

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Technologie

Département Génie des Procédés



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Par

**Yamina REZKALLAH**

Thème :

### **Valorisation des résidus solides par incinération comme ajout dans la fabrication du ciment et son impact sur l'environnement**

Soutenue le 25/09/2025, devant le jury composé de :

Mme Ghania HENINI	Pr.	Université Hassiba Benbouali, Chlef	Présidente
Mme Naïma TAHRAOUI DOUMA	Pr.	Université Hassiba Benbouali, Chlef	Directrice
Mme Soumia KOUADRI MOUSTEFAI	Pr.	Agence Thématique de la Recherche en Science et Technologie	Codirectrice
M. Abderrahmane DJAFER	Pr.	Université Hassiba Benbouali, Chlef	Examinateur
M. Brahim BOUHADIBA	Pr.	Université Oran 2	Examinateur
M. Abdelazziz BENDRAOUA	Pr.	Université des Sciences et de la Technologie Oran Mohamed-Boudiaf, Oran	Examinateur
Mme Magali CASSELAS	Maitre de conf.	Université de Limoge, France	Invitée
M. Amir BENHALIMA	Chef de division/ contrôle de qualité	Entreprise des Ciments et Dérivés d'Ech-chellif (ECDE), Chlef	Invité

## Remerciements

Grâce à Dieu, toutes les bonnes actions sont faites. Je dis merci à Allah pour ses faveurs, malgré toutes les difficultés que je rencontrais, je me relevais et je recommençais parce que cette chose a été écrite pour moi et qu'elle a été réalisée, qu'elle soit longue ou courte.

Mon deuxième remerciement va à tous les membres de ma famille, et le mot « Merci » est trop petit pour eux. Je voudrais les remercier pour leur soutien financier et moral pendant toutes ces longues années, pour leur patience avec moi, ainsi que pour leur confiance en moi. J'exprime ma gratitude et mon remerciement à ma directrice de thèse, Mme Naïma TAHRAOUI DOUMA, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef et Directrice du laboratoire de recherche « Eau et Environnement », pour la liberté qu'elle m'a donnée pour réaliser cette thèse, ainsi que pour sa disponibilité, sa patience, le respect et la confiance qu'elle m'a apportée malgré toutes les difficultés que nous avons rencontrées pendant la réalisation de ce travail. Je la remercie pour son accompagnement, ses aides scientifique, moral et financier au cours de toutes ces années de la préparation de ma thèse.

Toute ma reconnaissance s'adresse à ma codirectrice de thèse Mme Soumia KOUADRI MOUSTEFAI, Professeur, Directrice de l'Agence Thématique de la Recherche en Science et Technologie (ATRST) pour sa disponibilité, ses communications ainsi que pour le respect de toutes les idées que je lui ai proposé, merci pour ses encouragements constants et son aide au cours de la préparation de ma thèse de doctorat.

Je remercie Mme Ghania HENINI, Professeur à l'Université de HB de Chlef, d'avoir accepté de présider ce travail de thèse. Je lui exprime mon profond respect et ma gratitude.

Je remercie chaleureusement Mr Abdelazziz BENDRAOUA, Professeur à l'Université des sciences et de la technologie Oran Mohamed-Boudiaf, Mr Brahim BOUHADIBA, Professeur à l'université Oran 2, et Mr Abderrahmane DJAFER Abderrahmane, Professeur à l'Université HB de Chlef, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir acceptés d'évaluer ce modeste travail. J'exprime ma profonde gratitude à Mme Magali CASSELAS, Maître de Conférences à l'Université de Limoges et à Mr Amir BENHALIMA Chef de division/laboratoire contrôle de qualité à la cimenterie de Chlef, pour leur participation au jury de la soutenance comme membres invités.

Mon remerciement va maintenant au responsable de la formation doctorale Pr. Bensaber BENSEBIA pour ses qualités humaines avant d'être responsable, je lui dis merci pour sa disponibilité et ses encouragements à tous les doctorants afin de réaliser leurs projets. Mes vifs remerciements et ma profonde reconnaissance s'adressent aussi au Pr. Lahcen DJAFER.

Mes remerciements s'adressent aussi au Directeur du Laboratoire Chimie Végétale-Eau Energie Pr. Ykhlef LAÏDANI, et à toute l'équipe du laboratoire.

Mes chaleureuses remerciements s'adressent à Mr Hocine SADOK le manager de l'entreprise d'incinération GREEN SKY pour faciliter les procédures afin d'incinérer les déchets. Mes remerciements s'adressent aussi à tous les travailleurs de la société pour son aide.

Mes chaleureuses remerciements s'adresse à tous les responsables de l'Entreprise des ciments et dérivés Ech-Chellif (ECDE) de Oued Sly (Chlef) , pour leur accueil au niveau de la cimenterie pendant une longue période .Je remercie tous les membres de laboratoire contrôle de qualité pour leurs aides irréprochable et pour leurs qualités humaines qui sont pleins de respect, je cite Mr NASSRI, Mr BENHALIMA, Mme KARROUZI , Mr ZARROUKI ,Mr BACHA ,Mme Amel, Mr TOUIL, Mme BENACEUR, Mr HADBI, Mr KHELIFA ,Mr LANAIDRI, Mr LAID, Mr HAMOUDI, Fatima KARROUZI, Houda, Soumia, Fatima, Imen, Houria.

Mes remerciements s'adressent aussi aux ingénieurs de laboratoire de Génie Civile Mr Boumedienne Zidaine et Mme Fatima pour son aide inconditionnelle. Je remercie aussi tous les travailleurs de la station agronomique expérimentale de l'université de Chlef.

Mon remerciement et ma gratitude s'adressent aussi au Pr. Miloud TAHAR ABBAS pour toutes les analyses de DRX. Mes vifs remerciements s'adressent au Dr. Boualem METTAI pour son aide pour la réalisation des analyses chimiques.

Mes remerciements s'adressent aux ingénieurs de laboratoire de Génie des Procédés Mme Houria MERZOUK et Mme Fatma Batoul HENNI CHEBRA pour leurs aides.

Mon remerciement s'adresse aussi à mon amie Dr. Salima LARBAOUI pour son cœur blanc ainsi que pour tous ses encouragements moraux pendant les moments difficiles. Un grand merci à la doctorante Soraya HAM qui a vécu avec moi le chemin de ce doctorat.

Mes remerciements s'adressent à tous les membres de laboratoire Eau et Environnement E2Lim France, Pr. Michel BAUDU, Pr. Gill GUIBAUD, Dr. Magali CASSELAS, Dr. Audry PROROT, Mme Manu, Mme Karine, Mr Patrice, Mr Theirry, Dr. Jose MATIAS PENAS CASTEJON, Dr. Sylvain, Dr. Robin, et Mme Lourdes pour leur accueil et leur aide.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les personnes qui nous ont aidés pendant mon stage en France, M. Mohammed BADI (Entreprise Fives Group, Limoges (France)) et M. Abdenour, mes cousins Mohammed et Toufik, ainsi que Fanny Dupré, Claire Dupré, et Guillaume Baudin qui nous ont assuré l'hébergement, et tous les moyens afin de passer notre séjour en sécurité et confort à Limoges, France au cours de notre stage moi et la doctorante Soraya HAM. Un grand merci.

Enfin, mes remerciements s'adressent à mes collègues doctorants qui sont les premières personnes que j'ai connu au début de ce doctorat, ainsi qu'à tous les enseignants du département de génie des procédés, Faculté de Technologie, Université Hassiba Benbouali de Chlef.

## **Dédicaces**

A la mémoire de mon Père REZKALLAH Ahmed, Allah  
Yarhmou.

A ma très chère Mère, le premier et le dernier soutien dans ma  
vie.

*« L'éducation est l'arme la plus puissante qu'on puisse utiliser pour  
changer le monde. »*

**Nelson Mandela**

*« Ne laissez pas les gens vous entraîner dans leur tempête, entraînez-  
les dans votre calme. »*

**William Shakespeare**

## **Abstract**

In Algeria, engineered landfill sites are considered to be the ultimate means of disposing of urban solid waste in the interests of environmental protection. In Chlef, urban solid waste is currently collected and sent to the Mekkassa and Oum Drou landfill sites. Other waste treatment methods (composting, methanization, incineration.....etc.) cannot be mastered in Algeria.

With this in mind, a study has been launched into the possibilities of incinerating waste from Chlef, the majority of which is organic (50%-60%). This type of recovery is a promising way of achieving a circular economy and reducing the environmental impact, and would reduce the pollution load arriving at Chlef's controlled landfill sites.

This action-research study focuses on several aspects to ensure the viability of an incineration process, with an emphasis on: - the characterisation of the urban solid waste deposit in terms of flow (T/D) and composition over two years and four successive seasons; - the incineration of urban solid waste; - and the uses of the bottom ash generated as supplementary materials in the manufacture of cement in Chlef.

In this context, one ton of unsorted urban solid waste and 500 kg of sorted urban waste from the town of Chlef were burned in a rotary kiln. For the first experiment, part of the ordinary Portland cement (OPC) was replaced by 0 wt%, 5 wt%, 10 wt% and 20 wt% of the two types of bottom ash generated. The results show that the oxide and heavy metal contents were not similar in the two bottom ashes. The incorporation of both bottom ash materials into the cement results in an increase in water demand for normal consistency. The results indicate that the soundness values of all the cement pastes are less than 10 mm. From the results, it is important to mention that there was a delay in the initial setting time for the cement prepared with bottom ash from the incineration of one ton of RSU. Both bottom ash materials had a negative effect on strengths at a replacement level of 20 wt%.

In the second experiment, the raw materials normally used to make clinker were mixed with different proportions of bottom ash (2 wt%, 4 wt%, 6 wt% and 8 wt%) to obtain raw mixes, which were then fired in a muffle kiln at 1,450°C. The chemical and mineralogical characteristics of the clinkers obtained were characterized. The results show that the clinkers obtained contain the following oxides: CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and the mineralogical phases C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, and C<sub>4</sub>AF, with a slight difference in quantity compared with industrial clinker.

**Keywords:** urban solid waste, incineration, bottom ash, recovery, secondary raw material; supplementary materials

## **Résumé**

Dans le cadre de la protection de l'environnement, l'Algérie considère les centres d'enfouissement techniques comme le moyen ultime d'éliminer les déchets solides urbains. Actuellement, à Chlef, les résidus solides urbains (RSU) sont collectés et acheminés vers les centres d'enfouissement techniques (CETs Meknassa et Oum Drou). Les autres méthodes de traitement des résidus (Compostage, méthanisation, incinération.....etc.) ne sont pas maîtrisables en Algérie.

Dans ce contexte, un traitement par incinération des RSU de Chlef, a été formulé, en lançant une étude sur les possibilités d'incinération de ces résidus à majorité organiques (Entre 50 % et 60 %). Cette valorisation est un moyen prometteur d'atteindre une économie circulaire et de réduire l'impact environnemental et permettrait d'alléger la charge polluante arrivant aux décharges contrôlées de Chlef.

Cette étude de recherche-action est axée sur plusieurs aspects pour assurer la viabilité d'une filière d'incinération, en mettant l'accent sur: - la caractérisation du gisement des résidus solides urbains en flux (T/J) et en composition sur deux années et quatre campagnes successives ;

- l'incinération des résidus solides urbains ; - et utilisations des mâchefers générés autant que ajout dans la fabrication du ciment à Chlef.

Dans ce contexte, une tonne de déchets ménagers solides non triés et 500 kg de déchets ménagers triés issus de la ville de Chlef ont été brûlés dans un four rotatif. Pour la première expérience, une partie du ciment Portland ordinaire (OPC) a été remplacée par 0 %, 5 %, 10 % et 20 % des deux types de mâchefers générés. Les résultats montrent que les teneurs en oxydes et en métaux lourds n'étaient pas similaires dans les deux mâchefers. L'incorporation des deux mâchefers dans le ciment entraîne une augmentation de la demande en eau pour une consistance normale. Les résultats indiquent que les valeurs de l'expansion de toutes les pâtes de ciment sont inférieures à 10 mm. D'après les résultats, il est important de mentionner qu'il y a eu un retard dans le temps de prise initiale pour le ciment préparé avec des mâchefers provenant de l'incinération d'une tonne de RSU. Les deux mâchefers ont eu un effet négatif sur les résistances à un niveau de remplacement de 20 %.

