction des conditions in situ. Les TL peuvent être fait avec ou sans renouvellement de la phase liquide. Pour le cas de la présente étude, le TL sans renouvellement a été utilisé car il est plus efficace que le TL avec renouvellement suite au relargage important des polluants dans le cas des DMA (Parodi et al., 2011). L'objectif de cette partie est d'évaluer l'aspect qualitatif des lixiviats générés par les déchets totaux symbolisés DT et par les déchets sans RDF symbolisé DSRDF.

Le principe du TL selon la norme AFNOR NF EN 12457-4 est montré dans la *figure 82*.

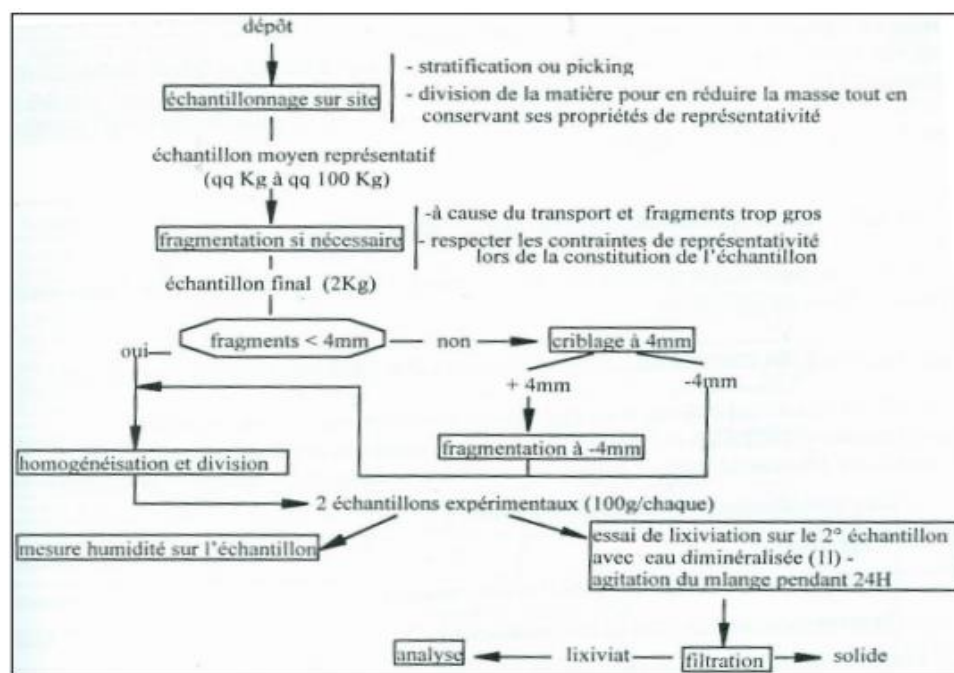


Figure 82: Principe du test de lixiviation selon la norme AFNOR NF EN 12457-4

I.1.1 Préparation des échantillons

Les déchets utilisés dans le test sont pris des bacs à ordures de la ville de Khénifra. Deux types d'échantillons ont été préparés ; Les déchets totaux (DT) reconstitués en respectant les pourcentages massiques de la composition des déchets au Maroc (Ouigmane et al., 2018), et les déchets bruts sans RDF (DSRDF) constitués de toutes les autres fractions à l'exception de la fraction combustible. Les échantillons sont déchetés en petits fragments et mélangés (AFNOR NF EN 12457-4). La composition massique des deux types d'échantillons est montrée dans le *tableau 51*.

Table 51: composition en pourcentage massique des DT et des DSRDF

Fraction	DT	DSRDF
Non combustible (%)	71	100
Combustible (%)	29	0

I.1.2 Les paramètres de lixiviation

Les tests de lixiviation ont été effectués avec un rapport liquide / solide (L / S) de 10 à différentes durées sans renouvellement de la phase liquide. Des études ont montré que le rapport L/S de 10 devrait favoriser un contact approprié entre les déchets et l'éluant (François et al., 2006; Parodi et al., 2011). L'eau distillée est utilisée comme éluant (pH = 6,5 ; résistivité = 18,2 mΩ.cm). Pratiquement, 100 g des déchets secs fragmentés et reconstitués sont mélangés à un litre d'eau distillée. Le mélange est agité sur un système d'agitation. Toutes les expériences ont été réalisées à température ambiante (20 °C) dans des flacons en plastique. Pour avoir un échantillon représentatif dans chaque flacon, les déchets sont dénichetés et mélangés en respectant les pourcentages de chaque fraction en se basant sur les résultats de caractérisation des fractions combustibles dans les DMA générés dans la zone d'étude. Les tests de lixiviation ont été effectués en triple, chaque 24 heures, un flacon est éliminé jusqu'à la fin du test (figure 83).

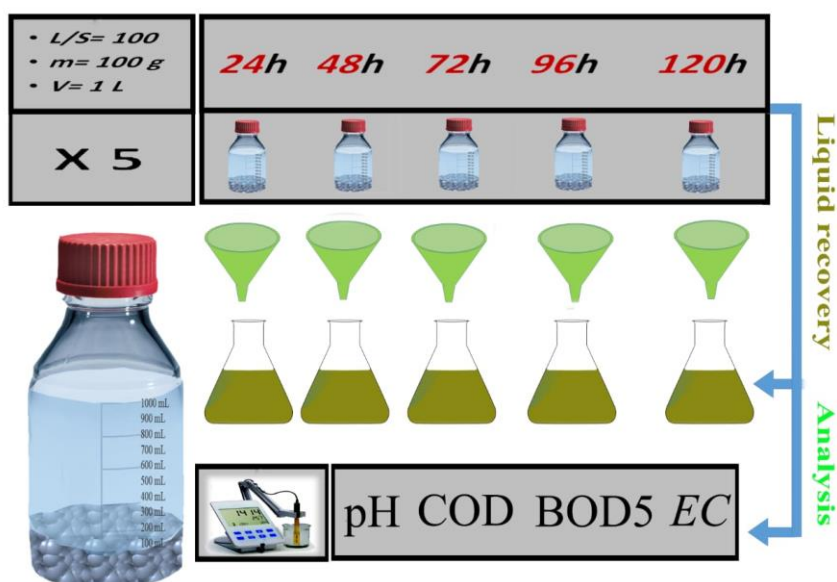


Figure 83: Schéma simplifié du protocole expérimental du TL sans renouvellement

I.1.3.1 Séparation des phases

La fraction liquide est séparée de la fraction solide par une filtration sous vide (0,45µm), toutes les solutions sont stockées dans des flacons en verre à 4°C et les analyses sont effectuées rapidement dans les 24 heures en triple, car pendant le stockage des échantillons la DCO pourrait montrer une diminution d'environ 9% en 15 jours (Lagier et al., 2001).

I.1.3.2 Analyse du liquide filtré

Après avoir isolé le lixiviat filtré, le pH, la conductivité électrique, la DCO et la DBO5 sont déterminés à chaque 24 heures.

Le pH des lixiviats permet d'identifier les différentes phases de dégradation des ordures (Christensen et al., 1994). En effet, ce paramètre gouverne le développement ou l'inhibition de certaines réactions chimiques ou biochimiques dans les procédés de traitement des déchets et ou des lixiviats.

La conductivité électrique (CE) permet d'avoir des informations de l'ordre global sur la quantité des espèces ioniques qui causent une forte salinité des lixiviats.

La demande chimique en oxygène (DCO) permet d'avoir une idée générale sur la pollution oxydable dans les lixiviats. C'est un paramètre très utile pour le choix d'un type de traitement.

La demande biologique en oxygène pendant 5 jours (DBO5) permet d'évaluer les polluants organiques biodégradables contenus dans le lixiviat. Suit au calcul de la DCO et la DBO5, le rapport DCO/DBO5 peut être utilisé comme indicateur d'aide à la prise de décision dans le choix de traitement convenable des effluents.

Les méthodes utilisées pour les analyses sont montrées dans le *tableau 53*.

Tableau 53: Méthodes utilisées pour les analyses

Paramètre	Unité	Norme
pH	pH	NF T90-008
CE	mS/cm	NFT90-031
DCO	gO ₂ /L	NM 03.7.54 – 2013
DBO5	gO ₂ /L	NM ISO 5815-2 (2012)

I.2 Réduction des émissions des GES

Les combustibles fossiles sont des sources très importantes des polluants atmosphériques dont les GES constituent une grande partie. Dans le but d'étudier l'avantage environnemental de l'utilisation des RDF dans la co-incinération en cimenteries, des calculs seront faits pour évaluer la réduction des GES émises. Dans ce propos, les données de la cimenterie de Béni Mellal et ceux des DMA de la zone d'étude sont utilisées pour le calcul de la réduction des émissions en GES.

I.2.1 Formules de calcul

Afin d'évaluer la réduction des GES, une série d'équations est utilisée comme il est présenté dans le *tableau 54*.

Tableau 54:Equations utilisées pour le calcul de la réduction en CO₂

Numéro	Equation	Avec :
1	$E_{réduction} = E_{no\ RDF} - E_{mix}$	E_{réduction} : La réduction des émissions en GES dans la cimenterie (tCO ₂ eq/ ans) ; E_{no RDF} : Emission en GES dans la présente cimenterie si le PC est utilisé à 100% (tCO ₂ eq/ ans) ; E_{mix} : Emission en GES dans la cimenterie en cas d'utilisation de 15% de RDF (tCO ₂ eq/ ans).
2	$E_{no\ RDF} = E_{PC, no\ RDF} + E_{décharge, no\ RDF}$	E_{pc, no RDF} : GES émises de PC si le RDF n'est pas utilisé (tCO ₂ eq/ ans)
3	$E_{mix} = E_{PC, mix} + E_{RDF, mix} + E_{décharge, mix}$	E_{PC, mix} : CO ₂ émis par l'incinération de PC dans la cimenterie (tCO ₂ eq/ ans) ; E_{RDF, mix} : CO ₂ émis par l'incinération de RDF dans la cimenterie (tCO ₂ eq/ ans) ; E_{décharge, mix} : GES émis de la décharge si le RDF est utilisé comme combustible alternatif (tCO ₂ eq/ ans).
4	$E_{pc, no\ RDF} = m_{PC, no\ RDF} \times E_{t\ PC}$	m_{PC, no RDF} : La quantité de PC utilisé dans la cimenterie sans substitution par RDF (tonne/ans) ; E_{t PC} : Le CO ₂ émis par l'incinération d'une tonne de pet coke (tCO ₂ eq/ t de PC).
5	$E_{décharge, no\ RDF} = m_{DMA} \times E_{décharge, t\ DMA}$	E_{décharge, no RDF} : Le méthane émis par les déchets si tous le flux est enfouie dans la décharge (tCO ₂ eq/ ans).
6	$E_{PC, mix} = m_{PC, mix} \times E_{t\ PC}$	m_{PC, mix} : La quantité de PC utilisé dans la cimenterie dans le cas de substitution par 15% de RDF (tonne/ans).
7	$E_{RDF, mix} = m_{RDF, mix} \times E_{t\ RDF}$	m_{RDF, mix} : La quantité de RDF utilisée dans la cimenterie (tonne/ans) ; E_{t RDF} : Le CO ₂ émis par l'incinération d'une tonne de RDF (tCO ₂ eq/ t de RDF).
8	$E_{décharge, mix} = m_{DMA-RDF} \times E_{décharge, t\ DMA}$	m_{DMA- RDF} : La masse des déchets non pas valorisée en RDF (tonne/ans) ; E_{décharge, t DMA} : CH ₄ émis par une tonne de DMA si ils sont enfouis dans la décharge (tCO ₂ eq/ t de DMA).
9	$m_{DMA- RDF} = m_{DMA} - m_{RDF, mix}$	m_{DMA} : Le flux total des déchets ménagers et assimilés utilisé pour produire le RDF (tonne/ans) ; m_{RDF} : La quantité valorisée des déchets en RDF.
10	$m_{PC, no\ RDF} = Q/PCI_{PC}$	Q : La chaleur nécessaire à la production du clinker dans la présente cimenterie (MJ/ans).
11	$E_{t\ PC} = E_{PC, MJ} \times PCI_{PC}$	E_{PC, MJ} : Le CO ₂ émis par l'incinération de PC pour produire 1 MJ de chaleur (g CO ₂ / MJ) ; PCI_{PC} : Le pouvoir calorifique inférieur du PC utilisé dans la cimenterie (MJ/kg).
12	$Q = m_{PC, mix} \times PCI_{PC} + m_{RDF, mix} \times PCI_{RDF}$	PCI_{RDF} : Le pouvoir calorifique inférieur du RDF de la zone d'étude (MJ/kg)

I.2.2 Données utilisées dans le calcul

Le PCI du pet coke utilisé dans la cimenterie est de 7 500 Kcal/kg (30,4 MJ/kg). Le PCI du RDF de la zone d'étude est de 4453 Kcal/kg (18,65 MJ/kg) déterminé au laboratoire selon la norme [EN 15400 \(2011\)](#). La masse consommée de RDF dans la cimenterie et l'estimation des DMA utilisés pour produire le RDF sont présentés dans le *tableau 55*. L'effet du méthane tant que GES est plus grave que le CO₂ 25 fois. De ce fait, 1 kg de CH₄ est calculé tant que 25 kg CO₂ éq.

Tableau 55:Données relatives aux déchets et PC sur 10 ans en tonne

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
m PC, no RDF*	97000	97970	98940	99910	100880	101850	102820	103790	104760	105730
m DMA **	191958	193890	195867	197889	199956	202069	204229	206436	208691	210994
m PC, mix	83000	83830	84660	85490	86320	87150	87980	88810	89640	90470
m DMA- RDF	166465	168125	169823	171560	173336	175152	177008	178905	180844	182825

* Calculé en se basant sur la production du clinker (1 million de tonne/ans) pendant la première année et l'énergie nécessaire pour produire un kilogramme de clinker (730 Kcal/kg).