Pour la deuxième expérience, les matières premières habituellement utilisées pour fabriquer le clinker sont mélangées avec différentes proportions de mâchefers (2 %, 4 %, 6 % et 8 %) pour obtenir des mélanges crus, qui sont ensuite cuits dans un four à moufle à 1 450 °C. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques des clinkers obtenus ont été caractérisées. Les résultats montrent que les clinkers obtenus contiennent les oxydes : CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et les phases minéralogiques C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, et C<sub>4</sub>AF avec une légère différence de quantité par rapport à ceux du clinker industriel.

**Mots clés:** résidus solides urbains, incinération, mâchefers, valorisation, matière première secondaire ; ajout

## ملخص

في الجزائر، تُعتبر مراكز الردم التقني الوسيلة المثلى للتخلص من النفايات المنزلية الصلبة من أجل حماية البيئة. في الشلف، يتم حالياً جمع النفايات الصلبة الحضرية وإرسالها إلى مركزي مكناسة وأم الدروع لردم النفايات. ان طرق معالجة النفايات الأخرى (التسميد، الهضم اللاهوائي، والحرق..... الخ) غير متقنة في الجزائر.

في هذا السياق، تم اقتراح حرق النفايات الصلبة المنزلية من الشلف، من خلال إطلاق دراسة حول إمكانيات حرق هذه النفايات التي تكون غالبيتها عضوية (50%-60%). ويُعد هذا النوع من الرسكلة وسيلة واعدة لتحقيق الاقتصاد الدائري وتقليل الأثر البيئي، ومن شأنه أن يساعد على تقليل عبئ التلوث الذي يصل إلى مواقع الردم التقني الخاضعة للرقابة في الشلف.

يركز هذا المشروع البحثي-العملي على عدد من الجوانب لضمان عملية حرق مستدامة، بما في ذلك- توصيف مجرى النفايات من حيث التدفق و التركيب على مدار عامين و اربعة مواسم - حرق النفايات المنزلية الصلبة؛ - استخدام رماد القاع المتولد كمادة اسمنتية إضافية في تصنيع الإسمنت في الشلف.

تحقيقاً لهذه الغاية، تم حرق طن واحد من النفايات المنزلية الصلبة غير المصنفة و500 كجم من النفايات المنزلية المصنفة من مدينة الشلف في فرن دوار.

بالنسبة للتجربة الأولى، تم استبدال جزء من الإسمنت البورتلاندي العادي بنسب 0%، 5%، 10%، و20% من نوعي رماد القاع المتولد. أظهرت النتائج أن محتويات الأكسيد والمعادن الثقيلة لم تكن متشابهة في رماد القاع. ينتج عن دمج كلتا مادتي رماد القاع في الإسمنت زيادة في الطلب على الماء من أجل التماسك الطبيعي. تشير النتائج إلى أن قيم التمدد لجميع معاجين الإسمنت أقل من 10 ملم. من النتائج، من المهم الإشارة إلى أنه كان هناك تأخير في زمن التماسك الأولي للإسمنت المحضر برماد القاع من حرق طن واحد من النفايات المنزلية الصلبة. كان لكل من مادتي رماد القاع تأثيراً سلبياً على المقاومة عند مستوى 20%.

في التجربة الثانية، تم خلط المواد الخام المستخدمة عادةً لصنع الكلنكر مع نسب مختلفة من رماد القاع (2%، و4%، و6%، و8%) للحصول على خلطات خام، ثم تم حرقها في فرن عند درجة حرارة 1450 درجة مئوية.

تم تحديد الخصائص الكيميائية والمعدنية للكلنكرات التي تم الحصول عليها. أظهرت النتائج أن

الكلنكرات التي تم الحصول عليها تحتوي على الأكاسيد  $CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3$

و المراحل المعدنية  $C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF$  مع اختلاف طفيف في كمياتها مقارنة بالكلنكر الصناعي.

الكلمات المفتاحية: النفايات المنزلية الصلبة، الحرق، رماد القاع، الاستعادة، المواد الخام الثانوية، مواد الإسمنت التكميلية

## Listes des figures

## Partie 01 : Synthèse Bibliographique

## Chapitre I : Généralités sur les résidus solides urbains et leur gestion

<b>Figure I.1:</b> Taux des RSU recyclables .....	10
<b>Figure I.2 :</b> Processus de compostage.....	11
<b>Figure I.3 :</b> Courbe théorique d'évolution de la température au cours du compostage.....	12
<b>Figure I.4 :</b> Construction de plusieurs andains de compost - Wilaya de Mostaganem et Sidi Bel Abbès .....	12

## Chapitre II: L'incinération des résidus solides urbains (RSU) et les mâchefers générés

<b>Figure II.1 :</b> four à grille.....	16
<b>Figure II.2 :</b> four rotatif .....	17
<b>Figure II.3 :</b> Four à lit fluidisé .....	18

## Chapitre III : Recyclage des mâchefers d'incinération des résidus solides urbains comme ajout dans la fabrication du ciment

<b>Figure III.1:</b> Les étapes de clinkérisation (four rotatif).....	34
<b>Figure III.2:</b> Réactivité des quatre constituants du ciment. La courbe « overall » représente une composition moyenne des constituants de ciment (55 % C <sub>3</sub> S, 18 % C <sub>2</sub> S, 10 % C <sub>3</sub> A, 8 % C <sub>4</sub> AF) .....	41

## Partie 02: Matériels et Méthodes

## Chapitre I : Méthodes de caractérisation physico-chimique des résidus solides urbains de la commune de Chlef

<b>Figure I.1 :</b> Carte localisant la commune de Chlef .....	46
<b>Figure I.2 :</b> Table de tri des RSU.....	48
<b>Figure I.3 :</b> Séchage des RSU.....	49
<b>Figure I.4 :</b> Calcination des RSU.....	50

## Chapitre II : Méthodes d'incinération et de caractérisation des mâchefers

<b>Figure II.1 :</b> Incinérateur rotatif.....	51
<b>Figure II.2 :</b> Incinérateur Green Sky de la zone industrielle, Chlef.....	52
<b>Figure II.3 :</b> Mâchefers d'incinération des RSU (a. MIRSU1 ; b. MIRSU2) .....	53
<b>Figure II.4 :</b> Tamiseuse SIEVE SHAKER .....	53
<b>Figure II.5 :</b> Broyage des mâchefers.....	54
<b>Figure II.6 :</b> Appareil Blaine. ....	55
<b>Figure II.7 :</b> Pycnomètre.....	56
<b>Figure II.8:</b> Microondes Multiwave GO (Anton Paar) .....	57
<b>Figure II.9 :</b> Appareil chromatographie ionique (IC, Metrohm).....	57
<b>Figure II.10 :</b> Appareil diffraction des rayons X (XRD, Rigaku Miniflex 600) .....	58
<b>Figure II.11 :</b> Four à moufle.....	59

## Chapitre III : Préparation des ciments avec la poudre de mâchefers

<b>Figure III.1 :</b> Cimenterie de Chlef.....	60
<b>Figure III.2:</b> Ciment I 42.5 N de la cimenterie de Chlef .....	61
<b>Figure III.3 :</b> Clinker CRS.....	61
<b>Figure III.4 :</b> Gypse .....	62
<b>Figure III.5 :</b> Sable normalisé.....	62
<b>Figure III.6:</b> Granulométrie du sable normalisé .....	63

<b>Figure III.7</b> : Appareil de Vicat.....	64
<b>Figure III.8</b> : Appareil de Vicat automatique .....	65
<b>Figure III.9</b> : Moules de Chatelier utilisé pour la mesure de l'expansion des ciments.....	65
<b>Figure III.10</b> : Préparation des mortiers. ....	66
<b>Figure III.11</b> : Etalement du mortier .....	67
<b>Figure III.12</b> : Presse mécanique.....	68
<b>Figure III.13</b> : Essai d'absorption capillaire. ....	69
<b>Figure III.14</b> : Calcaire.....	70
<b>Figure III.15</b> : Argile.....	70
<b>Figure III.16</b> : Minerai de fer .....	71
<b>Figure III.17</b> : Lavage des mâchefers.....	71
<b>Figure III.18</b> : Tableur de calcul d'un mélange cru.....	72
<b>Figure III.19</b> : Température de clinkérisation.....	73
<b>Figure III.20</b> : Etapes suivies pour la préparation et la cuisson des crus.....	74

### **Partie 03: Résultats et Discussion**

#### Chapitre I : Caractérisation physico-chimique des résidus solides urbains (RSU)

<b>Figure I.1</b> : Répartition par taille des résidus solides urbains durant les hivers de 2018 et 2019. ....	77
<b>Figure I.2</b> : Répartition par taille des résidus solides urbains durant les printemps de 2018 et 2019. ....	77
<b>Figure I.3</b> : Répartition par taille des résidus solides urbains durant les étés de 2018 et 2019. ....	78
<b>Figure I.4</b> : Répartition par taille des résidus solides urbains durant les automnes de 2018 et 2019. ....	78
<b>Figure I.5</b> : Composition moyenne des RSU par catégorie des quatre saisons sur les deux années (2018-2019 et 2019-2020).....	85
<b>Figure I.6</b> : Composition moyenne des RSU dans certaines villes algériennes pendant l'année 2018-2019. ....	86

#### Chapitre II : Incinération des résidus solides urbains et caractérisation physico-chimique des mâchefers générés

<b>Figure II.1</b> : DRX des MIRSU1. ....	98
<b>Figure II.2</b> : DRX des MIRSU2. ....	98
<b>Figure II.3</b> : IRTF des MIRSU1. ....	99
<b>Figure II.4</b> : IRTF des MIRSU2. ....	100

#### Chapitre III. Valorisation des mâchefers comme ajout dans la fabrication du ciment

<b>Figure III.1</b> : Surface spécifique Blaine des ciments préparés .....	103
<b>Figure III.2</b> : Etalement des mortiers préparés avec les MIRSU1.....	105
<b>Figure III.3</b> : Etalement des mortiers préparés avec les MIRSU2.....	106
<b>Figure III.4</b> : Effet des MIRSU1 sur les résistances à la flexion des mortiers.....	107
<b>Figure III.5</b> : Effet des MIRSU2 sur les résistances à la flexion des mortiers.....	107
<b>Figure III.6</b> : Effet des MIRSU1 sur les résistances à compression des mortiers.....	110
<b>Figure III.7</b> : Effet des MIRSU2 sur les résistances à compression des mortiers.....	110
<b>Figure III.8</b> : Coefficients d'absorption capillaire du mélange Mortier-MIRSU1.....	111

<b>Figure III.9:</b> Coefficient d'absorption capillaire du mélange Mortier-MIRSU2. ....	112
<b>Figure III.10 :</b> Surface spécifique Blaine des ciments CRS. ....	113
<b>Figure III.11:</b> Résistances à la flexion des mortiers de ciments CRS en 2 jours, 28 jours, et 90 jours. .....	114
<b>Figure III.12:</b> Résistances à la compression des mortiers de ciments CRS en 2 jours, 28 jours, et 90 jours. ....	115
<b>Figures III.13:</b> DRX des clinkers préparés. ....	121