** Estimé en multipliant la population fois le ratio de production des déchets (0,78kg/hab/jour) en milieu urbain et 0,29 kg/hab/jour en milieu rural) ([Ouigmane et al., 2018](#)).

Les diverses données utilisées dans le calcul sont montrées dans le *tableau 56*.

Tableau 56:Valeurs des paramètres utilisés dans le calcul

Paramètre	Symbole	Données
CO ₂ émis par la combustion de 1 MJ de PC	E _{PC, MJ}	98 g CO ₂ /MJ (EIA, 2019)
CO ₂ émis par l'incinération de RDF	E _{tRDF}	0,67 t CO ₂ /t DMA (Cong, 2017) 92 g CO ₂ /MJ (calculé)
PCI de pet coke utilisé	PCI _{PC}	30,4 MJ/kg de PC
PCI de RDF utilisé	PCI _{RDF}	18,65 MJ/kg de RDF
Energie nécessaire pour produire le clinker	Q t clinker	730 kcal/kg de clinker

Le méthane généré par l'enfouissement des déchets est calculé selon l'équation suivante ([Kumar et al., 2004](#) ; [Jensen et Pipatti, 2000](#)).

$$E_{\text{décharge, t DMA}} = (1t \times \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_F \times F \times 16/12 - R_{\text{CH}_4}) \times (1 - \text{OX})$$

Avec :

FCM : Facteur de correction de méthane. Selon IPCC, la valeur utilisée pour le cas des décharges des pays en développement est de 0,4 ;

COD : Carbone organique biodégradable. Selon IPCC, la valeur pris est 0,19 ;

COD_F : La fraction de Carbone organique biodégradable convertie en gaz. Selon IPCC il égale à 0,77.

F : Fraction de méthane généré par les déchets enfouis dans la décharge, il égale à 0,5 selon IPCC ;

16/12 : Conversion de C en CH₄ ;

R_{CH₄} : Le méthane valorisé (Gg/ans). La récupération du biogaz n'est pas fait dans la zone d'étude donc la valeur de ce paramètre est de 0.

OX : Facteur d'oxydation, la valeur pris par l'IPCC est de 0. (Pudasaini, 2014).

E_{décharge, t DMA} est calculé :

$$E_{\text{décharge, t DMA}} = (1t \times 0,4 \times 0,19 \times 0,77 \times 0,5 \times 16/12 - 0) \times (1-0) \times 25 \text{ t CO}_2\text{eq/tCH}_4$$

$$= 0,98 \text{ t CO}_2\text{eq/t}$$

II Résultats et discussion

II.1 Test de lixiviation

II.1.1 pH et CE

Les résultats de suivi du pH et de la conductivité électrique sont montrés dans les figures 84 et 85.

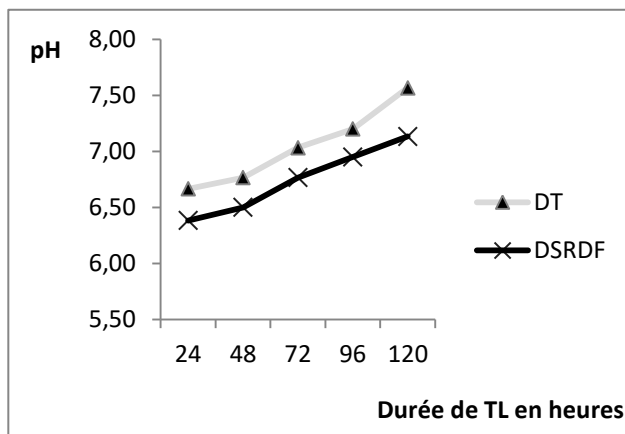


Figure 84: Résultats de suivi du pH

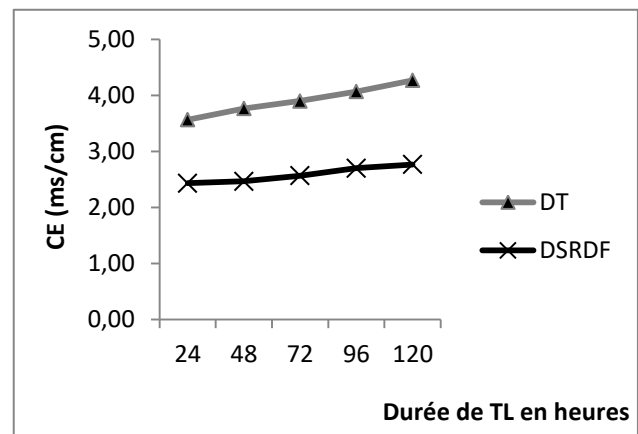


Figure 85: Résultats de suivi de la conductivité électrique

Le pH de l'éluât issu des déchets totaux (DT) a passé de 6,67 en 24 heures à 7,57 en 120 heures. Concernant le pH des déchets sans RDF (DSRDF), en première heures de TL, le pH est relativement acide (6,38) par rapport au pH du DB, ce dernier a évolué jusqu'à 7,13 après 120 heures. Le pH des lixiviats trouvés dans d'autres études est neutre ou alcalin (Yilmaz et al., 2010, Magda and Gaber, 2014). Les résultats de la présente étude montre que le pH tend vers l'alcalinité ce qui va défavoriser la solubilité des métaux lourds dans le lixiviat (Alyne et al., 2019). Ainsi, le pH est plus acide dans le cas

des DSRDF, ce qui pourrait favoriser certains traitements chimiques des lixiviats (Zhang et al., 2005 ; Kurniawan et al., 2006). Dans l'étude menée par Sorlini et al., (2017), ils ont trouvé que les résidus issus de l'incinération des déchets ménagers ont un pH acide dû à la présence de quelques éléments tel que l'aluminium.

La CE de l'éluat généré par la lixiviation des DT est plus élevée par rapport à la CE du lixiviat généré par la lixiviation des DSRDF. Après 24 heures de contact entre la phase liquide et les déchets, la CE des DT est de 3,5 ms/cm et 2,43 ms/cm pour les DSRDF. Après 120 heures, la valeur de la CE a évolué pour les deux déchets, elle a atteint 4,27 ms/cm pour le DT et 2,77 ms/cm pour les DSRDF. Dans l'étude de Chantou (2012), la CE trouvée après 24 heures de TL d'un déchet brut est de 3,8 ms/cm et 4,1ms/cm après 120 heures. Etant donné que la salinité constitue une source de pollution minérale et rend le traitement des lixiviats assez compliqué (Magda and Gaber, 2014), l'extraction des fractions combustibles des déchets pourrait avoir un impact positif sur le taux de salinité des lixiviats générés.

II.1.2 DCO et DBO5

Le suivi de la variation de la DCO et de la DBO5 est représenté dans les figures 86 et 87.

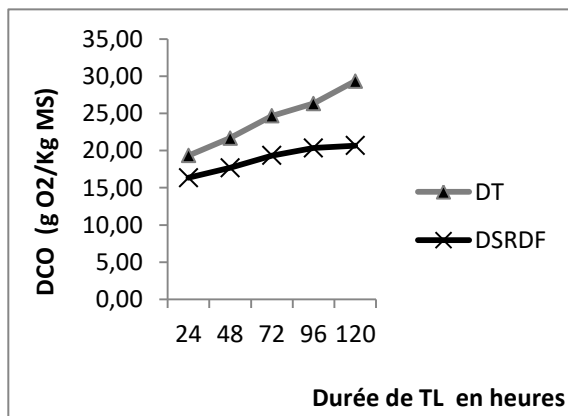


Figure 87: Résultats d'analyse de la DCO

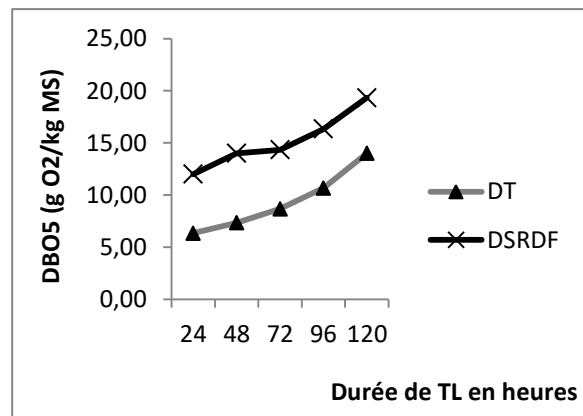


Figure 86: Résultats d'analyse de la DBO5

La DCO est plus élevée pour le cas des DT (19,33 g O₂/kg MS) après 24 heures de contact avec l'éluât, la DCO des lixiviats générés par les DSRDF est de 16,33 g O₂/kg MS. Les valeurs des deux déchets ont évolué chaque 24 heures. Après 120 heures, les analyses ont montré que la valeur a atteint 29,33 g O₂/kg MS pour les DT et 20,67 g O₂/kg MS pour les DSRDF. La valeur de la DCO trouvée dans l'étude de Parodi et al., (2011) après 24 heures de TL est 22g O₂/kg MS qui est plus élevée par rapport à la valeur trouvée dans la présente étude car la composition des déchets qu'ils ont utilisé est riches en fractions combustibles (15,8% des déchets organiques, 26,9% de papier et carton, 12,7% de papier et plastique, 4,9% de textiles,...). A l'inverse de la DCO, du pH et de la CE, la DBO5 des déchets sans RDF est plus élevée que celle des déchets totaux (DT). La valeur de la en 24 heures des DT et des DSRDF est 6,33 g O₂/kg MS et 12 g O₂/kg MS respectivement. La valeur de la DBO5 a

évolué au cours des TL pour atteindre 14 g O₂/kg MS après 120 heures pour les DT et 19,33 g O₂/kg MS pour les DSRDF. La *figure 88* montre les résultats de calcul du rapport DCO/DBO₅.

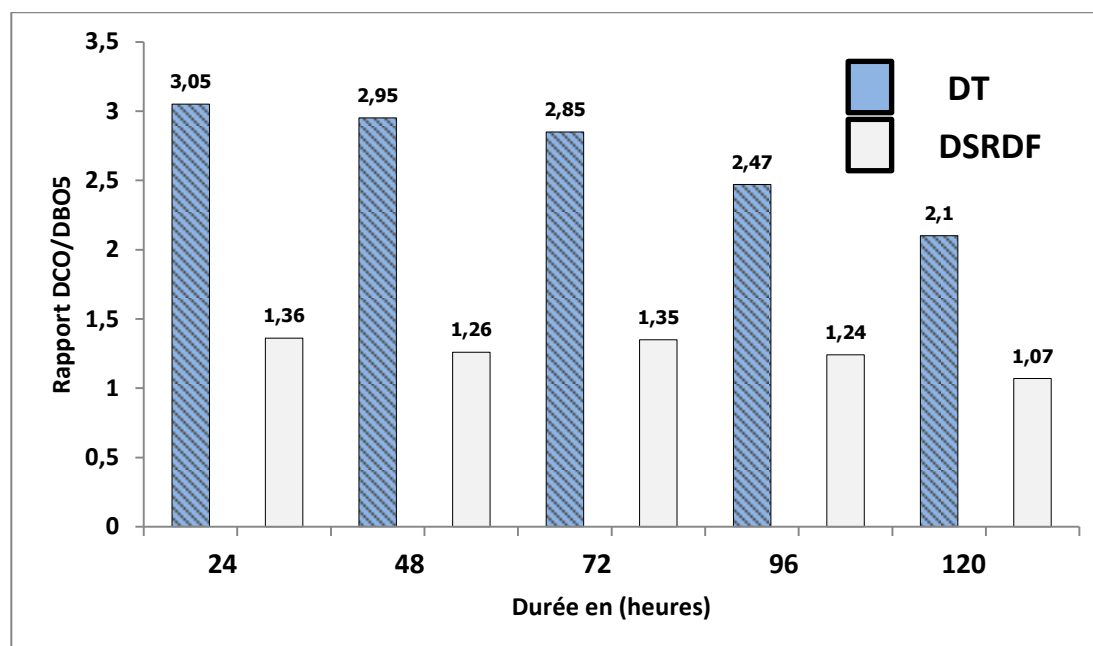


Figure 88: Rapport de DCO/DBO₅ dans les TL des deux types de déchets

Le rapport DCO/DBO₅ aide à la prise de décision dans le choix du traitement des effluents. Il est largement utilisé dans le traitement des eaux usées, ce rapport évalue la biodégradabilité d'une eau polluée, c'est à dire la faculté de la transformation de la matière organique en matière minérale admissible par le milieu naturel. Pour un effluent à dominante domestique, ce rapport est généralement compris entre 2 et 3. Pour les effluents d'industries agroalimentaires, il est inférieur, de l'ordre de 1.5 à 2, ce qui traduit une meilleure biodégradabilité. Enfin, lorsqu'il est supérieur à 3, cela traduit l'apport d'un effluent industriel plus ou moins difficilement biodégradable. Comme il est montré dans la *figure 88*, le rapport DCO/DBO dans le cas des DT est grand par rapport au cas des DSRDF, l'élimination de la partie RDF rend l'effluent plus biodégradable ce qui facilite son traitement en utilisant un procédé biologique qui est moins couteux que les procédés biologiques combinés aux procédés chimiques, physico-chimique et thermiques (Abbas et al., 2009 ; Alyne et al., 2019). Ainsi, le rapport DCO/DBO₅ diminue avec le temps pour les deux déchets. En effet, des études ont montré que le rapport des lixiviats matures est plus petit que celui des lixiviats jeunes (Kjeldn et al. 2002 ; Assou et al., 2016 ; Renou et al., 2008).

II.2 Réduction en CO₂

Les résultats de calcul sur dix ans sont représentés dans le *tableau 57*.