## Liste des tableaux

### Partie I: Synthèse Bibliographique

#### Chapitre I : Généralités sur les résidus solides urbains et leur gestion

<b>Tableau I.1</b> : Ratio de production des RSU dans le monde. ....	5
<b>Tableau I.2</b> : Composition physique en % en catégories de RSU dans le monde.....	6
<b>Tableau I.3</b> : Densités des RSU dans certains pays du monde. ....	7
<b>Tableau I.4</b> : Humidité des RSU.....	7
<b>Tableau I.5</b> : Matière solide volatile des RSU.....	8
<b>Tableau I.6</b> : pouvoir calorifique inférieur des RSU.....	9
<b>Tableau I.7</b> : Les éléments traces métalliques. ....	9

#### Chapitre II: L'incinération des résidus solides urbains (RSU) et les mâchefers générés

<b>Tableau II.1</b> : Phases minéralogiques des mâchefers .....	21
<b>Tableau II.2</b> : Composition chimique des MIRSU .....	22
<b>Tableau II.3</b> : Eléments traces métalliques des mâchefers. ....	22
<b>Tableau II.4</b> : Classement des MIRSU .....	23
<b>Tableau II.5</b> : Eléments traces métalliques (Lixiviation).....	24

#### Chapitre III : Recyclage des mâchefers d'incinération des résidus solides urbains comme ajout dans la fabrication du ciment

<b>Tableau III.1</b> : Composition minéralogique du clinker Portland.....	35
<b>Tableau III.2</b> : Les types de ciments courants.....	38
<b>Tableau III.3</b> : Spécification mécaniques et physiques d'un ciment .....	39
<b>Tableau III.4</b> : Caractéristiques des principaux constituants du ciment portland.....	40
<b>Tableau III.5</b> : Cimenteries Algériennes et les ajouts utilisés .....	42

### Partie II: Matériels et Méthodes

#### Chapitre I : Méthodes de caractérisation physico-chimique des résidus solides urbains de la commune de Chlef

<b>Tableau I.1</b> : Zonage et sectorisation de la commune de Chlef.....	47
--	----

#### Chapitre III : Préparation des ciments avec la poudre de mâchefers

<b>Tableau III.1</b> : Proportions des matières dans les ciments préparés.....	63
<b>Tableau III.2</b> : Proportions des matières premières dans le mélange cru. ....	72
<b>Tableau III.3</b> : Composition chimique du cru industriel.....	73

### Partie III: Résultats et Discussion

#### Chapitre I : Caractérisation physico-chimique des résidus solides urbains (RSU)

<b>Tableau I.1</b> : Les ratios de production des RSU pour chaque zone de la commune de Chlef (Direction de l'environnement de Chlef, 2025).....	75
<b>Tableau I.2</b> : Composition des RSU par catégorie, par zone et par saison, année 2018-2019.....	79
<b>Tableau I.3</b> : Composition des RSU par catégorie, par zone et par saison, année 2019-2020.....	81
<b>Tableau I.4</b> : Densité des RSU de la commune de Chlef.....	87
<b>Tableau I.5</b> : Caractérisation chimique des résidus solides urbains sur une période de deux ans, répartie sur les quatre saisons. ....	88
<b>Tableau I.6</b> : Proportions des RSU de la commune de Chlef selon les modes de traitement.....	90

#### Chapitre II : Incinération des résidus solides urbains et caractérisation physico-chimique des mâchefers générés

<b>Tableau II.1</b> : Composition physique et chimiques des RSU incinérées. ....	91
<b>Tableau II.2</b> : Paramètres d'incinération. ....	92
<b>Tableau II.3</b> : Analyse granulométrique des deux types de mâchefers.....	93

<b>Tableau II.4 :</b> Propriétés physiques des mâchefers.....	94
<b>Tableau II.5:</b> Composition chimique des deux types de mâchefers.....	94
<b>Tableau II.6:</b> Eléments trace métalliques des mâchefers de type 1 (MIRSU1) et les mâchefers de type 2 (MIRSU2).....	95
<b>Tableau II.7:</b> Eléments trace métalliques des lixiviats des mâchefers de type 1 (MIRSU1) et dans les mâchefers de type 2 (MIRSU2).....	96
Chapitre III. Valorisation des mâchefers comme ajout dans la fabrication du ciment	
<b>Tableau III.1:</b> Composition chimique du CEMI 42.5N .....	102
<b>Tableau III.2:</b> Propriétés physiques des pâtes de ciment .....	104
<b>Tableau III.3:</b> Composition chimiques des ciments CRS préparés.....	112
<b>Tableau III.4:</b> Propriétés physiques des pâtes de ciment CRS.....	113
<b>Tableau III.5 :</b> Bilan global.....	116
<b>Tableau III.6:</b> Composition chimique des matières premières.....	116
<b>Tableau III.7:</b> Eléments trace métalliques contenus dans les matières premières.....	117
<b>Tableau III.8 :</b> Composition chimique des crus préparés.....	118
<b>Tableau III.9:</b> Composition chimique des clinkers préparés.....	118
<b>Tableau III.11:</b> Composition minéralogique des clinkers .....	119

## **Abréviations**

RSU : Résidus Solides Urbains

CET : Centre d'Enfouissement Technique

PED : Pays en développement

MODECOM : Méthode de caractérisation des ordures ménagères

MSV : Matière Solide Volatile

PCI : Pouvoir Calorifique Inferieur

AGID : Appui à la gestion des déchets

PAF : Perte Au Feu

pH : potentiel en Hydrogène

MIRSU : Mâchefers d'incinération des RSU

GICA : Groupe Industriel des Ciments d'Algérie

SSB : Surface spécifique Blaine

CI : Chromatographie Ionique

ICP-MS: Inductive Coupled Plasma-Masse Spectroscopy

IRTF: Infrarouge à Transformée de Fourier

DRX : Diffraction des Rayons X

ECDE : Entreprise des Ciments et Dérivés Echeliff

CNC : Combustibles Non Classés

INC : Incombustibles Non Classés

DMA : Déchets Ménagers et Assimilés

MS : Matière Sèche

MO : Matière Organique

NE : Norme Européenne

NF : Norme Française

**Notation de ciment**

C<sub>3</sub>S : Silicate tricalcique (alite)

C<sub>2</sub>S : Silicate bicalcique (bélite)

C<sub>3</sub>A : Aluminate tricalcique

C<sub>4</sub>AF : Alumino-ferrite tétracalcique

CEMI : Ciment portland

CH : Hydroxyde de calcium

CSH : Silicate de calcium hydraté

H : L'eau

Ettringite : Tri-sulfo-aluminate hydraté

CK : Clinker

CRS : Clinker résistant au sulfate

LSF: Lime saturation factor

SR: Silica ratio

AF : Alumino-ferrique

## Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Partie 01 : Synthèse Bibliographique</b>	
Chapitre I : Généralités sur les résidus solides urbains et leur gestion.....	4
I.1 Introduction .....	4
I.2 Définitions .....	4
I.3 Production des résidus solides urbains dans le monde et en Algérie.....	4
I.4 Composition des résidus solides urbains .....	5
I.5 Caractérisation des résidus solides urbains.....	5
I.5.1 Composition physique .....	5
I.5.2 Caractéristiques physico-chimiques .....	6
a. Densité .....	6
b. Le taux de l'humidité (% H) .....	7
c. Le pourcentage de la Matière Solide Volatile (% MSV).....	8
d. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) .....	8
e. Les éléments trace métalliques.....	9
I.6 Les modes de gestion des RSU.....	10
I.6.1 Recyclage .....	10
I.6.2 Incinération.....	10
I.6.3 Compostage .....	11
I.6.4 Méthanisation .....	12
I.6.5 Mise en décharge contrôlée (l'enfouissement technique).....	13
I.7 Conclusion.....	14
Chapitre II: L'incinération des résidus solides urbains (RSU) et les mâchefers générés .....	15
II.1 Introduction .....	15
II.2 Facteurs influençant le processus d'incinération .....	15
II.2.1 Qualité des déchets incinérés .....	15
II.2.2 Température .....	15
II.2.3 Temps de séjour .....	15
II.2.4 Turbulence .....	16
II.2.5 Coefficient d'excès d'air .....	16
II.3 Types de fours d'incinération.....	16
II.3.1 Le four à grille.....	16
II.3.2 Le four rotatif .....	17
II.3.3 Le four à lit fluidisé.....	17
II.4 Les différentes étapes de l'incinération .....	18
II.4.1 Séchage .....	18
II.4.2 Pyrolyse.....	18

II.4.3 Combustion .....	18
II.5 Sous-produits de l'incinération.....	19
II.5.1 Les résidus liquides et gazeux.....	19
II.5.2 Les résidus solides .....	19
II.6 Caractéristiques physico-chimiques des mâchefers d'incinération des RSU (MIRSU) .....	19
II.6.1 Humidité .....	19
II.6.2 Masse volumique .....	19
II.6.3 Perte au feu.....	19
II.6.4 Potentiel en hydrogène (pH) .....	20
II.6.5 Granulométrie .....	20
II.6.6 Composition Minéralogique.....	20
II.6.7 Composition chimique. ....	21
II.6.8 Eléments métalliques.....	22
II.6.9 Caractéristiques environnementales (lixiviation) .....	23
II.7 Influence de la composition physique des RSU incinérées par la composition chimique des mâchefers.....	25
II.7.1 La zone géographique et la saison.....	25
II.7.2 Le tri sélectif .....	25
II.7.3 Le type de l'incinérateur.....	25
II.7.4 Le mode de refroidissement .....	25
II.8 Modes de Prétraitement des mâchefers .....	26
II.8.1 Prétraitement mécanique .....	26
II.8.2 Maturation.....	26
II.8.2.1 Les étapes de maturation.....	26
II.8.3 Valorisation des mâchefers .....	27
II.8.3.1 Techniques routières .....	27
II.8.3.2 Fabrication de céramique .....	27
II.8.3.3 Agriculture .....	28
II.8.3.4 Adsorbant.....	28
II.8.3.5 Production du ciment .....	29
II.8.3.6 Préparation du béton et du mortier.....	29
II.9 Conclusion.....	30
Chapitre III : Recyclage des mâchefers d'incinération des résidus solides urbains comme ajout dans la fabrication du ciment.....	31
III.1 Introduction.....	31
III.2 Le ciment Portland.....	31
III.3 Processus de production du ciment portland.....	31
III.3.1 Préparation du cru.....	31

III.3.2 Optimisation des constituants du cru cimentier .....	32
III.3.3 Cuisson (Clinkérisation).....	33
III.4 Valorisation des mâchefers dans le cru cimentaire .....	34
III.5 Les composants du clinker.....	35
III.5.1 Silicate tricalcique (Alite).....	36
III.5.2 Silicate bicalcique (Bélite).....	36
III.5.3 Aluminate tricalcique.....	36
III.5.4 L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferrite) .....	37
III.5.5 Phases mineures.....	37
III.6 Préparation du ciment.....	37
III.7 Classification des ajouts minéraux.....	37
III.7.1 Ajouts actifs.....	37
III.7.2 Ajouts inertes.....	38
III.8 Classification des ciments.....	38
III.8.1 Classification en fonction de leur composition.....	38
III.8.2 Classification en fonction de leur résistance normale.....	38
III.9 Hydratation du ciment .....	39
III.9.1 Hydratation du silicate tricalcique $C_3S$ .....	39
III.9.2 Hydratation du silicate bicalcique $C_2S$ .....	39
III.9.3 Hydratation de l'aluminate tricalcique $C_3A$ .....	40
III.9.4 Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique $C_4AF$ .....	40
III.10 Importance d'un ajout minéral dans l'industrie du ciment.....	41
III.11 Influence d'un ajout minéral (mâchefers) sur les caractéristiques physiques du ciment.....	43
III.11.1 Temps de prise.....	43
III.11.2 Stabilité (expansion) .....	43
III.12 Influence d'un ajout minéral (mâchefers) sur les caractéristiques du mortier.....	43
III.12.1 Maniabilité.....	43
III.12.2 Résistance mécanique.....	44
III.13 Conclusion .....	44