Tableau 57: Résultats de calcul de la réduction de CO₂ sur 10 ans

N° d'équation		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
1	E_{réduction}	28970	29260	29549	29839	30129	30419	30708	30998	31288	31577
2	E_{no RDF}	487643	492531	497464	502441	507461	512527	517640	522798	528003	533255
3	E_{mix}	458672	463271	467914	472601	477333	482109	486931	491800	496715	501678
4	E_{pc, no RDF}	299524	302519	305514	308509	311505	314500	317495	320490	323486	326481
5	E_{décharge, no RDF}	188119	190012	191950	193931	195957	198028	200144	202307	204517	206774
6	E_{PC, mix}	247274	249746	252219	254692	257165	259637	262110	264583	267055	269528
7	E_{RDF, mix}	23280	23513	23746	23978	24211	24444	24677	24910	25142	25375
8	E_{décharge, mix}	163136	164763	166427	168129	169869	171649	173468	175327	177227	179169
10	m_{PC, no RDF}	100538	101544	102549	103554	104560	105565	106571	107576	108581	109587
11	E_{tPC}	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
	m_{DMA}	191958	193890	195867	197889	199956	202069	204229	206436	208691	210994
	E_{décharge, t DMA}	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	m_{PC, mix}	83000	83830	84660	85490	86320	87150	87980	88810	89640	90470
	m_{RDF, mix}	24000	24240	24480	24720	24960	25200	25440	25680	25920	26160
	E_{tRDF}	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
9	m_{DMA- RDF}	166465	168125	169823	171560	173336	175152	177008	178905	180844	182825
12	Q	3056364	3086928	3117491	3148055	3178619	3209182	3239746	3270309	3300873	3331437
	PCI_{PC}	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4
	E_{PC, MJ}	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
	clinker (tonne/ans)	1000000	1010000	1020000	1030000	1040000	1050000	1060000	1070000	1080000	1090000

Le graphique de la *figure 89* montre la réduction de CO₂ dans le cas d'une substitution de coke de pétrole par 15% de RDF dans la cimenterie.

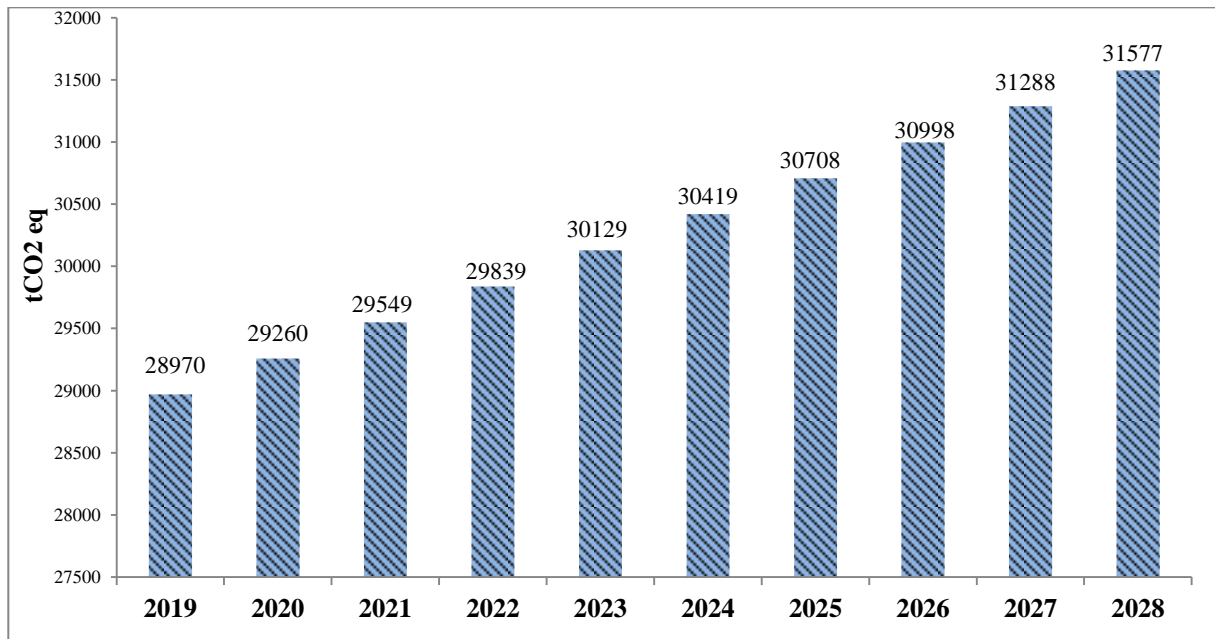


Figure 89: Evolution de la réduction du CO₂ en fonction des années

A partir des résultats (*figure 89*), on constate que la valeur de la réduction directe et indirecte des émissions des GES est importante. En première année, la réduction pourrait atteindre 28 970 tCO₂eq et 31577 tCO₂eq en 10^{ème} année en fonction du tonnage de RDF consommé. [Kara \(2012\)](#) a montré dans son étude que l'utilisation de RDF dans la cimenterie pourrait réduire directement 5545 tCO₂eq des émissions du four d'une cimenterie avec un taux de substitution de 15% et une consommation de RDF de l'ordre de 18921,6 tonne/ans. L'étude menée par [Hemidat et al., \(2019\)](#) a montré que la substitution de coke de pétrole par 15% de RDF pourrait réduire directement 15890 tCO₂eq. Une étude faite par [Ecofys \(2016\)](#) a montré que l'utilisation de RDF comme substituant de pet coke pour produire le clinker en Grèce permet de réduire 168000 tCO₂eq si le taux de substitution est de 7%, 480000 tCO₂eq si le taux de substitution est de 20% et 720000 tCO₂eq si le taux de substitution est de 30%. Malgré les faibles émissions générées par le Maroc qui ne dépasse pas 0,2%, le Royaume s'est engagé dans tous les protocoles internationaux et dernièrement en 2016 le pays a ratifié l'accord de Paris qui vise à réduire les émissions des GES, un mois après il a organisé la COP22 à Marrakech. Le pays a décidé de se doter d'une véritable feuille de route en matière de développement durable. Il s'agit de la Stratégie nationale de développement durable (SNDD) ([SNDD, 2017](#)). Elle avait été adoptée par le Conseil des ministres, tenu le 25 juin 2017 sous la présidence de SM le Roi Mohammed VI. La SNDD, a pour but de concrétiser une vision d'une économie verte et inclusive au Maroc d'ici 2030, le projet de valorisation de RDF se croise avec les sept principes de la stratégie et répond fortement aux objectifs de développement durable.

CONCLUSION GENERALE

La gestion des déchets ménagers constitue un grand souci pour les municipalités vu les impacts sur la santé et sur l'environnement liés à une mauvaise gestion de ce secteur. La valorisation énergétique est une solution durable et efficace pour limiter l'enfouissement des déchets dans les décharges et de profiter de l'énergie contenue dans les ordures. Cette étude est consacrée à la filière de production de RDF à partir des fractions sèches incinérables contenues dans les déchets ménagers dans une province au Maroc. L'étude a été menée sur tous les aspects (techniques, sociaux, économiques et environnementaux) liés à une gestion intégrée des déchets. L'état des lieux du secteur de l'assainissement solide dans la zone d'étude a montré que la gestion des ordures ménagères a passé d'un mode de mise en décharges et dépotoirs sauvages à un mode de mise en centre d'enfouissement et de valorisation. Concernant, la collecte des déchets, elle est variable d'un centre communal à un autre en fonction des ressources financière de chaque commune.

L'étude liée à l'aspect social a montré les sources de l'échec d'une gestion des déchets, d'où l'absence d'un liant entre les producteurs des déchets (citoyens) et les responsables sur leur élimination (communes territoriales). Le projet pilote de tri à la source qui est précédé par une campagne de formation et de sensibilisation des citoyens avec l'intervention de la société civile a montré que les familles arrivent à s'engager dans l'étape la plus sensible dans une chaîne de gestion des déchets : le tri à la source en deux fractions (sèche et humide) avec des pourcentages d'efficacité de tri qui atteints 96%.

L'étude de la caractérisation des fractions combustibles dans les déchets ménagers a montré l'impact du type de saison et de type de la zone (urbaine ou rurale) sur leur distribution. Le pourcentage massique des fractions combustibles est assez élevé dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales. De même pour la variation saisonnière, l'étude a montré qu'il y a un impact de ce paramètre sur certaines fractions (les déchets hygiéniques sont plus abondants en été et le tétra-pack est plus abondant en hiver). Les fractions combustibles qui pourraient constituer une matière première de production de RDF constituent en moyen 29% du flux total des déchets ménagers dans la zone d'étude. Les analyses effectuées lors de cette étude pour un RDF issu des déchets secs de la zone d'étude ont montré que ce produit pourrait être compétitif aux combustibles fossiles avec un PCI de 18 MJ/kg. Ainsi, la comparaison entre six RDF de différents constituants a montré l'influence de la composition sur certains paramètres de qualité comme le PCI, les chlorures, les métaux lourds, la composition élémentaire et le taux des cendres.

L'étude de rentabilité économique d'un projet de production et de substitution des combustibles fossiles dans le secteur cimentier a montré que l'investissement dans un tel projet pourrait être rentable avec des valeurs de VAN supérieures à 0 et notamment lorsque l'investisseur est la cimenterie ou les communes territoriales. En plus des avantages économiques, la présente recherche a montré des

avantages environnementaux liés à la filière de production de RDF. Les tests de lixiviations ont montré l'impact positif de l'enfouissement des déchets sans RDF, avec une diminution dans la valeur de la DCO et un rapport DCO/DBO faible ce qui pourrait faciliter le traitement des lixiviats en utilisant des procédés biologiques. Ainsi, l'estimation de la réduction des émissions de CO₂; pour un scénario de substitution de coke de pétrole par 15% de RDF pour produire 1 million de tonne de clinker, a donné des résultats encourageant avec une possibilité de réduction de 29 260 tCO₂ eq pendant une année.

La valorisation des fractions combustibles dans un PED pourrait avoir plusieurs avantages :

➤ **Environnementaux :**

- ✓ Réduction de la pollution des ressources hydriques par les lixiviats ;
- ✓ Réduction du volume des déchets ;
- ✓ Réduction des émissions de CO₂;
- ✓ Réduction des surfaces d'enfouissement ;
- ✓ Facilité du tri à la source (deux fractions).

➤ **Economiques :**

- ✓ Réduction des frais d'importation des combustibles fossiles ;
- ✓ Création d'un marché compétitif de RDF ;
- ✓ Réduction des frais d'enfouissement pour les communes.

➤ **Sociaux**

- ✓ Création des offres d'emploi ;
- ✓ Amélioration de niveau de vie (limitation des sources de pollution).

Références bibliographiques

Articles	Thèses	Rapports, normes et chapitres	Sites officiels	Conférences
215	12	86	24	7

Aadraoui M., Rais J., Elbaghdadi M., Ouigmane A., Mechadi M. (2019). Characterization of sludge waste products from wastewater treatment plant of Khenifra city in Morocco. *Environmental Research & Technology*; 2 (2): 73-79.

Aatamila M., Verkasalo P., Korhonen M. J., Viluksela M. K., Pasanen K., Tittanen P., Vevalainen A., (2010). Odor Annoyance Near waste Treatment Centers: A population-based study in Finland. *Journal of Air and Waste Management Association*. 60: 412-418.

Abbas A.A., Jingsong, G., Ping, L.Z., Ya, P.Y., Al-Rekabi, W.S., 2009. Review on landfill leachate treatment. *Am. J. Appl. Sci.* 6, 672–684.

Abbott A., Nandeiban S., O'Shea L., (2003). Explaining the variation in household recycling rates across the UK. *Ecological economics*. 90: 10-18

Abu-Qudais M., Abu-Qdais H.A., (2000). Energy content of municipal solid waste in Jordan and its potential utilization. *Energy Conversion & Management* 41: 983-991

Achankeng E., (2003). Globalization, Urbanization and Municipal Solid Waste Management in Africa, *African Studies Association of Australasia and the Pacific Conference Proceedings - African on a Global Stage*; 22 pages

ACT, (2011). ACT Waste Management Strategy, Towards a sustainable Canberra. Australian Capital Territory (ACT) Government, Environment and Sustainable Development.

ADEME, (2002). Validation des méthodes de mesures des caractéristiques des combustibles bois déchiquetés. *Critt Bois – Fibois*, 62p.

ADEME, (1998). Le compostage des déchets organiques des ménages en Allemagne - Etat de l'art et retours d'expérience. Paris, France. 188.

ADEME, (2013). Combustibles solides de récupération (CSR) : Quel intérêt pour les collectivités ? ADEME Editions, Angers 2013 Référence ADEME 7804 ISBN 978-2-35838-399-8

Adhikari B.K., Barrington S., Martinez J., King S., (2008). Characterization of foodwaste and bulking agents for composting. *Waste Manage.* 28 : 795–804.

Ahmed, S.A., Ali, M., 2004. Partnerships for solid waste management in developing countries: linking theories to realities. *Habitat Int.* 28, 467–479.

Amira Cipurkovic, Ilvana Trumic, Zorica Hodžic, Vahida Selimbašic and Abdel Djozic, (2014). Distribution of heavy metals in Portland cement production process. *Advances in Applied Science Research*, 5(6): 252-259

Antonio C. Caputo, Pacifico M. Pelagagge (2002). RDF production plants: II Economics and profitability. *Applied Thermal Engineering* 22: 439–448.

Aina Martin Pépin (2006). Expertises des centres d'enfouissement techniques de déchets urbains dans les PED: contributions à l'élaboration d'un guide méthodologique et à sa validation expérimentale sur sites. Thèse de doctorat. Université de Limoges N°46 – 2006

Aloueimine Sidi Ould (2006). Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : contribution à la gestion des déchets et outils d'aide à la décision. Thèse de doctorat, université de Limoges. N° 012/2006.

Aloueimine S.O., Matejka G., Zurbrugg C. et Sidi Mohamed M.E.O. (2006) Caractérisation des ordures ménagères à Nouakchott – Partie 1 : Méthode d'échantillonnage. *Déchets : Revue francophone d'écologie industrielle -trimestriel – N°44*.