**Partie 02 : Matériels et Méthodes**

Chapitre I : Méthodes de caractérisation physico-chimique des résidus solides urbains de la commune de Chlef .....	46
I.1 Méthodes de caractérisation des résidus solides urbains .....	46
I.1.1 Zone d'étude.....	46
I.2 Echantillonnage .....	47
I.2.1 Organisation .....	47
I.2.1.1 Prélèvement de l'échantillon .....	47
I.2.1.2 Tri des déchets.....	47

I.2.1.3 Analyses physico-chimiques des RSU .....	48
Chapitre II : Méthodes d'incinération et de caractérisation des mâchefers.....	51
II.1 Incinération des RSU .....	51
II.1.1 L'entreprise GREEN SKY de l'incinération .....	51
II.1.2 Incinérateur .....	51
II.1.3 Incinération des RSU de la commune de Chlef.....	51
II.2 Méthodes de caractérisation des mâchefers d'incinération des RSU .....	52
II.2.1 Echantillonnage et quartage .....	52
II.2.2 Analyse granulométrique .....	53
II.2.3 Broyage des mâchefers.....	53
II.2.4 Surface spécifique Blaine (SSB).....	54
II.2.5 Masse volumique .....	55
II.2.6 Caractérisation chimique et minéralogique .....	56
II.2.6.1 Composition chimique de la poudre des mâchefers .....	56
II.2.6.2 Minéralisation.....	56
II.2.6.3 Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS).....	57
II.2.6.4 Chromatographie ionique (CI) .....	57
II.2.6.5 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) .....	58
II.2.6.6 Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) .....	58
II.2.6.7 Perte au feu.....	58
II.2.8.8 Analyse environnementale .....	59
Chapitre III : Préparation des ciments avec la poudre de mâchefers .....	60
III.1 Présentation de la cimenterie de Chlef.....	60
III.2 Matériaux utilisés.....	60
III.2.1 Ciment de la cimenterie de Chlef.....	60
III.2.2 Clinker CRS.....	61
III.2.3 Gypse .....	62
III.2.4 Sable .....	62
III.3 Matrices des ciments préparés .....	63
III.4 Préparation des pâtes.....	63
III.4.1 Demande en eau.....	63
III.4.2 Temps de prise.....	64
III.4.3 Test d'expansion à chaud.....	65
III.4.4 Préparation des mortiers .....	66
III.5 Propriétés des mortiers à l'état frais.....	67
III.5.1 Etalement .....	67
III.6 Propriétés des mortiers à l'état durci.....	68
III.6.1 Résistances mécaniques .....	68

III.6.2 Absorption d'eau par capillarité.....	68
III.7 Clinkérisation.....	70
III.7.1 Calcaire.....	70
III.7.2 L'argile.....	70
III.7.3 Minerai de fer.....	71
III.7.4 Mâchefers.....	71
III.7.5 Clinker.....	71
III.8 Méthode de préparation et calcul d'un mélange cru.....	72
III.9 Clinkérisation.....	73
III.5.3 Analyse de la chaux libre du clinker.....	74

### Partie 03 : Résultats et Discussion

Chapitre I : Caractérisation physico-chimique des résidus solides urbains (RSU).....	75
I.1 Introduction.....	75
I.2 Ratio de production des RSU dans la commune de Chlef.....	75
I.3 Caractérisation physique des RSU.....	76
I.3.1 Le tri par taille.....	76
I.3.2 Composition des RSU en catégorie par zone et par saison au cours de deux ans.....	79
I.3.3 Comparaison de la composition moyenne des RSU de Chlef avec celle d'autres villes algériennes.....	86
I.3.4 Densité des RSU.....	87
I.3.5 Caractérisation chimique de certaines catégories des RSU par saison pendant les deux années (2018/2019-2019/2020).....	87
I.3.6 Estimation des quantités des RSU pour chaque filière de traitement.....	89
I.4 Conclusion.....	90
Chapitre II : Incinération des résidus solides urbains et caractérisation physico-chimique des mâchefers générés.....	91
II.1 Introduction.....	91
II.2 Incinération des résidus solides urbains.....	91
II.2.1 Composition en catégories des RSU.....	91
II.3 Incinération des RSU.....	92
II.4 Caractérisation des mâchefers.....	92
II.4.1 Analyse granulométrique des mâchefers.....	92
II.4.2 Caractéristiques physiques des mâchefers.....	93
II.4.3 Composition chimique des deux types des mâchefers.....	94
II.4.4 Eléments traces métalliques dans les mâchefers et les lixiviats.....	95
II.4.5 Analyse des mâchefers par DRX.....	97
II.4.6 Analyse des mâchefers par spectroscopie IRTF.....	99
II.5 Conclusion.....	100

Chapitre III. Valorisation des mâchefers comme ajout dans la fabrication du ciment.....	102
III.1 Introduction.....	102
III.2 Caractérisation de CEMI 42.5N.....	102
III.2.1 Composition chimique.....	102
III.3 Surface spécifique Blaine.....	102
III.4 Propriétés physiques des pâtes de ciment.....	103
III.5 Etalements des mortiers.....	105
III.6 Propriétés mécaniques.....	106
III.6.1 Résistances à la flexion.....	106
III.6.2 Résistances à la compression.....	108
III.7 Absorption capillaire.....	111
III.9 Caractérisation chimiques du ciment CRS utilisé.....	112
III.9.1 Composition chimique des ciments préparés.....	112
III.9.2 Surface spécifique Blaine des ciments CRS préparés.....	113
III.10 Propriétés physiques des ciments préparés.....	113
III.11 Propriétés mécaniques des mortiers.....	114
III.12 Impact de la valorisation des RSU et les mâchefers sur l'environnement.....	115
III.13 Clinkérisation.....	116
III.13.1 Caractérisation chimique des matières premières.....	116
III.13.2 Analyse chimique des crus préparés.....	117
III.13.3 Analyse chimique du clinker.....	118
III.13.4 Composition minéralogique des clinkers obtenus.....	119
III.13.5 Analyse structurale des clinkers par DRX.....	119
III.14 Conclusion.....	121
Conclusion générale.....	123
Références bibliographiques.....	127
Annexes.....	140

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction générale**

La production des résidus solides urbains (RSU) augmente chaque jour en raison de la croissance démographique, de l'évolution des modes de vie et du développement économique [1]. Les RSU sont composées de déchets putrescibles, de papiers, de cartons, de plastiques, de composites, de textiles et autres ; les proportions de ces catégories sont instables et varient en fonction des saisons, de l'économie du pays et de l'urbanisation.

En Algérie, la production des RSU a été estimée à 13,5 millions de tonnes en 2020 [2]. Plus de 160 tonnes/jour sont générées par la population de la commune de Chlef [3]. Ces déchets sont enfouis dans deux centres d'enfouissement technique (CETs Meknassa et Oum Drou) et dans des décharges sauvages. Ce traitement est considéré comme le dernier maillon de la chaîne de traitement des RSU, en raison de ses inconvénients tels que la pollution des eaux souterraines, les émissions d'odeurs et la contamination du sol [4].

L'incinération des déchets solides urbains à Chlef, qui peut être utilisée pour des applications dans la fabrication et la construction, s'avère être une alternative prometteuse, d'autant plus que Chlef est une Wilaya à vocation agricole-industrielle en Algérie. L'incinération des déchets solides urbains constitue une méthode efficace de valorisation, car elle offre la possibilité de récupérer de l'énergie tout en diminuant la masse et le volume des déchets de 70 % et 90 % respectivement [5]. Le traitement par incinération des déchets urbains engendre principalement deux types de produits solides, les mâchefers et les cendres volantes [6]. Les mâchefers sont rejetés au fond de l'incinérateur, et les cendres volantes sont produites en adsorbant les gaz de combustion et en séparant les poussières [7]. Les mâchefers sont le principal sous-produit et représentent près de 90 % de la masse totale des résidus solides générées et 20 à 30 % de la masse initiale des RSU [8]. Ils se composent de matières organiques non brûlées, de matériaux grossiers non-combustibles, tels que des pierres, du sable, du verre, de la céramique, des métaux et des cendres [6, 9]. Les mâchefers sont principalement composés d'oxydes de Si, Ca, Fe, Al, Mg, K et Na et contiennent moins de métaux lourds que les cendres volantes [10, 11].

L'application des mâchefers dans divers secteurs repose sur de nombreux facteurs tels que leur capacité à être traités, leurs performances techniques et leur impact sur l'environnement [12]. La littérature mentionne diverses utilisations des mâchefers, telles que les revêtements routiers, le béton, les verres et les céramiques, l'agriculture et la fabrication d'adsorbants [5].

Les mâchefers ont une composition chimique comparable à celle des matériaux de construction courants [13], et leur réutilisation comme une alternative partielle au ciment peut avoir des impacts positifs sur l'environnement, comme la diminution des émissions de gaz

à effet de serre, la réduction de l'extraction des matières premières non renouvelables nécessaires à la production de clinker, et une meilleure gestion des déchets générés par l'élimination de ces matières [7, 14]. La valorisation des résidus solides urbains (RSU) contribue à résoudre divers enjeux environnementaux, notamment en réduisant le volume des déchets envoyés dans les décharges, ce qui permet de limiter la production de lixiviat et de gaz à effet de serre associés à cette méthode. De plus, cela préserve les ressources naturelles non renouvelables nécessaires à la fabrication du ciment, ce qui entraîne aussi une diminution des coûts de production.

Récemment, les mâchefers ont été utilisés comme matière première pour la production du clinker [15], [16], ainsi que comme ajout dans la préparation du ciment [14], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].

Les objectifs de cette étude, intitulée « *valorisation des résidus solides par incinération comme ajout dans la fabrication du ciment et son impact sur l'environnement* », sont :

- ✓ Vérification de la possibilité de l'incinération des RSU au niveau de Chlef ;
- ✓ Etude de l'influence de la composition des RSU en amont de l'incinérateur sur les caractéristiques physiques et chimiques des mâchefers ;
- ✓ Valorisation des mâchefers d'incinération des RSU dans la fabrication du ciment à Chlef.

Cette thèse est composée de trois parties :

*-La première partie* est une synthèse bibliographique constituée de trois chapitres ; - le premier chapitre est consacré à l'identification du gisement et la composition des RSU dans les PED et en Algérie. Les filières de traitement et de valorisation des RSU sont aussi présentées ; - le deuxième chapitre présente l'étude du procédé de l'incinération des RSU et les différents fours utilisés dans le monde et les caractéristiques physiques et chimiques des mâchefers ; - le troisième chapitre est un état de l'art sur le procédé de fabrication du ciment, les types du ciment, leur classification, ainsi que leurs caractéristiques physico-mécaniques. L'effet de l'ajout des mâchefers sur les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment est aussi détaillé dans ce chapitre.

*-La deuxième partie* décrit l'ensemble des matériels et méthodes utilisés dans cette étude. Elle est divisée en trois chapitres ; -le premier présente la méthode de caractérisation des RSU ainsi que les méthodes d'analyses physiques et chimiques des RSU ; -le deuxième chapitre décrit le protocole expérimental d'incinération, les méthodes utilisés pour la caractérisation physique et chimique des mâchefers ; et -le dernier chapitre présente les protocoles de

préparation des ciments et des clinkers avec les mâchefers, ainsi que les méthodes utilisées pour étudier les propriétés physiques et mécaniques des ciments préparés.

-*La troisième partie* regroupe les résultats et leurs discussions, elle est constituée de trois chapitres :

-*Le premier chapitre* décrit les résultats de caractérisation physique et chimique des RSU de la commune de Chlef par saisons pendant deux années.

-*Le deuxième chapitre* comprend les résultats de l'incinération des RSU, ainsi que les résultats de la caractérisation physique et chimique des mâchefers générés.

-*Le troisième chapitre* est consacré aux résultats des propriétés physiques et mécaniques des ciments préparés, en ajoutant les mâchefers comme substitution du ciment portland ou clinker résistant au sulfate (CRS). Ce chapitre présente également des résultats concernant les caractéristiques chimiques et minéralogiques des clinkers fabriqués à partir des mâchefers, utilisés en tant que matière secondaire correctrice au cru.

Pour conclure, cette recherche présente une synthèse de l'ensemble des résultats obtenus et évoque certaines perspectives futures.

**PARTIE 01**  
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **Chapitre I : Généralités sur les résidus solides urbains et leur gestion**

### **I.1 Introduction**

Les étapes de la gestion des résidus solides urbains comprennent : la collecte et le transport, le tri et le transport ; recyclage et réutilisation. La caractérisation physico-chimique consiste à acquérir une base de données sur ces derniers qui facilite le choix de la méthode du traitement des déchets et donc préserve l'environnement (eau, sol et atmosphère).

Plusieurs approches de valorisation des résidus solides urbains (RSU) sont utilisées à travers le monde pour traiter les RSU, telles que la valorisation énergétique par incinération et méthanisation, ainsi que leur transformation en amendement organique par compostage. La mise en décharge est considérée comme une dernière option de traitement en raison de ses inconvénients tels que la pollution des eaux souterraines, les émissions d'odeurs et la contamination du sol.

Ce chapitre se focalise donc sur la présentation du gisement des RSU, leur composition et leurs caractéristiques physico-chimiques. Ainsi que les différentes méthodes d'élimination et valorisation de ces résidus.

### **I.2 Définitions**

Le mot déchet est signifié toute chose tangible qu'une personne utilise dans sa vie quotidienne et veut ensuite s'en débarrasser lorsqu'elle en profite, alors elle la jette. En raison du développement technologique et du changement de mode de vie des populations, cette définition présente une vision dévalorisante du déchet, ce qui ne correspond pas à la réalité.

De plus, le développement des unités de valorisation nécessite une définition plus réaliste [3].

Au sens de la loi algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001(Article3),

***Le terme déchet** est défini comme « Tout résidu issu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer».*

***Le terme déchets ménagers et assimilés** est défini comme «Tous déchets issus des ménages ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, commerciales, artisanales, et autres qui, par leur nature et leur composition sont assimilables aux déchets ménagers».*

### **I.3 Production des résidus solides urbains dans le monde et en Algérie**

Le ratio (kg/hab/jour) de production des déchets est en continuelle augmentation avec la croissance de l'urbanisation et les changements des modes de vie de la population dans tous

les pays du monde. La détermination de la quantité de résidus solides produits est une étape essentielle à la planification du système de gestion des déchets afin de prévoir le dimensionnement de la collecte et les filières de traitement [3], [24], [25]. Le tableau I.1 regroupe le ratio de production de RSU dans certains pays dans le monde selon plusieurs études [2], [26], [27], [28], [29], [30] , le ratio de production des RSU varie d'un pays à l'autre et d'une ville à l'autre et cela dépend de la population.

**Tableau I.1** : Ratio de production des RSU dans le monde.

Pays (ville)	Ratio de production (kg/hab/j)
Ghana [26]	0.20-0.80
Iran (Tabriz) [27]	0.4-5
Espagne (Asturies) [28]	1.4
Togo (Lomé) [29]	0,91
Algérie [2]	0,80
Maroc [30]	0.76

#### **I.4 Composition des résidus solides urbains**

Les résidus solides urbains forment un mélange diversifié de matériaux présentant des caractéristiques physiques et chimiques très variées. La composition est déterminée par la nature des produits et de leurs emballages, ainsi que par les pratiques de consommation [25].

#### **I.5 Caractérisation des résidus solides urbains**

##### **I.5.1 Composition physique**

La méthode de caractérisation des ordures ménagères (MODECOM, 1993) est la plus répandue à l'échelle mondiale. Cette dernière repose sur l'échantillonnage et le tri manuel des RSU pour une zone ou un secteur spécifique [31]. Le protocole MODECOM préconise les principales catégories de déchets tels que les putrescibles, le papier, le carton, les textiles, les textiles sanitaires, les plastiques, les combustibles non classés, le verre, les métaux, les combustibles non classés, les déchets spéciaux et les déchets fins [3].

D'après diverses études bibliographiques [26], [27], [28], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], la composition des RSU diffère d'un pays à l'autre, d'une région à l'autre et même d'un quartier à l'autre [25].

Le tableau I.2 récapitule la composition physique en % en catégories des RSU dans le monde.

**Tableau I.2** : Composition physique en % en catégories de RSU dans le monde.

Pays (Ville)	Putrescible	Papier Carton	Plastique	Métaux	Textiles	Textiles sanitaires	Verre	Autre
Algérie (Mostaganem) [32]	65.5	13	7	3.5	3	/	4	4
Algérie (Blida)[33]	55	8	18	2	3	10	1	3
Algérie (Ouargla)[34]	48.53	6.82	16.57	2.76	3.34	14.65	/	5.29
Algérie (Jijel) [34]	58.5	6.22	14.4	/	2.62	11.6	/	0.46-1.37
Arabie Saoudite (Makkah) [35]	48	20	25	4	1	/	2	1
Ghana [26]	61	5	14	3	2	/	3	12
India (Guwahati)[36]	44.16	13.99	24.26	00	4.21	/	2.69	12.52
Iran [27]	67	8	5	4	/	/	3	13
Egypte [37]	58.85	4.48	11.26	2.92	1.99	/	4	16.46
Palestine (Nablus)[38]	68.3	14.3	11	4.1	4.2	/	3.4	7.8
Kuwait [39]	44.02	6.8	18.34	4.5	/	6.3	6.3	12.9
Espagne (Asturias)[28]	38.11	20.57	10.83	3.56	10.86	/	5.58	10.49
Asia [40]	46.3	12.8	15.2	1.9	3.7	5.9	4.9	9.2
Tunisie [41]	66	8	8	2	5	/	1	10
France [42]	31	8	12	3.5	3	11	6	20

### **I.5.2 Caractéristiques physico-chimiques**

#### **a. Densité**

La fluctuation de la densité des résidus est principalement influencée par la localisation géographique, la composition des RSU en catégories, la saison et la durée de stockage [31].

Il est primordial de posséder sa connaissance afin de décider des méthodes de collecte des résidus et de les traiter [43].

Dans les PED, la densité est habituellement comprise entre 0,3 et 0,5. Elle dépasse largement celle des résidus des pays industrialisés (environ 0,1) en raison de [43] :

- L'importance des matières organiques fermentescibles dans les RSU ;
- La teneur élevée en eau des RSU, en particulier pendant la saison des pluies ;
- La présence de catégories lourds telles que les graviers, les cailloux, les piles, etc.

Les densités des RSU déterminées par les chercheurs dans certains pays du monde sont regroupées dans le tableau I.3 [26], [27], [30], [32], [38], [44]. La densité varie entre 154 à 530 Kg/m<sup>3</sup>, elle varie en fonction de la composition des RSU en catégorie ainsi que leur humidité, c'est-à-dire plus les RSU sont humides plus la densité se rapproche de 1 T/m<sup>3</sup> [3].

**Tableau I.3 :** Densités des RSU dans certains pays du monde.

Pays (ville)	Densité ( kg/m <sup>3</sup> )
Ghana [26]	530
Iran(Tabriz) [27]	252
Palestine(Nablus) [38]	240
Algérie (Mostaganem) [32]	340
Vietnam (Da Nang ) [44]	154-273
Maroc [30]	400
France (Guadeloupe) [45]	227

**b. Le taux de l'humidité (% H)**

Le pourcentage de l'humidité désigne la quantité d'eau présente dans les RSU. Elle joue un rôle essentiel dans la détermination des conditions d'exploitation d'une décharge, du taux de dégradation d'un déchet ou le choix de la méthode de son traitement et valorisation (compostage, méthanisation et/ou incinération) [31].

La variation du taux d'humidité dépend du pays, de la composition des RSU et de la saison. Elle est principalement influencée par la quantité de putrescibles présents dans les RSU, en raison de leur concentration élevée en eau [46]. Le tableau I.4 répertorie l'humidité des RSU de différents pays selon les études effectués [26], [27], [28], [32], [36], [37], [44]. Le taux d'humidité oscille entre 25 à 76 %, il dépend de la saison et la composition des RSU.

**Tableau I.4 :** Humidité des RSU.

Pays (ville)	Humidité (%)
Ghana [26]	25-76
Egypte [37]	47.68
Espagne (Asturias) [28]	30
Iran [27]	72.0
Vietnam (Da Nang) [44]	42-67
India (Guwahati) [36]	43-58

Algérie (Mostaganem) [32]	57
Maroc [30]	65

**c. Le pourcentage de la Matière Solide Volatile (% MSV)**

La matière solide volatile (MSV) représente la fraction volatile obtenus après calcination de la matière organique des RSU à 550 °C .La connaissance du taux de la matière solide volatile permet le choix de la méthode de traitement des RSU, une valeur élevée du % MSV, indique une valorisation des RSU par incinération. Tandis qu'une valeur faible du pourcentage de la MSV prouve une valorisation des RSU par compostage et/ou par méthanisation [25], [31]. Le tableau I.5 représente le % de la matière solide volatile des RSU dans quelques pays [26], [28], [30], [36], [41]. Le pourcentage de la matière solide volatile varie entre 31 à 88 %, plus la proportion des déchets organiques (putrescible, papier, carton, plastique) est importante plus la teneur en matière solide volatile est élevé.

Tableau I.5 : Matière solide volatile des RSU.

Pays (ville)	% MSV
Ghana [26]	31–88
Espagne(Asturias) [28]	70
India(Guwahati) [36]	32-58
Algérie (Mostaganem) [32]	62,2
Maroc [30]	70

**Le pouvoir calorifique inferieur (PCI)**

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un déchet représente la quantité de chaleur générée par la combustion complète de l'unité de masse du combustible à l'état sec dans des conditions de température et de pression de référence spécifiques. Grâce à sa détermination, on peut envisager une éventuelle incinération des RSU. Le taux d'humidité et le PCI sont inversement liés, plus la teneur en eau des RSU est élevée, plus leur PCI est faible [3].

En comparaison avec les pays industrialisés, les RSU des PED présentent des PCI faibles (<1000 mth/kg) en raison de leurs faibles concentrations en matières cellulosiques et plastiques, ainsi que de leurs taux d'humidité élevés [43]. Les différents PCI des RSU dans quelques pays dans le monde sont classés dans le tableau I.6 [27], [28], [30], [32], [36], [37], [44].

**Tableau I.6 : Pouvoir calorifique inférieur des RSU.**

Pays (ville)	PCI
Egypte [37]	18.65 MJ/kJ
Espagne (Asturias) [28]	10,744 MJ/kg
Iran (Tabriz) [27]	14.2 MJ/kJ
Vietnam (Da Nang) [44]	14-17 kJ/kg
India(Guwahati) [36]	1203-3015 kcal/kg
Algérie (Mostaganem) [32]	1430 kcal/kg
Maroc [30]	< 1000 kcal/kg

**d. Les éléments trace métalliques**

Il est essentiel de connaître la concentration de métaux présents dans les RSU afin d'évaluer leur potentiel polluant et de prendre les mesures appropriées pour réduire leur impact sur la santé des populations et l'environnement. Les métaux présents dans les RSU sont principalement issus de l'industrie (piles, aérosols, ustensiles de cuisine, peintures, encre, composants électroniques, etc.) ou de l'emballage de divers produits (boîtes de conserve, briques de lait et de jus, papier, carton, plastiques, etc.) [47]. Les éléments métalliques trouvés dans les RSU de certains pays sont illustrés dans le tableau I.7 [33], [45], [48], [49].