Alyne Moraes Costa, Raquel Greice de Souza Marotta Alfaia, Juacyara Carbonelli Campos, (2019). Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. *Journal of Environmental Management* 232: 110–116

Al-Khatib Issam, Monoub Maria, Abdul Salam, Abu Zahra, Shaheen Hafez , Despo Kassinos (2010). Solid waste characterization, quantification and management practices in developing countries. A case study: Nablus district – Palestine. *Journal of Environmental Management*. 91: 1131-1138.

- Aloueimine S.O.,** Matejka G., Zurbrugg C. & Sidi Mohamed M.E.O., (2005). Caractérisation des ordures ménagères à Nouakchott – Partie 2 : Résultats en saison sèche et en saison humide. Déchets - Sciences et Techniques – soumise. n° 44, décembre 2006.
- Alter, H.,**(1983). Materials Recovery from Municipal Waste. Unit Operations in Practice. Marcel Dekker, New York, NY, p. 181.
- Alter, H.,**(1987). The History of Refuse-Derived Fuels. Resources and Conservation, 15: 251-275
- Alyne Moraes Costa,** Raquel Greice de Souza Marotta Alfaia, Juacyara Carbonelli Campos, (2019). Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. Journal of Environmental Management 232:110–116
- Amira Cipurkovic,** Ilvana Trumic, Zorica Hodžic, Vahida Selimbašic, Abdel Djozic, (2014). Distribution of heavy metals in Portland cement production process. Advances in Applied Science Research, 2014, 5(6): 252-259
- Antonio C,** Caputo, Pacifico M, Pelagagge. (2002). RDF production plants: I Design and costs. Applied Thermal Engineering. 22 : 423–437
- APC**(Association professionnelle des cimentiers), (2019). Secteur du ciment au Maroc. [Consulté le 10 Janvier 2019]. Disponible à l'adresse :www.apc.ma
- Aplak HS, Sogut MZ,** (2013). Game theory approach in decisional process of energy management for industrial sector. J Energy Convers Manage. 74:70–80.
- Arena U,** Ardolino F, Di Gregorio F (2016) Technological, environmental and social aspects of a recycling process of post-consumer absorbent hygiene products. J Clean. Prod 127: 289–301
- Arena Umberto,** (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. Waste Management 32 (4) : 625-639
- Arena U.,**(2015). From waste-to-energy to waste-to-resources: the new role of thermal treatments of solid waste in the Recycling Society. Waste Management 37: 1-2
- Arena U., Di Gregorio F.,** (2014). Gasification of a solid recovered Fuel in a pilote scale fluidized bed reactor. Fuel 117: 528-536
- Assou, M.,** El Fels, L., El Asli, A., Fadiki, H., Souabi, S., Hafidi, M., (2016). Landfill leachate treatment by a coagulation-flocculation process: effect of the introduction order of the reagents. Desalin. Water Treat. 57, 21817–21826.
- ASTM** American Society for Testing and Materials, (1985). Annual ASTM standards. Vol 11.04, American Society for testing and Materials (ASTM), Philadelphia, PA, US, 1985.
- Aye L. et Widjaya E.R.,**(2005). Environmental and economic analysis of waste disposal options for traditional markets in Indonesia. Waste Manag. 26(10):1180-91.
- Ayed A.A.F.,** (2016). Assessment of environmental burdens of the current disposal method of municipal solid waste in Kuwait vs waste-to-energy using life cycle assessment (LCA). Int J Environ Sci Develop. 7(5):389–93.
- Ayleru O O,** Okonta F N, Ntuli F(2018) Municipal solid waste generation and characterization in the City of Johannesburg: A pathway for the implementation of zero waste. Waste Manag 79:87–97
- Babaei Ali Akbar,** Alavi Nadali, Goudarzi Gholamreza, Teymouri Pari, Ahmadi Kambiz, Mohammad Rafiee (2015). Household recycling knowledge, attitudes and practices towards solid waste management. Resources, Conservation and Recycling 102 : 94–100
- Bahareh Reza,** Atousa Soltani, Rajeev Ruparathna, Rehan Sadiq, Kasun Hewage (2013). Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. Resources, Conservation and Recycling 81 (2013) 105– 114.
- Balampanis D.,** Simms N., Villa R., (2008). Transfer coefficients and organochloride load of a ‘chlorine-class 2’ solid recovered fuel in fluidized bed combustion, In: Proceedings Venice 2008, Second International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy, CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre.
- Baltes L.,** Draghici C., Manea C., Ceausescu D., Tiorean M., (2009). Trends in selective collection of the household waste. Environ. Eng. Manage. J. 8 (4) : 985-991

Banque mondiale(2015).Royaume du Maroc. Le Coût de La dégradation de L'environnement au Maroc. Rapport No. 105633-MA

Banque mondiale, (2016a). Urban Population. [Consulté le 25 Octobre 2018]. Disponible à l'adresse :<https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL>

Banque mondiale, (2016b). Urban Population Growth (annual %). [Consulté le 25 Octobre 2018]. Disponible à l'adresse: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.GROW>

Banque mondiale, (2012). What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Urban Dev. Ser. Knowl. Pap. No.15, World Bank 116. <https://doi.org/10.1111/febs.13058>

Banque mondiale, (2018) What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Available from <http://hdl.handle.net/10986/30317>

Beckmann, M. et Thomé-Kozmiensky, H.C.K.J., (2006).Substitute fuels – potential applications | [Ersatzbrennstoffe - Einsatzmöglichkeiten], Aufbereitungs Technik/Mineral Processing 47 (5) 10-18

Beckmann M., Karl H.C., et Thomé-Kozmiensky H.C.K.J., (2006). Waste-derived fuels – opportunities and problems | [Ersatzbrennstoffe - Chancen und probleme], Aufbereitungs Technik/Mineral Processing 47 (4): 28-36

Ben Ammar Samira, (2006). Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix de traitements adaptés dans les pays en développement résultats de la caractérisation dans le grand Tunis mise au point d'une méthode adaptée. Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Lorraine et école nationale supérieure de géologie de Nancy.

Benani, (1987). "Bilan et perspectives d'une action à un niveau national, le cas du Maroc. Dans Gestion des déchets ménagers dans les pays en développement. 9-11 septembre 1987, Angers, France. 147-161.

Benhalal, E, Zahedi, G, Shamsaei, E & Bahodori, A., (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. Journal of Cleaner Production, 51:142-161.

Berger I.E. (1997). The demographics of recycling and the structure of environmental behavior. Environment and behavior. 29 (4) :515-531

Bernache-Perez G, Sanchez-Colon S, Garmendia AM, Dávila-Villarreal A, Sánchez-Salazar MEA., (2001). Solid Waste Characterization Study in the Guadalajara Metropolitan Zone, Mexico. Waste Management & Research 15: 573-583.

Bidart Christian, Magnus Fröhling, Frank Schultmann (2012). Municipal solid waste and production of substitute natural gas and electricity as energy alternatives. Applied Thermal Engineering 51: 1107-1115

Bin Zhang, Kee-hung Lai, Bo Wang, Zhaohua Wang (2019). From intention to action: How do personal attitudes, facilities accessibility, and government stimulus matter for household waste sorting? Journal of Environmental Management 233 (2019) 447–458

Boardi K. O. and Kuitunen M., (2005). Environmental and Health Impacts of Household Solid Waste Handling and Disposal Practices in the Third World Cities: The Case of Accra Metropolitan Area, Ghana. Journal of Environmental Health, (68): 34-36.

Bojer M., Jensen P.A., Frandsen F., Dam-Johansen K., Madsen O.H., Lundtorp K., Alkali (2008). Chloride release during refuse incineration on a grate: Full-scale experimental findings, Fuel Processing Technology 89 (5): 528-536

Brunke JC, Blesl M., (2014). Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs. J Cleaner Prod; 82:94–111

Brunner P. H. et Walter R . Ernst (1986). Alternative Methods for the Analysis of Municipal Solid Waste, Waste Management & research. 4:147- 160.

Buenrostro O. et Bocco G.,(2003). Solid waste management in municipalities' in Mexico: Goal and perspectives. Resources, Conservation and Recycling 39: 251 - 263.

Caputo, A. C., et Pelagage, P. M., (2002). RDF production plants: I Design and costs. Applied Thermal Engineering, 22(4), 423-437.

Casado R.R, Rivera J.A.,Garcia E.B, Cuadrado R.E., Llorente M.F., Sevillano R.B., Delgado A.P., (2016). Classification and characterization of SRF produced from different flows of processed MSW in the Navarra region and its co-combustion performance with olive tree pruning residues. Waste management 47 :206-216.

- Castagna A.**, Casagrande M., Zeni A., Girelli E., Rada E.C., Ragazzi M., Apostol T., (2013). 3R'S from citizen's point of view and their proposal from a case-study. *UPB Sci. Bull., Ser. D* 75.(4): 253–264.
- Castillo-Giménez Juana** , Antonio Montañés , Andrés J. Picazo-Tadeo, (2019). Performance and convergence in municipal waste treatment in the European Union. *Waste Management* (85) 222–231
- Cement Sustainability Initiative (CSI)**. CO2 accounting reporting standard for the cement industry, The cement CO2 protocol; 2005.
- Chaer I.**, El Cadi A., Lanjri Fakh A., Khaddor M., Brigui J., (2016). Determination of the contamination degree of landfill uncontrolled from Tangier by some heavy metals. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (2) :541-546
- Chakraborty Monojit**, Chhemendra Sharma, Jitendra Pandey, Prabhat K. Gupta., (2013). Assessment of energy generation potentials of MSW in Delhi under different technological options *Energ. Conv. and Manag.* 75: 249-255
- Chang, Y.**, Chen, W.C., Chang, N., (1998). Comparative evaluation of RDF and MSW incineration. *J. Hazard. Mat.*, 58, 33-45.
- Chantou T.** (2012). Identification des indicateurs de stabilisation des déchets solides urbains et validation sur un site de PTMB français, pour une application en Tunisie. Thèse de doctorat. Université de Limoges école doctorale sciences et techniques
- Charnay Florence**, (2005). Compostage des déchets urbains dans les Pays en Développement : élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost. Thèse de doctorat à l'université de Limoge. N° 562005.
- Chiemchaisri C.**, Juanga J.P. et Visvanathan C., (2007). Municipal solid waste management in Thailand and disposal emission inventory. *Environ. Monitor. Assess.*, 135: 13-20
- Chen M.**, Xu P., Zeng G.M., Yang C.P., Huang D.L., Zhang J.C., (2015). Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes and future research needs. *Bio technol. Adv.* 33:745-755.
- Chen D.**, Yin L, Wang H, He P., (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. *Waste Manag.* 34(12):2466-2486
- Cheng H.**, Hu Y., (2010). Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: current and future practices in China. *Bioresour Technol.* 101 (11):3816-3824.
- Chiemchaisri, C.**, Juanga, J.P., Visvanathan, C., (2007). Municipal solid waste management in Thailand and disposal emission inventory. *Environ. Monit. Assess.* 135 (1–3):13–20.
- Chong T.L.**, Matsufuji Y., Hassan M.N., (2005). Implementation of semi-aerobic landfill system (Fukuoka method) in developing countries: A Malaysia cost analysis. *Waste Management* 25: 702-711.
- Christensen T.H.**, Kjeldsen P. Albrechtsen, H-J., Heron, G., Nielsen, P. H., Bjerg, P. L., & Holm, P. E.. (1994). Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 24(2), 119-202.
- Chung, S.-S.**, Lo, C.W.H., 2004. Waste management in Guangdong cities: the waste management literacy and waste reduction preferences of domestic waste generators. *Environ Manage.* 33, 692–711.
- Ciceri Giovanni and Martignon Giovanna**, (2015). Solid Recovered Fuels production and use in Europe. IEA Bioenergy Conference 2015, Berlin 27-28 October 2015
- CIMAT** (2017). Emission d'un emprunt obligataire non cote amortissable sur 7 ans. Note d'information. Page 276
- CIMAT ciment de l'Atlas**, (2018). Engagement environmental. [Consulté le 25 Janvier 2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.cimat.ma/engagement-environnemental>
- Cimpan C.**, Maul A., Jansen M., Pretz T., Wenzel H., (2015). Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: a review of technological state-of-the-art, cases, practice. *J Environ Manage.* 156:181-199
- Coda B.**, Aho M., Berger R., Hein K.R.G., (2001) Behavior of chlorine and enrichment of risky elements in bubbling fluidized bed combustion of biomass and waste assisted by additives. *Energy and Fuels* 15 (3), 680-691
- Cointreau Sandra**, (2006). Occupational and Environmental Health Issues of Solid Waste Management Special Emphasis on Middle- and Lower-Income Countries. *Occupational and environmental health issues of solid waste management.* P 4.