**Tableau I.7 : Les éléments traces métalliques (mg/kg).**

Pays (villes)	Algérie (Blida) [33]	France [45]	Tunisie [48]	Togo (Lomé) [49]
Pb	22.65	23,15	147.7	650.0
As	<1	3,03	/	/
Cd	0.29	0,91	10	5.3
Ni	5.73	14,88	47.4	39.8
Hg	0.18	1,86	/	/
Cr	/	23,75	95.2	/
Cu	/	105,68	67.2	504.0
Fe	/	/	288	/
Mn	/	/	/	/
Zn	/	125,99	352.6	577.5

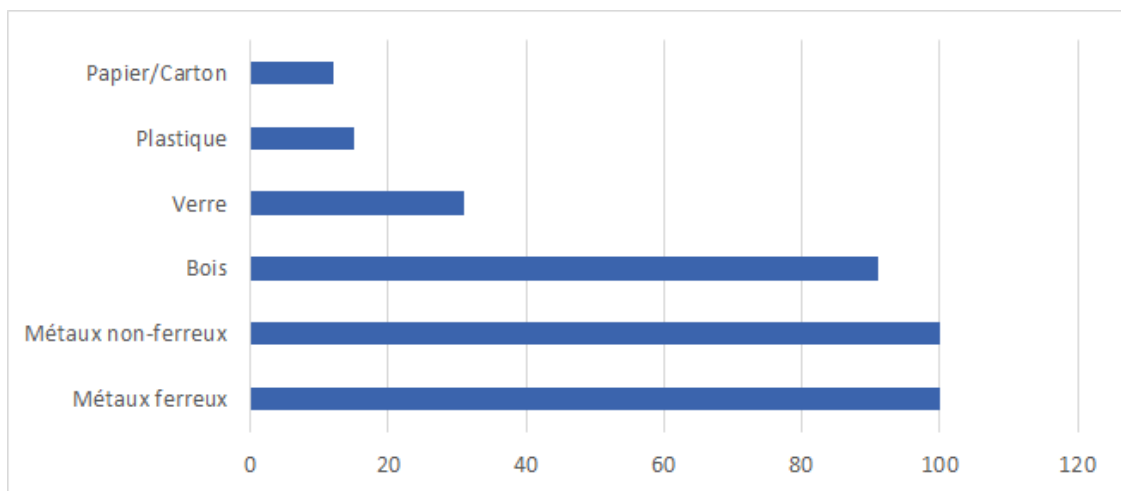
## **I.6 Les modes de gestion des RSU**

### **I.6.1 Recyclage**

L'objectif du réemploi des RSU est d'assurer une utilisation prolongée des matières recyclables dans l'industrie économique afin de diminuer la consommation de matières premières [31]. Le produit fabriqué à partir du recyclage ne présentera pas les mêmes caractéristiques que le produit original, mais il sera utilisé comme un substitut moins coûteux [50].

Le recyclage des RSU est le plus répandu en Allemagne (45 % des déchets traités), en Belgique (40 %), en Slovénie (39 %), en Suède (36 %), en Irlande (35 %) et aux Pays-Bas (33 %) [51].

En Algérie, les matériaux recyclés comprennent du papier, du carton, du plastique, du bois, des métaux ferreux et non ferreux. Les matériaux recyclés peuvent être utilisés soit comme matière secondaire dans une usine de production, soit transformés en produit fini par des opérateurs privés. La figure I.1 illustre le taux de valorisation des déchets recyclables [2].



**Figure I.1:** Taux des RSU recyclables [2].

Selon la figure I.1, on remarque que le taux de recyclage de métaux ferreux et non ferreux est de 100 %, le bois est de 91 %, le verre est de 31 %, le plastique est de 15 %, ainsi que le papier/carton est de 12 %.

### **I.6.2 Incinération**

L'incinération consiste à brûler les déchets à une température élevée (entre 850°C et 1000°C). Elle aide à éliminer de nombreuses toxines et agents pathogènes présents dans les déchets ménagers et dangereux. Le traitement sanitaire des déchets, la réduction de volume (90 %) et

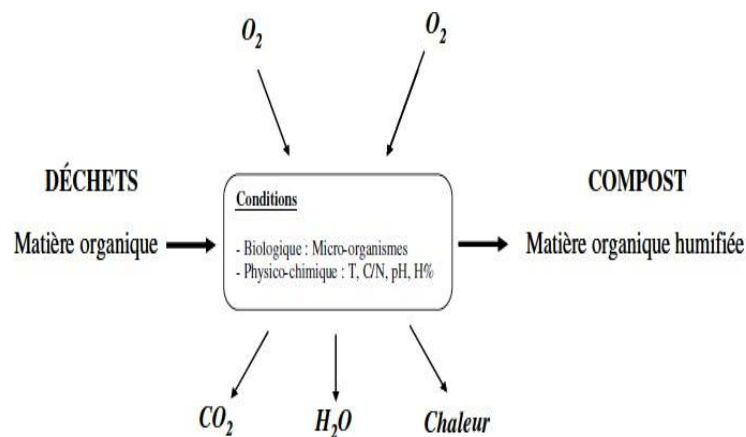
de masse (70 %) et la récupération d'énergie sont les trois fonctions principales de l'incinérateur. Cependant, les techniques d'incinération ont la capacité de produire divers polluants tels que les gaz acides, les métaux lourds, les particules et les composés organiques [52].

En Algérie, seuls les déchets industriels et les déchets d'activités de soins sont traités par incinération. A titre d'exemples : les centres d'incinération Green Sky à Chlef et à Blida.

### **I.6.3 Compostage**

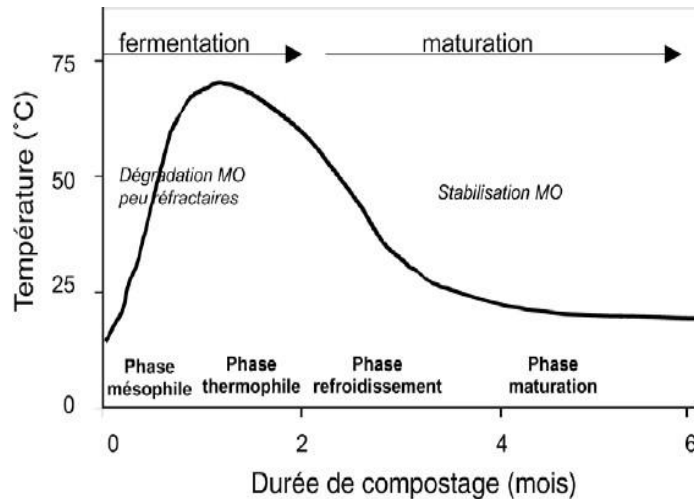
Selon Franco (2003) et Remy (2007), le compostage est défini comme un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en conditions aérobies, entraînant une montée en température, et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée. Le produit ainsi obtenu est appelé compost [53], [54].

Le compostage est un mode de traitement biologique aérobie des déchets biodégradables, au cours duquel la matière organique contenue dans les déchets est dégradée par les micro-organismes, les virus...etc. Les germes pathogènes sont détruits par les températures élevées engendré au cours du procédé. Le principe de la méthode est schématisé dans la figure I.2 [25].



**Figure I.2** : Processus de compostage [25].

En fonction du temps et après quelques mois, la décomposition naturelle des déchets organiques en un produit final qui est le compost, passe par plusieurs phases qui sont : la phase mésophile, la phase thermophile, la phase de refroidissement, et la phase de maturation. La dégradation et la stabilisation de la matière organique au cours de ces phases est suivie d'une augmentation et d'une diminution de la température (Figure I.3). Le compost produit est couramment utilisé comme un fertilisant [25].



**Figure I.3 :** Courbe théorique d'évolution de la température au cours du compostage [54].

Les pays membres avec les taux de compostage des bio-déchets les plus élevés sont l'Autriche (40 %), les Pays-Bas (28 %), la Belgique (22 %), le Luxembourg (20 %), le Danemark (19 %) et l'Espagne (18 %) [51].

En Algérie, trois installations de compostage (Figure I.4), avec une capacité de 10 tonnes par jour, sont en cours de réalisation (Mascara, Bel Abbes et Mostaganem), dans le cadre du projet d'Appui à la gestion intégrée des déchets (AGID) qui rassemble le Ministère de l'Environnement et la direction de coopération Belge. L'alimentation de ces unités sera assurée par les déchets verts et les déchets organiques provenant des marchés et des trois centres de tri mis en place dans le cadre du même projet [2].



**Figure I.4 :** Construction de plusieurs andains de compost - Wilaya de Mostaganem et Sidi Bel Abbes [2].

#### **I.6.4 Méthanisation**

La méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus de traitement qui se déroule sans oxygène. Elle implique la transformation de la matière organique dans un environnement à

basse température en un biogaz principalement composé de méthane et de gaz carbonique grâce à l'intervention d'un groupe microbien [55].

#### **I.6.5 Mise en décharge contrôlée (l'enfouissement technique)**

La méthode la plus fréquemment utilisée pour se débarrasser des déchets est le site d'enfouissement. Historiquement, les décharges étaient des trous dans le sol où les déchets étaient jetés et abandonnés, ce qui leur donne le nom de décharges sauvages. En raison de ces derniers, des substances polluantes telles que les métaux lourds et les substances toxiques peuvent aisément entrer dans le sol et contaminer d'autres éléments de l'environnement tels que l'eau, l'air ou la biosphère. De nos jours, les sites d'enfouissement rassemblent de vastes installations modernes protégées par des isolations et disposent de systèmes de collecte pour les liquides et les gaz qui s'échappent du corps d'enfouissement [51].

Il existe trois classes de mise en décharge [56]:

Classe I: déchets industriels spéciaux et déchets ultimes ;

Classe II: déchets municipaux et déchets industriels ;

Classe III: déchets inertes.

Actuellement, en Algérie, on compte 191 centres d'enfouissements techniques (CETs) de diverses classes [57].

La wilaya de Chlef dispose de trois (03) centres d'enfouissements techniques et d'une décharge contrôlée, à savoir :

- CET de Mekkassa, situé au niveau de la commune d'Oued Sly, pouvant traiter 596 000 m<sup>3</sup>/an ;
- CET de Mnasseria, situé au niveau de la commune d'Oum Drou, pouvant traiter 500 000 m<sup>3</sup>/an ;
- C.E.T de Ténès, pouvant traiter 350 000 m<sup>3</sup>/an ;
- Décharge contrôlée de Zeboudja, pouvant traiter 420 000 m<sup>3</sup>/an.

Le C.E.T de Ténès n'est pas encore en service en raison d'un manque d'aménagement de l'accès. Ces installations de traitement des déchets ne couvrent que 19 communes parmi les 35 communes de la wilaya de Chlef. Tandis que, quatre communes côtières comme (Beni Haoua, Oued Goussine, Dahra et El-Marssa) ne disposent pas de décharges contrôlées. Il est important de noter que la wilaya génère environ 395 996, 09 tonnes/an, et seulement 107 784, 86 tonnes/an sont traitées dans ces installations et une quantité de 288 211,23 tonnes sont proliférés dans le milieu naturel [58].

### **I.7 Conclusion**

Le choix d'une méthode adaptée pour le traitement des RSUs se confie sur la connaissance de leur composition physique et leurs caractéristiques chimiques (% Humidité, % Matière Organique, pH et le PCI). En Algérie, les travaux scientifiques [3], [32], [33], [50] réalisés en matière de caractérisation chimique montrent que les RSU comme les putrescibles, les papiers, les cartons et la matière fine, sont riches en matière organique qui peut être transformé en énergie, si on traite ces résidus thermiquement.

L'incinération est une nouvelle méthode de traitement dans les pays en développement par rapport aux pays développés, cette méthode permet la réduction de grandes quantités des RSU enfouis et produit de l'énergie et de la matière inerte recyclable. Ce mode de traitement sera développé dans le chapitre II.

## **Chapitre II: L'incinération des résidus solides urbains (RSU) et les mâchefers générés**

### **II.1 Introduction**

Aujourd'hui, l'incinération occupe la deuxième place dans le traitement des RSU dans les pays développés, après la mise en décharge. L'incinération est un processus thermique qui convient à toutes les catégories de déchets (dangereux et non dangereux, solides ou liquides) [51]. Ce processus de traitement entraîne la génération de divers résidus, dont les mâchefers.

Le présent chapitre se concentre sur la description du processus d'incinération des RSU, ainsi que sur les divers fours couramment employés.

Dans ce chapitre, Les caractéristiques des mâchefers d'incinération et les techniques de prétraitement de ces derniers sont décrits en détail.

### **II.2 Facteurs influençant le processus d'incinération**

Les principaux facteurs qui influencent le processus d'incinération sont : les caractéristiques physico-chimiques des RSU, ainsi que d'autres facteurs tels que : le temps de séjours, la température, la turbulence et le coefficient d'excès d'air. Ces facteurs sont appelés « 3T-1E » et constituent un des principaux paramètres de contrôle de la conception et du fonctionnement de l'incinérateur [59].

#### **II.2.1 Qualité des déchets incinérés**

Les caractéristiques essentielles des RSU telles que la taille, la composition, l'humidité et le pouvoir calorifique ont l'impact sur leur combustion. Le pouvoir calorifique des déchets diffère en fonction de leur origine et de leur humidité [60].

#### **II.2.2 Température**

Au-dessus de la couche de déchets la plus proche de la flamme, la température peut généralement atteindre 850°C à 1000°C, ce qui est la plus élevée dans l'incinérateur. L'augmentation de la température d'incinération entraîne une combustion complète et une élimination efficace des polluants de type dioxine [59].

#### **II.2.3 Temps de séjour**

On calcule ce paramètre afin de procéder à la combustion complète des déchets. La relation  $T = V/Q$  permet de calculer le temps de séjour moyen, avec V représentant le volume de la chambre de combustion et Q représentant le débit en volume de gaz généré par la quantité de déchets incinérés [61].

## **II.2.4 Turbulence**

La turbulence est un indicateur de l'homogénéité d'un mélange de déchets et d'air. Le degré de turbulence augmente lorsque la quantité d'air de combustion augmente lors de l'incinération [59].

## **II.2.5 Coefficient d'excès d'air**

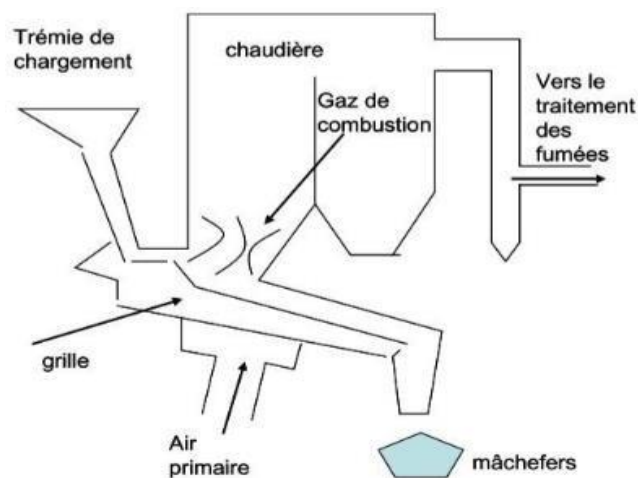
Les particules solides ne parviennent pas à former un mélange optimal avec l'air dans la chambre d'incinération. Il est donc nécessaire d'avoir un apport d'air réel beaucoup plus élevé qu'en théorie afin d'assurer une combustion complète des déchets. Le coefficient d'excès d'air est le rapport entre l'apport réel d'air et l'apport théorique d'air. Si le coefficient d'excès d'air de combustion est excessif, la température dans l'incinérateur diminuera et l'incinération des déchets sera impactée [59].

## **II.3 Types de fours d'incinération**

Pour assurer une combustion totale des déchets, il est essentiel de sélectionner un four adapté aux caractéristiques des déchets (humidité, PCI). De nombreux types de fours ont été développés pour l'incinération des déchets, tels que les fours à grilles, les fours rotatifs et les fours à lit fluidisés.

### **II.3.1 Le four à grille**

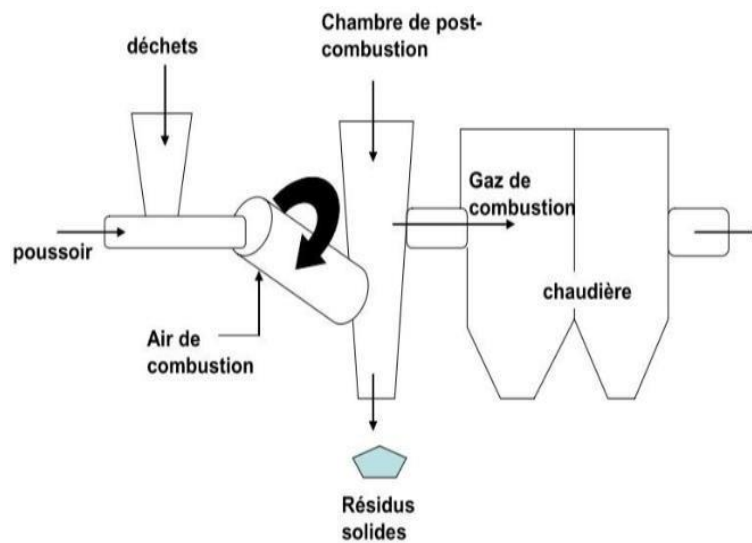
C'est le four le plus utilisé pour l'incinération des quantités importantes des RSU de faible PCI (figure II.1). Les déchets sont introduites sur des grilles étagées qui peuvent être multiples (marches d'escaliers animées de mouvement de va et vient, rouleaux, etc.)[61], Les grilles favorisent la progression et le brassage des déchets ainsi que leur alimentation en comburant [62]. La grille peut être subdivisée en quatre zones correspondant aux différentes étapes de combustion (séchage, allumage, combustion, finition) [61].



**Figure II.1** : four à grille [61].

### II.3.2 Le four rotatif

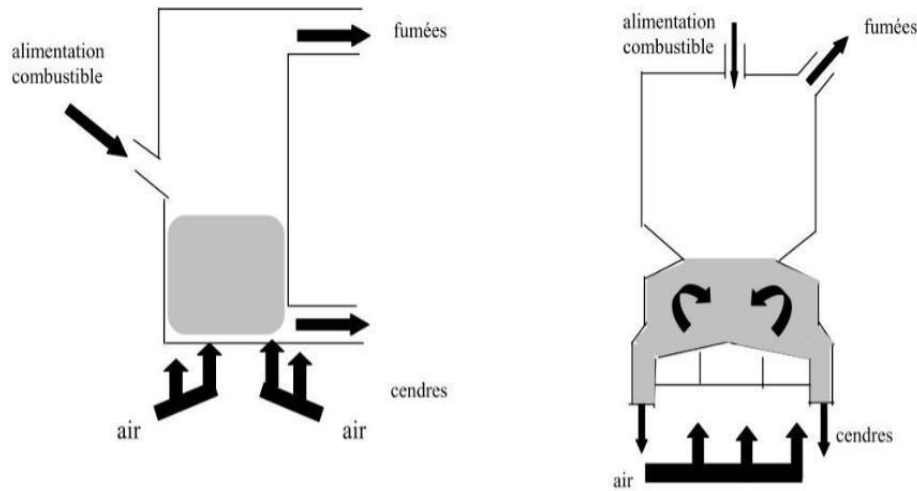
Il s'agit d'un four composé d'un cylindre incliné par rapport à l'horizontale dans lequel les déchets se déplacent en rotation (figure II.2) [60]. La rotation facilite l'avancement et le mélange des matières solides avec le comburant, garantissant ainsi une combustion optimale. Ces fours offrent la possibilité d'incinération de déchets solides, liquides et de boues avec un PCI fort ou faible [61], [62]. Le four rotatif est également équipé d'une chambre post-combustion qui permet d'oxyder les gaz produits par la combustion des déchets [61].



**Figure II.2** : four rotatif [61].

### II.3.3 Le four à lit fluidisé

Un four à lit fluidisé (figure II.3) est un four cylindrique vertical fermé renferme un lit de sable très chaud (entre 750°C et 800°C) qui est maintenu en suspension par un courant d'air ascendant injecté à sa base par une grille de répartition. On injecte les déchets directement dans le lit lui-même ou on les introduit dans le haut du four. La fluidité du lit et l'apport nécessaire à la combustion doivent être assurés par le débit d'air. Ce type de fours est couramment employé dans les industries pétrolières et de papier pour traiter leurs résidus [56]. Les fours à lits fluidisés sont classés en trois catégories : les fours à lits fluidisés denses, les fours à lits fluidisés rotatifs et les fours à lits fluidisés circulants. La distinction entre ces technologies réside dans la façon et la vitesse à laquelle l'air est introduit dans le four. La technologie de lit fluidisé permet une combustion améliorée des déchets, ce qui entraîne un taux de matières imbrûlées réduit [63].



**Figure II.3** : Four à lit fluidisé [61].

## II.4 Les différentes étapes de l'incinération

### II.4.1 Séchage

Le séchage des RSU consiste à vaporiser l'eau attachée et l'eau inhérente grâce à la chaleur de la chambre de combustion. On peut classer le processus de séchage en trois catégories : le séchage par conduction, le séchage par convection et le séchage par rayonnement produit par transfert de chaleur [59]. Le rayonnement des parois du four et des flammes, l'échange convectif avec l'air primaire préchauffé et l'échange direct par conduction des solides en combustion sont tous des sources d'énergie [60]. L'augmentation de la teneur en eau des RSU entraîne une phase de séchage plus longue et une consommation d'énergie thermique plus élevée [59].

### II.4.2 Pyrolyse

Le processus de pyrolyse consiste à décomposer et à volatiliser les substances combustibles présentes dans les déchets. En raison de la température élevée, cette étape produit différents hydrocarbures volatils, des composés chlorés (HCl), soufrés et azotés (pyridine, pyrroles, amines) ainsi que des produits de séquestration du carbone [60]. Les réactions endothermiques et exothermiques sont responsables de la décomposition thermique. La vitesse à laquelle les déchets se décomposent thermiquement est influencée par la composition des déchets en composants combustibles, le taux de transfert de chaleur, la masse et la taille des particules des solides organiques [59].

### II.4.3 Combustion

Dans l'incinérateur, à une température élevée et en contact avec l'air, les substances combustibles gazeuses et solides générées par le séchage et la décomposition thermique se transforment en flammes et commencent à se brûler. Donc, l'incinération des RSU est un

processus combinant la combustion hétérogène et la combustion en phase gazeuse, et elle est plus complexe que la combustion de combustibles gazeux et de combustibles liquides [59].

## **II.5 Sous-produits de l'incinération**

### **II.5.1 Les résidus liquides et gazeux**

Les déchets liquides de l'incinération sont constitués de l'eau destinée au traitement des fumées et à l'extinction des mâchefers. Les effluents gazeux comprennent les fumées générées par l'incinération, telles que les hydrocarbures, le dioxyde de carbone, les dérivés halogénés de type chlorure d'hydrogène (HCl) ou soufrés tels que le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), ainsi que d'autres gaz toxiques tels que les NO<sub>x</sub> [60], [62].

### **II.5.2 Les résidus solides**

Trois types de résidus solides sont présents dans la majorité des incinérateurs : les mâchefers, les cendres volantes et les résidus d'épuration des fumées [62].

**Les mâchefers** : représentent environ 90 % du résidu en masse, ce qui correspond habituellement à environ 20 à 30 % des déchets d'origine en masse, et environ 10 % en volume [64]. Elles sont constituées de substances organiques non combustibles, de matériaux grossiers non combustibles tels que des pierres, du sable, du verre, de la céramique, des métaux et des cendres [65].

**Les cendres volantes** : sont des particules fines entraîné par le courant gazeux [62], elles sont éliminées dans un filtre préliminaire avant le processus de neutralisation des effluents gazeux [65].