- Cong Wang** (2017). Utilization of refuse derived fuel in cement industry - a case study in china. Lappeenranta University of Technology School of Energy Systems Master's thesis 56 pages,
- Conke Leonardo S.**, (2018). Barriers to waste recycling development: Evidence from Brazil. *Resources, Conservation & Recycling* 134: 129–135
- Commission européenne.** (2008). Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives
- Commission européenne.** (2019). Rapport sur le paquet «économie circulaire»: questions et réponses. Disponible à l'adresse https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/MEMO_19_1481
- Cour des comptes**,(2015). Royaume du Maroc; La gestion déléguée des services publics locaux. Synthèse pages 199.
- Cuperus, J.G. et van Dijk, E.A.**, (2002). Determination of the biomass fraction in solid recovered fuels, R003-3907341JGC-D01-D, 6 June 2002, TAUW, Deventer, The Netherlands
- DGCL** Direction Générale des Collectivités Locales (2015). Loi organique relative aux communes. Dahir n°1-15-85 du 20 ramadan 1436 (7juillet 2015) portant promulgation de la loi organique n°113-14 relative aux communes.
- DGCL.** (2016) Loi organique relative aux communes au Maroc. Bulletin Officiel N° 6440 du 09 Joumada I 1437 (18 Février 2016)
- Di Leonardo M.C**, Franzese M., Costa G., Gavasci R., Lombardi F., (2016). The application of SRF Vs. RDF classification and specifications to the material flows of two mechanical-biological treatment plant of Rome: Comparison and implications. *Waste management* 47:195-205
- Di Maria F**, et Pavesi G. (2005). RDF to energy plant for a central Italian region SUW management system: Energetic and economical analysis. *Applied Thermal Engineering.* 26 :1291–1300
- Directive 1999/31/CE** du Conseil du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets. <http://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Directive 2008/98/CE** du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). <http://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Directive, 2000/76/EC** of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste.
- Dunnu D.**, Panopoulos K.D., Karellas S., Maier J., Toulou S., Koufodimos G., Boukis I., Kakara E., (2012). The solid recovered fuel Stabilat: Characteristics and fluidised bed gasification tests. *Fuel* 93: 273-283
- EAWTTC** European Association of Waste Thermal Treatment Companies for Specialized Waste, Methodology for the determination of technical co-incineration criteria (2012). : <http://www.eurits.org/pages/coincineration.asp>
- EC** European Commission, (2018). Circular Economy. Closing the loop. http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm
- Ecofys** (2016). Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU. Assessment of drivers and barriers for increased fossil fuel substitution in three EU member states: Greece, Poland and Germany. Page 40.
- EIA.** (2019) How much carbon dioxide is produced when different fuels are burned? [Online] Available from: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=73&t=11>.
- El-fadel M.**, Bou-zeid E., Chahine W. and Alayli B., (2002). Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Management* 22: 269-282.
- EL Maguiri A**, Fawaz N, Souabi S, Idrissi L, Taleb A, Vincent R (2014) The Physical Characterization of Household Waste in the City of Mohammedia- Morocco-and the Evaluation of the Financial Impact of its Current Management. *Inter J Eng Inno Techn* 3 (12) :100-106
- Elwan Ahmed**, Yanuar Z. Arief, Nor Asiah Muhamad, Nouruddeen Bashir, ZuraimyAdzis, (2014). Solid waste as a renewable feedstock: a review. *Solid waste as a renewable feedstock: a review. Eng. Appl. Sci.* 9 (8) 1297-1310

- EN 15359 Solid recovered fuels**, (2011). Specifications and classes.
- EN 15403 Solid recovered fuels**,(2011). Determination of ash content.
- EN 15408 Solid recovered fuels**(2011). Methods for the determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content.
- EN 15400 Solid recovered fuels**(2011), Determination of calorific value.
- EN 15411 Solid recovered fuels**, (2011). Methods for the determination of the content of trace elements (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V and Zn).
- EN 15443 Solid recovered fuels**, (2011). Methods for the preparation of the laboratory sample.
- ERFO**,(2012). European Recovered Fuel Organisation, Facts and Figures about SRF, Bruxelles, 2012.
- ERFO**, (2011) SRF in Europe Workshop Combustion of Solid Recovered Fuel Geert Cuperus 20 October 2011 Dublin
- ERFO**,(2013) Standardization as a help to facilitate SRF acceptance and use Experience of the European Cement Industry June 13th, 2013 Jan Theulen
- Eriksson O.**,Carlsson Reich M., Frostell B., Björklund A., Assefa G, Sundqvist J.O., Granath J., Baky A., Thyselius L., (2005). Municipal solid waste management from a systems perspective. *J. Clean. Prod.* 13: 241-252
- Espinoza, P.**, Arce, E., Daza, D., Faure, M., Terraza, H., (2010). Regional Evaluation of Municipal SolidWaste Management in Latin America and the Caribbean: Report; PAHO: Washington, DC, USA; AIDIS: São Paulo, Brasil; IDB: Washington, DC, USA
- European Commission**,(2013). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU
- European Council**, (2000). Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, L 332/92, 28-12-2000
- European Recovered Fuel Organization**, BREF waste treatment. Solid recovered fuels, European Recovered Fuel Organisation (ERFO), IAR Aachen, 2003.
- Eurostat**, (2018) a. Population change - Demographic Balance and Crude Rates at National Level [Consulté le 25 Septembre 2018]. Disponible à l'adresse http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=demo_gind&lang=en
- Eurostat**, (2018) b. Generation of Waste by Waste Category, Hazardousness and NACE Rev. 2 activity [Consulté le 25 Septembre 2018]. Disponible à l'adresse <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>
- Finish Standards Association**, (2000). Solid recovered fuel. Quality control system, 24-01-2000, Finish Standards Association (FSF),
- FNADE et le SN2E**, (2015). Elaboration d'un modèle économique global de production et valorisation de CSR – Synthèse – 6 pages.
- Follea V.**,Brunet F., Benrabia N., Bourzal M.P. et Faucompre P., (2001). Revue comparative des modes de gestion des déchets urbains adoptés dans différents pays de la ZSP. Agence française du développement. octobre 2001. 24.
- Federec et Compte-R**, (2015). Combustibles solides de récupération (CSR) : Caractérisation et évaluation de leurs performances en combustion. Rapport – 95 pages
- Francesco Di Maria** , Gregorio Pavesi (2006). RDF to energy plant for a central Italian region SUW management system: Energetic and economical analysis. *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 1291–1300
- François V.**, Feuillade G., Skhiri N., Lagier T., Matejk G., (2006). Indicating the parameters of the state of degradation of municipal solid waste. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 1008-1015.
- François, V.**,(2004). Détermination d'indicateurs d'accélération et de stabilisation de déchet ménagers enfouis. Etude de l'impact de la recirculation de lixiviats sur colonnes de déchets, Université de Limoges. Thèse de doctorat N°8-2004
- Frankenhaeuser Martin**, (2011). European standardization of Solid Recovered Fuels. Workshop: Processing routes for Solid Recovered Fuels 20 October, 2011. Dublin

- Garg, A.,** Smith, R., Hill, D., Simms, N., Pollard, S., (2007). Wastes as co-fuels: The policy framework for solid recovered fuel (SRF) in Europe, with UK implications, *Environmental Science and Technology* 41 (14), 4868.
- Garcés Diego,** Díaz Eva, Sastre Herminio, Ordóñez Salvador, Gon José Manuel, González-La Fuente, (2015). Evaluation of the potential of different high calorific waste fractions for the preparation of solid recovered fuels. *Waste Management* 47: 164-173.
- Garcia, A. J.,** Esteban M.B., Márquez M.C., Ramos P., (2005). Biodegradable municipal solid waste: Characterization and potential use as animal feedstuffs. *Waste Management* 25: 780– 787.
- Guadalupe G,** Montserrat M, Lourdes B, Francesc C (2009) Seasonal characterization of municipal solid waste (MSW) in the city of Chihuahua, Mexico. *Waste Manag* 29: 2018–2024
- Guermoud N,** Addou A (2014) Etude et caractérisation des déchets ménagers de la ville de Mostaganem (Ouest-Algérie). *Déchets Sciences et Techniques* 66 : 45-50
- Gendebien A.** Leavens A., Blackmore K., Godley A., Lewin K., Whiting K., Davis R. (2003). Refuse derived fuel, current practice and perspectives. Final Report. European commission.
- German Institute for Quality Assurance and Certification**(2001). Solid recovered fuels. Quality assurance, RAL-GZ 724, June 2001, German Institute for Quality Assurance And Certification (RAL)
- Gershman H. W.,** (2012). Fuel for the fire. A renewable energy push could spark demand for refuse derived fuel. Publié à *Waste* 360.
- Gotmare M.,** Dhole R., Pitulle AP., (2011). Biomethanation of dairy waste water through UASB at mesophilic temperature range. *Int J Adv Eng Technol* 8(1): 1-9
- Govanta,** (2015). Benefits of Waste-to-Energy 2015 Northwest Regional SWANA Symposium. Page 29.
- Grau J.,** Terraza H., Velosa R., Milena D., Rihm, A., Sturzenegger G., (2015). Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean; Inter-American Development Bank: Washington, DC, USA, 2015.
- Green Cape,** (2015). Waste Economy – 2015 Market Intelligence Report. .
<http://greencape.co.za/assets/Uploads/GreenCape-Market-Intelligence-Report-2015-Waste.pdf>
- Greiner, T.,** (2007). Swings and roundabouts. Demand for RDF swells in Germany, *Waste Management World* May-June 33, 2007.
- Grodzinska-Jurczak M.,** Tomal P., Tarabula-Fiertak M., Nieszporek K., Read A.D., (2006). Effects of an educational campaign on public environmental attitudes and behaviour in Poland. *Resour. Conser. Recycl.* 46 (2), 182–197.
- GTZ.,** (2002). Guide de présélection de site de décharge contrôlée des déchets ménagers cas de Larache et Chefchaouen. Pages 84.
- Giusti L.,**(2009). A Review of Waste Management Practices and Their Impact on Human Health. *Waste Management* 29 (8) 2227-2239.
- Granzin et Olsen,** (1991). Characterization participants in activities protecting the environment: a focus on donating, recycling and conservation behaviors. *Journal of public policy and marketing.* 10 (2) : 1-27
- Guermoud N.,** Oudjnia F., Abdelmalek F., Taleb F., Addou A., (2009). Municipal solid waste in Mostaganem city (Western Algeria). *Waste Management* 29 :896–902.
- Guerrero Lilliana Abarca,** Ger Maas, William Hogland (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management* 33 :220–232
- Hafid N.,**(2002). Etude du compost de l'UPAO, des refus de compostage et des anciens dépotoire d'ordures ménagères de la ville d'Agadir. Laboratoire de Chimie minérale et Appliquée et Génie des procédés. Agadir, Maroc, Université Ibn Zohr, Agadir.
- Hafid N.,** El Hadek M., Lguirati A. et Bouamrane A., (2002). Evaluation d'une filière simplifiée de compostage des ordures ménagères ; Déchets, *Revue Francophone d'Ecologie Industrielle* -N° 25- 1er trimestre 2002.
- Haibin Chen,** Yan Yang, Wei Jiang, Mengjie Song, Ying Wang & Tiantian Xiang (2016) Source separation of municipal solid waste: The effects of different separation methods and citizens' inclination—case study of Changsha, China. , *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67:2, 182-195, DOI:10.1080/10962247.2016.1222317

- Hamidou, S.**(2005). Gestion des déchets ménagers dans les Pays En Développement : Cas du Burkina Faso. Dégradation thermique de leur fraction combustible. *Energétique, Thermique, Combustion*, Université de Ouagadougou. Thèse de Doctorat: pages 153
- Harker JH. et Backhurst JR.,** (1981) *Fuel and energy*. London: Academic Press, ISBN 13: 9780123252524
- Hassen A.,** Belguith K., Jedidi N., Cherif A., Cherif M., Boudabous A. (2001). Microbial characterization during composting of municipal solid waste. *Bioresource Technology* 80: 217-225.
- Havukainen J.,** Zhan M. X., Dong J., Likanen M., Deviatkin, I., Li X. D., Horttanainen M., (2016). Environmental impact assessment of municipal solid waste management incorporating mechanical treatment of waste and incineration in Hangzhou, China. *Journal of Cleaner Production*. 141: 453-461.
- Hemidat S.,** Saidan M., Al-Zu'bi S., Irshidat M., Nassour A., Nelles M.. (2019). Potential Utilization of RDF as an Alternative Fuel to be Used in Cement Industry in Jordan. *Sustainability*. 11 : 5819; doi:10.3390/su11205819
- Henri Prévot,**(2000). la récupération de l'énergie issue du traitement des déchets, conseil général des mines Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. Pages 120.
- Hernandez-Atonal,** Changkook Ryu, Vida N. Sharifi, Jim Swithenbank, (2007). Combustion of refuse-derived fuel in a fluidised bed. *Chim. Eng. Sci.* 62. 627-635
- Hernández T.,**Garcia E., García C., (2015). A strategy for marginal semiariddegraded soil restoration: a sole addition of compost at a high rate. A five-yearfield experiment. *Soil Biol. Biochem.* 89: 61-71.
- Higman CAA, Tam S.,** (2014). Advances in coal gasification, hydrogenation and gas treating for the production of chemicals and fuels. *Chem Rev* 114: 1673-1708.
- Hogg Richard,** (2007). Energy from Waste by Pyrolysis and Gasification the Experience and Performance of an Operational Plant. Proceeding of the international conference on sustainable solid waste management. Chennai, India; 385-92, 5-7 September 2007.
- Hoornweg D., Bhada-Tata P.,**(2012). What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. The World Bank, Washington DC. Pages 98
- Hornik J.,**Cherian J., Madansky M., Narayana C., (1995). Determinants of recycling behavior: a synthesis of research results. *J. Socio-Econ.* 24 (1): 105-127.
- Houot, S. and J. Rose,** (2002). « Déchets (agricoles, urbains, industriels) », Prospective SIC 2002 Synthèse de l'atelier n° 8 ; Division « Surfaces et Interfaces Continentales » ; INSU."
- Hussein I.,** Abdel-Shafy, Mona S.M., Mansour (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, a 2nd valorization. *Egyptian Journal of Petroleum.* 27 : 1275-1290
- IEA,** (2019) Global thermal energy intensity and fuel consumption of clinker production, 2014-2018 and in the Sustainable Development Scenario, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-thermal-energy-intensity-and-fuel-consumption-of-clinker-production-2014-2018-and-in-the-sustainable-development-scenario>
- Ismail O.,** (2015) Evaluation of municipal solid waste management practices for an industrialized city. *Pol J Environ Stud.* 24(2):637-44.
- Jensen et Pipatti** (2000). CH4 emissions from solid waste disposal. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Pp 419-439
- Jiang H., Eastman J. R.,**(2000). Application of fuzzy measures in multi-criteriaevaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173-184
- Jianrong Chen,** Shanmei Xiao , Xiaohua Wu , Keming Fang , Wenhan Liu (2005). Determination of lead in water samples by graphite furnace atomic absorption spectrometry after cloud point extraction. *Talanta* 67: 992-996
- Jun Dong,**Yong C., Yuanjun T., Mingjiang N., Ange N., Elsa W.H., Qunxing H.,(2015). Partitioning of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Pyrolysis, Gasification, and Incineration. *Energy and Fuels*, American Chemical Society, 29 (11), pp.7516-7525.
- Jordao C.P.,**Nascentes C.C., Cecon P.R., Fontes R.L.F., Pereira J.L., (2006). Heavymetal availability in soil amended with composted urban solid wastes. *Environ. Monit. Assess.* 112, 309-326.

- Juniper**, (2005). Mechanical-biological treatment: a guide for decision makers, processes, policies and markets, CD-ROM, v1, March 2005, Juniper Consultancy Services, UK
- KACARE**, (2012) presentation. Renewable Energy-Waste to Energy. A pillar of the sustainable energy kingdom. In: First international environment conference, Yanbu Al Sinaiyah, KSA: King Fahd Civic Centre 20–21 November; 2012
- Kandasamy, S.P.**, Akolkar, A.B., Manoharan, A., Paranj, S., 2013. Municipal solid waste management at Chennai in southern India - an occupational health perspective. *Int. J. Health Promot. Educ.* 51 (1), 50–61. <https://doi.org/10.1080/14635240.2012.750068>.
- Kara Mustafa**, (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Conservation and Recycling* 68 :21-28
- Karimi H**, Yu Q L, Brouwers H J H (2020) Valorization of waste baby diapers in concrete. *Resour Conserv Recycl* 153 :104548
- Kathirvale S.**, MuhdYunus M.N., Sopian K., Samsuddin A.H. (2003). Energy potential from municipalsolid waste in Malaysia. *Renewable Energy*, 29: 559-567
- Kathiravale S.**, Yunus M.N.M., Sopian K., Samsuddin A.H., Rahman R.A. (2003) Modèle ing the heating value of municipal solid waste. *Fuel* 82: 1119-1125
- Kawai K. et Tasaki T.**,(2016) .Revisiting estimates of municipal solid waste generation per capita and their reliability. *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 18 (1) 1-13.
- Keramitsoglou, K.M.**, Tsagarakis, K.P., (2013). Public participation in designing a recycling scheme towards maximum public acceptance. *Resour. Conserv. Recycl.* 70, 55–67.
- Khan Z.**,Ali M., Abu-Ghurrah Z.H., (1991). New approaches for estimating energy content in MSW. *ASCE Journal of Environmental Engineering* 117 (3), 8-13.
- Kjeldsen, P.**, Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T.H.,(2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 3, 297–336.
- Kirby Carl S. et Rimstidt J. D.** (1993). Mineralogy and surface properties of municipal solid waste ash. *Environ. Sci. Technol.*, 27 (4) 652-660
- Kodwo M.**, Kwasi O., Zsófia K., Bernard F. Moses Y.M. (2015) Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste management in Ghana. *Waste Management* 46 :15-27
- Kok G.**, Siu H.L., Gjal-Jorn Y.P., Robert A.C.R., (2011) Changing energy-related behavior: an intervention mapping approach. *J Energy Policy* 39:5280–6.
- Koledzi K. Edem**,(2011). Valorisation des déchets solides urbains dans les quartiers de Lomé (Togo): approche méthodologique pour une production durable de compost. Thèse de doctorat, université de Limoge. N°04-2011.
- Kost, T.**, Rotter, S., Bilitewski, B. (2001). Chlorine and heavy metal content in house-hold waste fractions and its influence on quality control in RDF production processes, In: Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, 1-5 October 2001, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre
- Krook, J.**, Martensson, A., Eklund, M., 2007. Evaluating waste management strategies—a case of metal-contaminated waste wood. *Resour. Conserv. Recycl.* 52, 103–118.
- Kumar, S.** .Gaikwad S.A., Shekdar A.V., Kshirsagar P.S., Singh R.N. (2004). Estimation method for national methane emission from solid waste landfills. *Atmospheric Environment*, (38): 3481–3487.
- Lafarge holcime maroc**, (2016). Augmentation de capital de lafargeholcim Maroc S.A. au titre de la fusion-absorption de lafarge cementos s.a. Note d'information. Page 432.
- Lagier T.**, Feuillade G., Matejka G., (2001). Influence of organic macromolecules of leachate on the solubility of heavy metals trapped in landfills, in: Proceedings Sardinia, Cagliari, Italy, 2001.
- Lal Banwari et Reddy MRVP.**, (2005) Wealth from waste: trends and technologies. 2nded . India: The energy and resources Institute (TERI) press.
- Lee, M.**, Choi, H., Koo, Y., (2017). Inconvenience cost of waste disposal behavior in South Korea. *Ecol. Econ.* 140, 58–65.
- Leitol C.**, (2014). Resource and cost efficient selective collection. *Pollack Periodica* 9 (Suppl. 1), 43–54

- Lei Zhao,** Apostolos Giannis, Wan-Yee Lam, Sheng-Xuan Lin, Ke Yin, (2016). Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. *Sustainable Environment research*. 26: 51-54.
- Li G. and Hu Y.,** (2010). Comparisons of municipal solid waste incineration residues management in China and Europe. In: Proceedings of the international conference on mechanic automation and control engineering (MACE).
- Lisney, R.,** Riley, K., and Banks, C.J., (2004). Waste as a resource: a discussion paper on the changes needed for the development of a resource recovery based waste strategy, *CIWM Scientific & Technical Review* 5 (2), 11.
- Liu C. and Wu X.W.,**(2010). Factors influencing municipal solid waste generation in China: a multiple statistical analysis study. *Waste Manage. Res.* 29, 371–378
- Liu G.Q.,**Itaya Y., Yamazaki R., Mori S., Yamaguchi M., Kondoh M., (2001). Fundamental study of the behavior of chlorine during the combustion of single RDF, *Waste Management* 21 (5), 427
- Liu JI,**Paode R, Holsen T., (1996). Modèle ing the energy content of municipal solid waste using multiple regression analysis. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 46:650-656
- Lombardi L,** Carnevale E, Corti A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Manag.* 37:26-44
- Lozano, R.,** R. Lukman, F.J. Lozano, D. Huisingsh, and W. Lambrechts. (2013). Declarations for sustainability in higher education: becoming better
- Lu J-W,** Sukun Z.,Jing H.,MingL.,(2017). Status and perspectives of municipal solid waste incineration in China: a comparison with developed regions. *Waste Manag.* (69): 170-186
- Magda M. A. et** Gaber I. A. (2014). Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt. *Journal of Advanced Research* (2014) xxx, xxx–xxx <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2014.02.003>
- Malczewski J.,**(2006). GIS based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*. 20 (7), 703- 726.
- Manfredi, S.,**Tonneini, D., Christensen, T. H., Scharff, H., (2009). Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*. 27 (8), 825-836.
- Mansour Driss,** (2015). Combinaison des Systèmes d'Information Géographiques et des méthodes d'analyses multicritères (fuzzy AHP) dans la présélection des sites de stockage des déchets : cas des villes de Taoujdate et d'Agourai et de la province d'El Hajeb (Maroc). Thèse de doctorat à université Moulay Smail Meknès.
- Marie M. and Henrik L.,** (2010). Comparing waste to energy technologies by applying energy system analysis. *Waste manag* 30(7); 1251-1263
- MA. 300 – NTPT 2.0.** (2014). Détermination de l'azote total Kjeldahl et du phosphore total : digestion acide – méthode colorimétrique automatisée. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2014-12-15 (révision 2)
- Ma, J., Hipel, K.W.,**(2016). Exploring social dimensions of municipal solid waste management around the globe – A systematic literature review. *Waste Manag.* 56, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.041>
- Mbuligwe S.E. et Kassenga G.R.,** (2004). Feasibility and strategies for anaerobic digestion of solid waste for energy production in Dar es Salaam City, Tanzani. *Resources, Conservation and Recycling* 42: 183-203.
- Melhyas KPLE,**(2015). Etude des voies de valorisation des déchets ménagers au Benin cas de la ville d'Abomey-Calavi. Thèse de doctorat
- Metso,**(2018). M&J PreShred Stationary:[Consulté le 10 Novembre 2018]. Disponible à l'adresse<http://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/wre-preshred-stationary-uk-web.pdf>
- Ministère de l'environnement.** (2015). 3ème rapport sur l'état de l'environnement du Maroc
- Mohee R.,** (2002). Assessing the recovery potential of solid waste in Mauritius; *Resources, Conservation and Recycling*. (36) : 33-43.
- Mohr, S. H.,**Wang, J., Ellem, G., Ward, J., Giurco, D.,(2015). Projection of world fossil fuels by country, *Fuel*, 141, 120–135, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.030>

- Mokrzycki** Eugeniusz et Uliasz- Bochenczyk Alicja, (2003). Alternative fuels for the cement industry," *Applied Energy*, Elsevier, vol. 74: 95-100,
- Montejo Cristina**, Costa Carlos, Ramos Pedro, Márquez Mariadel Carmen, (2011). Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fraction as fuels for incineration plants. *Applied Thermal Engineering* 31: 2135-2140
- Morau Dominique**,(2006). Modélisation des dispositifs de revalorisation énergétique des déchets solides et liquides (séchage, méthanisation, incinération) - mise en œuvre d'un outil d'aide à la conception multi – systèmes et multi – modèles. Thèse de doctorat, Université de la Réunion.
- Munna Lal Patel et Janardan** Singh Chauhan, (2014). Municipal solid waste. Alternative source of energy to the cement kilns in the state of Madhya Pradesh. India Article in *Int. J Envir. Sust. Dev.*13(2), 142-152
- Myer Kutz**, (2007). Environmentally conscious mechanical design, John Wiley and Sons, ISBN 0-471-72636-2 page 261
- Nabegu A. B.**,(2010). An Analysis of Municipal Solid Waste in Kano Metropolis. *Journal of Human Ecology*. 31 (2) 111-119.
- Nabeshima Y.**, (1996). Technical evaluation of refuse derived fuel (RDF). *Waste Manag* 7; 294-304
- Naimi Y**, Saghir M, Cherqaoui A, Chatre B (2016) Energetic recovery of biomass in the region of Rabat, Morocco, *Int J of Hydro Ener* 42(2) : 1396-1402
- Narawute Srisaeng**, Nakorn Tippayawong,, Korrakot Y. Tippayawong (2017). Energetic and economic feasibility of RDF to energy plant for a local Thai municipality
- Nasrullah Muhammad**, VainikkaPasi, HannulaJanne, HurmeMarkku, (2015). Elemental balance of SRF production process: Solid recovered fuel produced from commercial and industrial waste. *Fuel*. 145 :1-11
- Nattapon Leeabai** , Shinya Suzuki , Qiuhui Jiang , Dilinazi Dilixiati , Fumitake Takahashi (2019). The effects of setting conditions of trash bins on waste collection performance and waste separation behaviors; distance from walking path, separated setting, and arrangements. *Waste Management* 94 (2019) 58–67
- Ngoc, U.N. et Schitzer, H.**,2009. Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries *Waste Manage*, 29, 1982-1995.
- Ngnikam E.**, (2000). Evaluation environnementale et économique de systèmes de gestion des déchets solides municipaux : analyse du cas de Yaoundé au Cameroun. LAEPSI. Lyon, INSA LYON: 314.
- Nguendo YongsH. B.**, Thora M. H., Lutumba Ntetu A., Sietchiping R., Bryant C., (2008). Environmental Sanitation and Health Risks in Tropical Urban Settings: Case study of Household Refuse and Diarrhea in Yaoundé-Cameroon. *International Journal of Human And Social Sciences*, (3): 220-228.
- NizamAS**, Murphy JD., (2011). Optimizing the operation of a two-phase anaerobic digestion system degesting grass siage. *Environ Sci Techno*; 45 (17): 7561-7569.
- Noor Z.Z.**, Yusuf R.O., Abba A.H., Hassan M.A.A., Din M.F.M., (2013). An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario. *Renew Sustainable Energy Reviews*. 20:378–84.
- Nwanta J. A. and Ezenduka E.**,(2010). Analysis of Nsukka Metropolitan Abattoir Solid Waste in South Eastern Nigeria: Public Health Implications. *Archives of Environmental and Occupational Health*. 65 (1) 21- 26
- Nzihou JF**, Rogaume T, Segda BG, Koulidiati J, Bouda M., (2008). Contribution à la mise en place du déchet modèle de la fraction combustible des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou. *Rev. CAMES-Série A*, 06: 78-84.
- Oblad, E.**, (2018). The Story of Ljubljana, Case Study #5. *Zero Waste Europe*.
- OECD/ECLAC/CAF**(2016), Latin American Economic Outlook 2017: Youth, Skills and Entrepreneurship, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/leo-2017-en>
- O.N.E.M.**,(2001).Environment state in Morocco. Wastes and Urban Areas. National Department of Environment, Morocco.
- Ojeda-Benite S.**, Armijo de Vega C., Ramirez-Barreto M.E., (2003). Characterization and quantification of household solid waste in Mexican city, *Resources, Conservation and Recycling* 39: 211 - 222.
- Oğuz, D.**, I. Çakci, and S. Kavas. 2010. Environmental awareness of university students in Ankara, Turkey. *Afr. J. Agric. Res.* 5(19):2629–36.

- Opoczky L. et Gavel V.**, (2004). Effect of certain trace elements on the grindability of cement clinkers in the connection with the use of wastes, *International Journal of Mineral Processing* 74 (Supplement 1), S129
- Oskamp S.**, Harrington M.J., Edwards T.C. Sherwood D.L., Okuda S.M., Swanson D.C. (1991). Factor influencing household recycling behavior. *Environment and behavior*, 23 (4): 494-519.
- Othman, S.N.**, Noor, Z.Z., Abba, A.H., Yusuf, R.O., Hassan, M.A.A., (2013). Review on life cycle assessment of integrated solid waste management in some Asian countries. *Int. J. Life Cycle Assess.* 41, 251-262.
- Ouda O.K.M.**, Cekirge H.M., Raza S.A., (2013). An assessment of the potential contribution from waste-to-energy facilities to electricity demand in Saudi Arabia. *Energy Convers Manag.* 75: 402-408
- Ouda O.K.M.**, Raza S.A., Al Waked R., Al Asad J.F., Nizami A.S., (2015). Waste to energy potential in the western province of Saudi Arabia. *J King Saud Univ-Eng Sci.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2015.02.002>
- Ouigmane, A.**, Boudouch, O., Hasib, A. et al. (2021). Characterization of dry fractions contained in municipal solid waste in developing countries: a case study of a region in Morocco. *J Mater Cycles Waste Manag.* <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01183-x>
- Ouigmane A**, Boudouch O, Hasib A, Berkani M (2018) Management of Municipal Solid Waste in Morocco: The Size Effect in the Distribution of Combustible Components and Evaluation of the Fuel Fractions. *Handbook of Environmental Materials Management* https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_82-1
- Ouigmane A**, Boudouch O, Hasib A, Berkani M, Aadraoui M, Dhairi E (2017) The size effect in the distribution of combustible components in the municipal solid waste produced in the summertime. Case of the city of Beni Mellal Morocco. *J Mater Environ Sci* 8, 2729-2737
- Oumarou M.B.**, Dauda M, Abdulrahim AT, Abubakar AB., (2012). Characterization and generation of municipal solid waste in north central Nigeria. *Int J Mod Eng Res.* 2(5):3669–72.
- Oztekin, C.**, Teksöz, G., Pamuk, S., Sahin, E., Kilic, D.S., 2017. Gender perspective on the factors predicting recycling behavior: Implications from the theory of planned behavior. *Waste Manage.* 62, 290–302.
- Pappu, A.**, Saxena, M., Asolekar, S.R., (2011). Waste to wealth-cross sector waste recycling opportunity and challenges. *Can. J. Environ. Construct. Eng.* 2 (3), 14-23.
- Parodi A.**, Feuillade-Cathalifaud G., Pallier V., Mansour A.A., (2011). Optimization of municipal solid waste leaching test procedure: Assessment of the part of hydrosoluble organic compounds. *Journal of Hazardous Materials* 186: 991–998
- Paul H.**, Brunner et Walter R. Ernst, (1986). *Alternative Methods for the Analysis of Municipal Solid Waste*, Waste Manag. & Resea. 4: 147-160.
- Pece V.**, Gorsevski Katerina R., Donevska Cvetko D., Mitrovski Joseph P., (2012). Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information systems for landfill site selection: A case study using ordered weighted average. *Waste Management.* 32 (2) 287-296
- Peireira-Neto J.T.**, (2001). Controlled composting developing countries. *Biocycle* 42 (2): 2
- Peters M.S., Timmerhaus K.D** (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, McGraw Hill.
- Pickin, J. et Randell, P.**, (2017). *Australian National Waste Report 2016*. Department of the Environment and Energy & Blue Environment Pty Ltd.
- Pinto F.**, Rui N. A., Carlos C., Miguel M., Pedro A., Daniel D., Nikos P., Ioannis Boukis, (2014). Gasification improvement of a poor quality solid recovered fuel (SRF). Effect of using natural minerals and biomass wastes blends. *Fuel* 117: 1034-1044
- Pirotta F.J.C.**, Ferreira E.C., Bernardo C.A., (2013). Energy recovery and impact on land use of Maltes municipal solid waste incineration. *Energy* 49: 1-11
- Poole, C.J.M.**, Basu, S., 2017. Systematic Review: occupational illness in the waste and recycling sector. *Occup. Med.* 67 (8), 626–636. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqx153>
- Porteous A.**, (2005). Why energy from waste incineration is an essential component of environmentally responsible waste management. *Waste Manag.* 25, 451–459
- Psomopoulos C.S.**, Bourka A., Themelis N.J., (2009). Waste-to-energy: a review of the status and benefits in USA. *Waste Manag.* 29, 1718-1724

- Pudasaini, S. R.**, (2014). Decentralized management of organic household wastes in the Kathmandu Valley using small-scale composting reactors. LUT.
- Punin, W.,**Maneewan, S., Punlek, C. J., (2014). The feasibility of converting solid waste into refuse-derived fuel 5 via mechanical biological treatment process. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 16 (4), 753-762.
- Puertas F.** et Blanco-Varela M.T., (2004). Empleo de combustibles alternativos en la fabricación de cemento. Efecto en las características y propiedades de los clínkeres y cementos. *Materiales de Construction* 54(274):51-64
DOI:10.3989/mc.2004.v54.i274.232
- Raquel Greice de Souza Marotta Alfaia,** Alyne Moraes Costa and Juacyara Carbonelli Campos. (2017) Municipal solid waste in Brazil: A review. *Waste Management & Research*. Volume: 35 issue: 12, page(s): 1195-1209
- Rada EC,** Andreottola G., (2012). RDF/SRF: which perspective for its future in the EU. *Waste Manag.* 32(6):1059-60.
- Rada E.C.,**Ragazzi M., Fedrizzi P., (2013). Web-GIS oriented systems viability for municipal solid waste selective collection optimization in developed and transient economies. *Waste Manage.* 33 (4), 785–792.
- Rada E.C.et Ragazzi M.,** (2014). A Selective collection as a pretreatment for indirect solid recovered fuel generation *Waste Manag.* 34(2):291-7
- Ragazzi M.**et Rada E.C., (2012). RDF/SRF evolution and MSW bio-drying. *WIT Trans. Ecol. Environ.* 163, 199–208
- Rajaeifar, M.A.,**Ghanavati, H., Dashti, B.B., Heijungs, R., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., (2017). Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: a comparative review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79, 414-439.
- Ramakrishna GV.,** (2004).Electricity Generation from Municipal Solid Waste – CDM perspective
- RECORD,**(2018). Utilisation des CSR et des RDF en Europe. Synthèse bibliographique et situations administratives rencontrées sur le terrain, 2018, 393 p, n°16-0250/1A
- Reinhart D.R.** et Mc Cauley-Bell P., (1996). Methodology for Conducting Composition Study for Discarded Solid Waste; Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, 82 pages
- Renou, S.,** Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P., 2008. Landfill leachate treatment: review and opportunity. *J. Hazard. Mater.* 150, 468–493.
- Reza B,** Soltani A, Ruparathna R, Sadiq R, Hewage K. (2013) Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling.* 81 :105– 114
- Roberts, N.,**(2008). CEMEX UK Climafuel. Case study, In: First UK conference on solid recovered fuels, 6 November 2008, London, Stragne, K. (Ed.), Resource Recovery Forum - ERFO
- Rotter, V.S.,**Kost, T., Winkler, J., et Bilitewski, B., (2004). Material flow analysis of RDF production processes, *Waste Management* 24 (10), 1005
- R4R,**(2014). Good practice tallinn: waste awareness educational campaigns for children and adults. *Regions for Recycling (R4R)*.
- Saeed M.O.,** Hassan M.N., Mujeebu M.A., (2009). Assessment of municipal solid waste generation and recyclable materials potential in Kuala Lumpur, Malaysia. *Waste Manage.* 29 (7), 2209–2213
- Sandra van Niekerk** et Vera Wegmann (2018). Les services municipaux de gestion des déchets solides en Afrique et en pays Arabe. *Internationale des Services Publics*. Mars 2018. Page 78.
- Sanjib Kumar** Karmee and Carol Sze Ki Lin Sanjib Kumar Karmee and Carol Sze Ki Lin (2014). Lipids from food waste as feedstock for biodiesel production: Case Hong Kong. *Lipid Technology*. Vol. 26, No. 9. DOI 10.1002/lite.201400044
- Sarc, R.** and Lorber, K. E.,(2013). Production, Quality and Quality Assurance of Refuse Derived Fuel (RDF). *Waste Management*. 33 (9), 1825–1834
- Scarlat N.,**Motola V., Dallemand J.F., Monforti-Ferrario F., Linus M., (2015). Evaluation of energy potential of municipal solid waste from African urban areas. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;50:1269 - 86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.067>.

- Schandl H.** (2017) Global Material Flows and Resource Productivity. Assessment Report for the UNEP International Resource Panel. Pre-publication final draft.
- Schulz-Ellermann, H.-J.**, (2003). Production of RDF in Europe today and development of standard, In: FEAD-Congress Entsorga 2003, 24 September 2003, Cologne, Germany, European Federation of Wastes and Environmental Services (FEAD)
- SEDD**, secrétariat d'état chargée de développement durable, (2018). [Consulté le 22 Décembre 2018]. Disponible à l'adresse <http://environnement.gov.ma/fr/dechets>
- Şehnaz Şener**, Erhan Şener, Bilgehan Nas, Remzi Karagüzel, (2010). Combining AHP with GIS for landfill site selection: A case study in the Lake Beyşehir catchment area (Konya, Turkey). *Waste Management*. 30 (11) 2037-2046
- SEMEMDD**, Secrétariat d'état auprès de ministre de l'énergie, des mines et du développement durable, chargé du développement durable. (2019). Stratégie nationale de réduction et de valorisation des déchets. Résumé. 13 pages.
- Sever Agdag**, Atımtay A. Sanin F.D., (2016). Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste Manag* 47: 217-224
- Sharholy, M.**, Ahmad, K., Vaishya, R.C., Gupta, R.D., 2007. Municipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India. *Journal of Waste Management* 27, 490–496.
- Sharholy, M.**, Ahmad, K., Mahmood, G., Trivedi, R.C., 2008. Municipal solid waste management in Indian cities. A review. *Journal of Waste Management* 28, 459–467.
- Shiferaw, Y.**, Abebe, T., Mihret, A., 2012. Sharps injuries and exposure to blood and bloodstained body fluids involving medical waste handlers. *Waste Manag. Res.* 30 (12), 1299–1305. <https://doi.org/10.1177/0734242X12459550>
- Shekdar A.V.**, (2009). Sustainable solid waste management: an integrated approach for Asian countries. *Waste Manag.* 29(4):1438-48. doi:10.1016/j.wasman.2008.08.025
- Shelley Cohen**, (1999). Small Landfills, Big Benefits. *Digital journal Waste* 360. Disponible à : <https://www.waste360.com/fuel/nestes-renewable-fuels-help-slash-ghg-emissions-2018>
- Sherif Arif and Fadi Doumani**, (2014). Lebanon, Cost Assessment of Solid Waste Degradation in Beirut and Mount Lebanon. GiZ SWEEP-Net. Tunis.
- Simbeck D.R. and Johnson H.E.**, (2001). World gasification survey: industry trends and development. I.: Paper presented at gasification technologies conference, San Francisco, 8 October 2001.
- SINTEF**, (2006). Formation and release of POPs in the cement industry, 2nd ed, 23 January 2006, World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), Geneva, Switzerland, 2006.
- Snytkova, M., Salmik, V.**, (2013). Russia Drowns in 60 Million Tons of Garbage a Year. *Pravda.ru*. disponible à http://www.pravdareport.com/russia/economics/26-06-2013/124947-russia_garbage-0/
- SNDD**: STRATÉGIE Nationale DE DÉVELOPPEMENT DURABLE. Octobre (2017) <https://www.environnement.gov.ma/fr/strategies-et-programmes/sndd?showall=1&limitstart>
- SOGREAH**, (2001). Solid waste management study for Bangkok. Bangkok, Kingdom of Thailand, Bangkok Metropolitan Administration. May 2001
- Sorell G.**, (1997). The role of chlorine in high temperature corrosion in waste-to-energy plants, *Materials at High Temperatures* 14 (3), 207-215
- Sorlini Sabrina**, Cristina Collivignarelli Maria and Alessandro Abbà (2017). Leaching behaviour of municipal solid waste incineration bottom ash: From granular material to monolithic concrete. *Waste Management & Research* 1–13
- Srisaeng N**, Tippayawong N, Korrakot Y, Tippayawong. Energetic and economic feasibility of RDF to energy plant for a local Thai municipality. *Energy Procedia*. 2017; 110 : 115 – 120
- Stantec**, (2011). WASTE TO ENERGY A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices FINAL REPORT. Project No. 1231-10166
- Stern P.C.**, Dietz T., Guagnano G.A. (1995). The new ecological paradigm in social-psychological context. *Environment and planning*. Environmental and resource economics. 13: 473-491
- Stronga**, (2018). Solution pour le séchage des RDF. Disponible depuis: <http://www.stronga.co.uk/news/featured/stronga-drying-solid-recovered-fuel-srf-and-refuse-derived-fuel-rdf-from-waste/>

- Subic A, Shabani B, Hedayati M, Crossin E.,** (2013). Performance analysis of the capability assessment tool for sustainable manufacturing. *J Sustainability* ;5:3543–61.
- Sujauddin, M.,** Huda, M.S., Rafiqul Hoque, A.T.M., 2008. Household solid waste characteristics and management in Chittagong, Bangladesh. *Journal of Waste Management* 28, 1688–1695.
- Suman M.,**KhaiwaL R., Dahiya R.P., Chandra A., (2006). Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environmental Monitoring and Assessment* 118: 435-456
- SWEEP-NET (2014).** Rapport sur la gestion des déchets solides au MAROC The regional solid waste exchange of information and expertise network in Mashreq and Maghreb countries April 2014
- Tai J.,**Wei qian Z., Yue C., Di F., (2011). Municipal solid waste source-separated collection in China: a comparative analysis. *Waste Manag.* 31 (8), 1673-1682.
- Tan S. T.,**Ho W. S., Hashim H., Lee C. T., Taib M. R., Ho C. S., (2015). Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. *Energ. Conver. and Manag.* 102 : 111-120
- Tanner V.R.,**(1965). Die Entwicklung der Von-Roll-Müllverbrennungsanlagen (The development of the Von-Roll incinerators), *Schweizerische Bauzeitung*, 83, 251- 260. (in German). <http://dx.doi.org/10.5169/seals-68135>
- Tezanou J.,**Koulidiati J., Proust M., Sougoti M., Goudeau J. C., Kafando P., Rogaume T., (2001). Caractérisation des Déchets Ménagers de la Ville de Ouagadougou (Burkina Faso); 10 pages.
- Tezanou J.** Koulidiati J., Rogaume T., Andzibarhe T., Jabouille F., Sougoti M., Kafando P., Segda B. G., (2005) Contribution à l'étude du traitement thermique des ordures ménagères des pays en voie de développement (PED). *Rev. CAMES - Série A*, Vol. 03
- Torretta V.,**Ionescu G., Raboniand M., Merler G., (2014). The mass and energy balance of an integrated solution for municipal solid waste treatment. *WIT Transactions on Ecology and The Environment.* 180:151-161
- Turan N. G.,**Çoruh S., Akdemir A., Ergun O.N., (2009). Municipal solid waste management strategies in Turkey. *Waste Management.* 29 : 465-469
- UNHSP (United Nations Human Settlements Programme),** (2012). State of Latin American and Caribbean Cities—Towards a New Urban Transition; UN-HABITAT: Rio de Janeiro, Brazil.
- UNI EN 15359.** Combustibles solides de récupération. Spécification et classes. BS EN 15359:2011 Novembre 2011
- USEPA, United States Environmental Protection Agency,** (2015). DRAFT Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2014 (Chapter-7-Waste), <http://www.epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html>
- Urbancl Danijela,** Zlak Janez, Anicic Bozidar, Trop Peter, Gorican Darko. (2016) The evaluation of heat production using municipal biomass co-incineration within a thermal power plant. *Energy.* 108:140-147
- USGS,** (2018). Cement Statistics and information. [Consulté le 22 Janvier 2019]. Disponible à l'adresse <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/index.html>
- Van Tubergen J.,**Glorius T., Waeyenbergh E., (2005). Classification of solid recovered fuels, February 2005, European Recovered Fuel Organisation (ERFO).
- Varotto, A., Spagnoli, A.,** (2017). Psychological strategies to promote household recycling . A systematic review with meta-analysis of validated field interventions. *J. Environ. Psychol.* 51, 168–188. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2017.03.011>
- Velis, C. A.,** Longhurst, P. J., Drew, G. H., Smith, R., Pollard, S. J., (2009). Biodrying for mechanical–biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. *Bioresource Technology,* 100(11), 2747-2761.
- Velis C.,**Wagland S., Longhurst P., Robson B., Sinfield K., Wise S., Pollard S., (2012). Solid recovered fuel: influence of waste streams composition and processing on chlorine content and fuel quality. *Environ. Sci. Technol.* 46, 1923-1931
- Vicente, P., Reis, E.,** (2008). Factors influencing households' participation in recycling. *Waste Manag. Res.* 26, 140–146. <https://doi.org/10.1177/0734242X07077371>
- Vounatsos P.,**Agraniotis M., Grammelis P. Kakaras E. Skiadi O. Zampoutis T., (2014). Refuse-derived fuel classification in a mechanical–biological treatment plant and its valorization with techno-economic criteria. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12(3) 1137-1145

- Walair**, (2018). The Walair Air separator. Disponible depuis: <http://walair.eu/en/products/air-separator/>
- Wavrer Ph.,** Michel P., Gidel C., Védrine H.,(2010). Actualisation de la méthode MODECOM. Rapport final, BRGM- RP Fr. 157 pages.
- WBCSD** (World Business Council for Sustainable Development), (2005). Guidelines for the selection and use of fuels and raw materials in the cement manufacturing process, Cement Sustainability Initiative (CSI), WBCSD, Geneva, Switzerland.
- Wicker A.** (2000).Chapitre 22: Gestion des Déchets «Statistiques pour la politique de l'environnement », 27-28 novembre, Munich ; 12 pages.
- Wilén C.,**Salokoski P., Kurkela E. and Sipilä K., (2004). Finnish expert report on best available techniques in energy production from solid recovered fuels, The Finnish Environment 668, Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland,
- Wilson D.C.,**(2007) Development drivers for waste management. *Waste Manag Res* 25(3):198–207
- WRAP**, (2010). Near Infrared sorting of household plastic packaging. <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/NIR%20Good%20practice%20guidance%20for%20existing%20NIR%20users%20Final.pdf>
- Xevgenos, D.,** C. Papadaskalopoulou, V. Panaretou, K. Moustakas and D. Malamis (2015) Success stories for recycling of MSW at municipal level: a review. *Waste and Biomass Valorization* 6(5): 657-684.
- Xiao Y.,**Bai X., Ouyang Z., Zheng H., Xing F., (2007). The Composition, Trend and Impact of Urban Solid Waste in Beijing.” *Environmental Monitoring and Assessment*.135(1-3) 21-30.
- Yadav, P. et Samadder, S.R.,**(2017). Assessment of applicability index for better management of municipal solid waste: a case study of Dhanbad, India. *Environ. Technol.* 37, 1-36. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1332104>.
- Yilmaz T.,** Aygün A, Berktaş A., Nas N., (2010) Removal of COD and colour from young municipal landfill leachate by Fenton process, *Environmental Technology*, 31:14, 1635-1640, DOI: 10.1080/09593330.2010.494692
- Youb O.,** Youb A., Bouabdessalam H., (2014). Municipal Waste Management in the Algerian High Plateaus. *Energy Procedia*. 50: 662-669
- Youcai Z.,** Luochun W , Renhua H., Dimin X. and Guowei G., (2002). A comparison of refuse attenuation in laboratory and field scale lysimeters. *Waste Management*, 22(1), 29-35.
- Zhan MX,** Fu J, Chen T, Li Y, Zhang J, Li XD, Yan JH, Buekens A., (2016). Effects of bypass system on PCDD/F emission and chlorine circulation in cement kilns. *Environ Sci Pollut Res Int.* 23(19):19657-66. doi: 10.1007/s11356-016-7082-6
- Zhou H.,**Meng A. h. Long Y.Q., Li Q.H., Zhang Y.G., (2014). An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: physical, chemical composition and heating value. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 46: 107-122.
- Zairi M.,** Ferchichi M., Ismaïl A., Jenayeh M. et Hammami H. (2004). Rehabilitation of Yahoudia dumping site, Tunisia, *Waste Management* 24: 1023 -1034.
- Zanotta, C.,**I.D.E.A. GRANDA: (2007). over 4 years' experience of co-firing HQ-SRF in cement kiln, In: Proceedings Sardinia 2007. Eleventh international waste management and landfill symposium, 1-5 October 2007, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- Zhang, H.,** Liu, J., Wen, Z.-G., Chen, Y.-X., (2017). College students' municipal solid waste source separation behavior and its influential factors: A case study in Beijing, China. *J. Cleaner Prod.* 164, 444–454.
- Zheng, L.J.,** J.C. Song, C.Y. Li, Y.G. Gao, P.L. Geng, B.N. Qu, and LY. Lin. 2014. Preferential policies promote municipal solid waste (MSW) to energy in China: Current status and prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 36:135–48. doi:10.1016/j.rser.2014.04.049
- Zsóka, Á.,** Z.M. Szerényi, A. Széchy, and T. Kocsis. (2013). Greening due to environmental education? Environmental knowledge, attitudes, consumer behavior and everyday proenvironmental activities of Hungarian high school and university students. *J. Clean. Prod.* 48:126–38. doi:10.1016/j.jclepro.2012.11.030
- Zurbrügg C. et Rehan A.,** (1999). Enhancing Community Motivation and Participation in Solid Waste Management. Excerpt out of SANDEC News, No. 4, 1999; ISSN 1420-5572

Annexe 1 : Le projet pilote de tri à la source



Suivi de tri à la source

		La première période (20 jours)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Poubelle marron	Fractions Combustibles (kg)	1	0.76	0.99	0.82	1.2	1.1	0.5	0.9	1.2	1.3	0.78	1.4	0.7	0.91	1.3	1.2	1.4	1.6	0.9	1
	Fractions Etrangères (kg)	0.3	0.3	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0	0.3	0.2	0.2
	total	1.3	1.06	1.39	0.92	1.4	1.2	0.7	1.3	1.6	1.5	0.88	1.5	0.8	1.01	1.5	1.4	1.4	1.9	1.1	1.2
Poubelle grise	Fractions non combustibles	2	2.4	2.5	3	1.9	2.1	2.4	1.7	1.8	2.1	2	2.4	2.5	1.9	2.3	2.1	3	2.8	1.8	2.7
	Fractions Etrangères (kg)	0.1	0	0.3	0	0.1	0	0	0.2	0.1	0	0.1	0.1	0	0.2	0	0.2	0	0	0	0.3
	total	2.1	2.4	2.8	3	2	2.1	2.4	1.9	1.9	2.1	2.1	2.5	2.5	2.1	2.3	2.3	3	2.8	1.8	3

		La deuxième période (20 jours)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Poubelle marron	Fractions Combustibles (kg)	1.1	0.9	1	1.2	1.1	1.7	1.1	1.5	1.2	0.9	1.2	1.1	1.7	1.1	1.5	1.2	0.9	1.2	1	1.1
	Fractions étrangères (kg)	0.1	0.1	0	0.1	0.3	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0	0.1	0	0.2	0.1	0.2
	total	1.2	1	1	1.3	1.4	1.9	1.1	1.6	1.3	1	1.3	1.2	1.9	1.2	1.5	1.3	0.9	1.4	1.1	1.3
Poubelle grise	Fractions non combustibles	2.4	1.9	2.1	2.4	3	2.8	2.7	2	2.6	3.1	2.4	1.9	2.1	2.4	3	2.8	2.7	2	2.1	2.1
	Fractions étrangères (kg)	0.1	0	0.2	0.1	0.1	0.3	0.1	0	0.1	0.1	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0	0.1
	total	2.5	1.9	2.3	2.5	3.1	3.1	2.8	2	2.7	3.2	2.6	1.9	2.2	2.5	3.1	3.1	2.8	2.1	2.1	2.2

		La troisième période (20 jours)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Poubelle marron	Fractions combustibles (kg)	1.2	1	1.3	1.4	1.1	2.1	1.1	1.5	1.2	1	1.5	1.1	1.9	0.9	0.6	0.9	0.7	1.2	1.2	1.1
	Fractions étrangères (kg)	0	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0.1	0	0.1	0	0.2	0	0	0.1	0	0.2	0.1	0
	total	1.2	1.1	1.4	1.5	1.1	2.2	1.1	1.6	1.3	1	1.6	1.1	2.1	0.9	0.6	1	0.7	1.4	1.3	1.1
Poubelle grise	Fractions non combustibles	2.1	2	2.1	2.4	2.3	2.1	2.3	1.9	2.6	1.9	2.4	1.9	2.1	2.4	2	2.1	2.7	2	1.9	2.4
	Fractions étrangères (kg)	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0.1	0	0.2	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1
	total	2.2	2	2.2	2.5	2.4	2.2	2.3	1.9	2.7	1.9	2.6	1.9	2.1	2.5	2.1	2.2	2.8	2.1	1.9	2.5

Annexe 2

Planning de caractérisation en période estivale

	Vendredi	Jeu	Merc	Mardi	Lundi	Dimanche	Samedi	Vend	Je	Merc	Mardi	Lundi	Dimanche	Samedi	Vend	Je	Merc	Mardi	Lundi	Dimanche	Samedi	Vend	Je	Merc	Mardi	Lundi	Dimanche	Samedi	Vend	Je	Merc	Mardi	Lundi	Dimanche	Commune		
	1-Jul-16	30-Jun-16	29-Jun-16	28-Jun-16	27-Jun-16	26-Jun-16	25-Jun-16	24-Jun-16	23-Jun-16	22-Jun-16	21-Jun-16	20-Jun-16	19-Jun-16	18-Jun-16	17-Jun-16	16-Jun-16	15-Jun-16	14-Jun-16	13-Jun-16	12-Jun-16	11-Jun-16	10-Jun-16	9-Jun-16	8-Jun-16	7-Jun-16	6-Jun-16	5-Jun-16										
C10																																					
C14																																					
C1																																					
C22																																					
C3																																					
C7																																					
C15																																					
C20																																					
Masse echantillon Kg	170		150		200				140	160		100		200		110	130	150				200		150													

Planning de caractérisation en période hivernale

	Vendredi	Jeudi	Mercredi	Mardi	Lundi	Dimanche	Samedi	Vendredi	Jeudi	Mercredi	Mardi	Lundi	Dimanche	Samedi	Vendredi	Jeudi	Mercredi	Mardi	Lundi	Dimanche	Samedi	Vendredi	Jeudi	Mercredi	Mardi	Lundi	Dimanche	Samedi	Vendredi	Jeudi	Mercredi	Mardi	Lundi	Dimanche	Samedi	Vendredi	Jeudi	Mercredi	Mardi	Lundi	Dimanche												
Commune	27-Jan-17	26-Jan-17	25-Jan-17	24-Jan-17	23-Jan-17	22-Jan-17	21-Jan-17	20-Jan-17	19-Jan-17	18-Jan-17	17-Jan-17	16-Jan-17	15-Jan-17	14-Jan-17	13-Jan-17	12-Jan-17	11-Jan-17	10-Jan-17	9-Jan-17	8-Jan-17	7-Jan-17	6-Jan-17	5-Jan-17	4-Jan-17	3-Jan-17	2-Jan-17	1-Jan-17																										
C10																																																					
C14																																																					
C1																																																					
C22																																																					
C3																																																					
C7																																																					
C15																																																					
C20																																																					
Masse d'échantillon Kg									200			150					140	120					150		120		100																										

Photos