**Les résidus d'épuration des fumées** : Leur composition varie en fonction du dispositif d'épuration employé. Ils contiennent tous les polluants présents dans les fumées et les résidus de leur neutralisation [62].

## **II.6 Caractéristiques physico-chimiques des mâchefers d'incinération des RSU (MIRSU)**

### **II.6.1 Humidité**

En aval du four d'incinération, les mâchefers peuvent être refroidis par voie sèche par l'air ou bien par voie humide par l'eau. La teneur en eau indiquée dans la littérature est de l'ordre de 16 à 30 % [22], [66], [67].

### **II.6.2 Masse volumique**

D'après la littérature, la masse volumique apparente des mâchefers est de l'ordre de 0.56 à 2.84 g/cm<sup>3</sup> [66], [68].

### **II.6.3 Perte au feu**

La perte au feu est un paramètre important pour estimer l'efficacité de la combustion des RSU. Les mâchefers sont issues de la fraction qui a été pyrolysée et non pas de la fraction

qui a été brûlée, en raison du temps de séjour insuffisant ou de la protection de la flamme par d'autres éléments [61]. D'après les recherches effectuées, la perte au feu des mâchefers est de l'ordre de 9 à 30 % [22], [69], [70].

#### **II.6.4 Potentiel en hydrogène (pH)**

Les mâchefers ont un pH naturel basique qui varie de 11 à 12, 5 à la sortie du four. Le contact des mâchefers avec de l'eau déminéralisée entraîne une alcalinité qui est principalement causée par la présence de portlandite (hydroxyde de calcium), produit de l'hydrolyse de la chaux vive, ainsi que par la présence des composés de type ettringite [61].

#### **II.6.5 Granulométrie**

La répartition granulométrique des mâchefers est un élément essentiel pour évaluer la capacité du mâchefer à être compacté et utilisé en remplacement des granulats. Lorsqu'un mâchefer sort de l'incinérateur, la fraction granulométrique la plus importante est généralement comprise entre 0 et 40 mm [56].

- Plus de 20 % de la masse du mâchefer est constituée de particules de plus de 10 cm de diamètre, principalement composées de métaux ferreux et non ferreux, de scories et de matériaux de construction [56]. La part des particules de diamètre inférieur à 10 cm est uniforme et comprend plus de 10 % de fines (< 2 cm) [56].

#### **II.6.6 Composition Minéralogique**

Les propriétés minéralogiques des mâchefers varient en fonction de la composition des déchets à l'état brut (catégories), des conditions d'incinération (type de four, température de combustion, temps de séjour, excès d'air) et du refroidissement des mâchefers à la sortie du four (utilisation d'air ou d'eau) [71]. Les MIRSU sont généralement composés de trois types de minéraux, comme le révèle l'étude minéralogique [63] :

- 1) Les minéraux qui se trouvent dans les déchets incinérés et qui ne sont pas altérés par l'incinération ;
- 2) Les minéraux qui se forment lors de l'incinération ;
- 3) Les minéraux qui se forment dès la sortie du four, pendant le refroidissement ou se développent pendant la maturation.

Les silicates, les oxydes et les aluminates se forment dans l'incinérateur à des températures élevées. Lors de la trempe des MIRSU à la sortie du four, les hydroxydes se forment suite à l'hydratation de la chaux. À des températures basses, les carbonates et les chlorures se forment dès la sortie du four [56]. Les différentes phases minéralogiques trouvées dans la littérature sont présentées dans le tableau II.1.

**Tableau II.1** : Phases minéralogiques des mâchefers.

Familles	Phases	Formules chimique	Références
Silicates	Alite	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	[56]
	Larnite	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	[56]
	Quartz	$\text{SiO}_2$	[72], [73]
	Gehlenite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	[72], [74]
	Melilite	$(\text{Ca},\text{Na})_2(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_7$	[75]
	Clinoenstatite	$\text{MgSiO}_3$	[76]
	Akermanite	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	[73]
	Pseudowollastonite	$\text{CaSiO}_3$	[72], [73]
Carbonates	Calcite	$\text{CaCO}_3$	[72], [73], [74]
Oxydes	Hématite	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	[72]
	Magnétite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	[72], [73]
Aluminates	Brownmillerite	$\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_5$	[77]
	Tricalciumaluminate	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	[78]
Sulfates	Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$	[74]
	Anhydrite	$\text{CaSO}_4$	[72], [74]
	Gypse	$\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$	[72]
Hydroxydes	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	[74]
Chlorures	Halite	$\text{NaCl}$	[79]
	Sylvite	$\text{KCl}$	[80]
	Hydrocalumite	$\text{Ca}_8\text{Al}_4(\text{OH})_{24}(\text{CO}_3)\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_{9,6}$	[73]

### II.6.7 Composition chimique

Le tableau II.2 récapitule les résultats de la composition chimique des MIRSU en oxydes obtenus par plusieurs auteurs [14], [22], [69], [70], [81], [82], [83]. D'après ces résultats, on remarque que les MIRSU contiennent une proportion majoritaire de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [84]. Le silicium est principalement issu du verre et des faïences présents dans les RSU. Le calcium est obtenu à partir des déchets alimentaires et du papier, ou  $\text{CaCO}_3$  est fréquemment employé comme additif. Le fer et l'aluminium sont issus des objets métalliques tels que les boîtes de conserves, etc. [61].

**Tableau II.2** : Composition chimique des MIRSU.

Oxydes (%)	J. Xiang [81]	Ana Mafalda (2022) (<11.2mm) [14]	V.caprai (2019) (0.04–0.250 mm) [69]	X. Gao (2017) (<2mm) [82]	Pei Tang (2016) (<2mm) [22]	Boyu Chen (2020) 4-11mm [83]	V.capri (2018) (<4mm) [70]
SiO <sub>2</sub>	23.34	52.21	10.16	19.122	35.98	38.79	22.9
CaO	40.56	14.71	29.63	43.115	19.34	10.75	22.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.92	7.58	7.19	12.037	9.00	7.15	8.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.40	6.04	6.53	9.313	11.54	28.77	13.1
MgO	2.79	2.83	1.67	2.116	1.81	1.79	2.1
Na <sub>2</sub> O	3.31	3.30	0.93	2.359	1.35	3.27	/
K <sub>2</sub> O	1.43	1.78	1.08	0.848	1.15	0.51	1.2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.30	2.19	1.11	2.625	1.02	/	1.8
SO <sub>3</sub>	4.63	0.41	5.99	2.393	4.95	0.60	3.3
Cl	3.15	0.097	1.78	0.166	0.66	0.22	1
PAF	2.14	8.24	30.00	/	9.99	2.4	18.5

### II.6.8 Eléments métalliques

En général, les MIRSU contiennent des métaux lourds tels que l'arsenic (As), le baryum (Ba), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le molybdène (Mo), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn), l'antimoine (Sb), le sélénium (Se) et le zinc (Zn). Le changement de la composition des RSU en amont ou des paramètres de fonctionnement de l'incinérateur peut avoir un impact sur la présence de ces métaux [85]. Le tableau II.3 récapitule les concentrations en métaux lourds dans les MIRSU trouvés par plusieurs chercheurs [19], [79], [86].

**Tableau II.3** : Eléments traces métalliques des mâchefers.

Elements	D.Shi (2018) (mg/kg) [86] CBA	D.Shi (2018) (mg/kg) [86] MBA	Zhenzhou yang(2018) (mg/kg) [19]	Zhitao Chen, (2017) (mg/kg) [79]
V	ND	ND	19.7	28.6

Cr	221	238	127	474
Mn	768	744	467	1098
Co	ND	ND	5	97.2
Ni	ND	ND	16	475
Cu	273	289	206	3481
Zn	1406	1527	418	5564
As	ND	ND	96	20.8
Cd	0.67	0.71	ND	ND
Sb	ND	ND	ND	188
Pb	283	321	37	1931
Ba	ND	ND	997	ND
Sn	ND	ND	57	217

### **II.6.9 Caractéristiques environnementales (lixiviation)**

Pour assurer la sécurité de l'élimination et de la valorisation des mâchefers, une législation environnementale a été mise en place en fonction des conditions propres aux différents pays. La législation propose des recommandations pour l'élimination et la valorisation en se basant sur les caractéristiques de lixiviation des mâchefers étudiés, et les divers tests de lixiviation sont utilisés en conséquence. En général, les principes de la législation environnementale portent sur la préservation de l'eau, du sol ou sur la diminution de la quantité de déchets, etc. Par exemple, les MIRSUs sont classés en inerte, non dangereux et dangereux selon la législation européenne (tableau II.4). Afin de définir la catégorie comme un déchet solide en accord avec les normes en vigueur, deux éléments sont pris en considération : le niveau maximal des éléments lixiviés et les méthodes d'essai. On utilise principalement le test d'agitation et le test en colonne pour évaluer la lixiviation, en tenant compte du rapport liquide/solide (L/S), du pH de la solution, de la durée du test, etc [68].

**Tableau II.4** : Classement des MIRSUs [87].

Eléments (mg/kg)	Directive décharge européenne		
	Inerte	Non-dangereux	Dangereux
As	0.5	2	25
Ba	20	100	300
Cd	0.04	1	5
Cr tot	0.5	10	70

Cu	2	50	100
Hg	0.01	0.2	2
Mo	0.5	10	30
Ni	0.4	10	40
Pb	0.5	10	50
Sb	0.06	0.7	5
Se	0.1	0.5	7
Zn	4	50	200
F <sup>-</sup>	10	150	500
Cl <sup>-</sup>	800	15000	25000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	100	20000	50000
pH	-	>6	-

Selon des travaux antérieurs [21], [69], [70], [86], [88], [89], le tableau II.5 récapitule les résultats des tests de lixiviation des MIRSU.

**Tableau II.5 :** Eléments traces métalliques (Lixiviation).

Elements	A. Maldonado-Alameda (2023) (mg/kg) [88]	Yong Lu (2020) (mg/l) [89]	V. Caprai (2019) (mg/kg) [90]	E. Loginova (2021) (mg/kg) [21]	V. caprai (2018) (mg/kg) [70]	D. Shi (2018) (mg/l) CBA [86]	D. Shi (2018) (mg/l) MBA [86]
Hg	<0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Sb	0.34	ND	1.20	< 0.01	0.61	ND	ND
Ba	0.49	ND	0.90	0.40	0.63	ND	ND
Cr	<0.05	0.18	1.00	0.40	0.58	0.04	0.06
Mo	0.24	ND	2.60	< 0.01	0.53	ND	ND
As	<0.05	ND	<0.3	ND	<0.3	ND	ND
Pb	<0.05	0.16	0.10	ND	0.42	0.48	0.71
Ni	<0.05	0.15	0.30	ND	0.15	ND	ND
Zn	0.21	0.73	0.20	0.09	2.36	0.79	1.37
Cu	0.12	3.30	11.90	0.80	4.41	0.07	0.22
Cd	<0.01	<0.01	<0.02	ND	<0.02	0.14	0.17
Co	ND	ND	<0.02	ND	<0.02	ND	ND
Se	ND	ND	<0.2	ND	<0.2	ND	ND
Sn	ND	ND	<0.1	ND	0.1	ND	ND

V	ND	ND	<0.1	ND	0.1	ND	ND
Cl <sup>-</sup>	ND	ND	10440	640	4931.76	ND	ND
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ND	ND	22378	5600	2333.45	ND	ND

## **II.7 Influence de la composition physique des RSU incinérées sur la composition chimique des mâchefers**

Plusieurs facteurs peuvent influencer les caractéristiques physicochimiques et minéralogiques des mâchefers d'incinération en sortie de l'usine, tels que la zone géographique et la saison, le tri sélectif des RSU en amont, le choix de l'incinérateur, le mode de refroidissement, le processus de prétraitement des mâchefers [63].

### **II.7.1 La zone géographique et la saison**

La zone géographique a un impact sur la quantité des RSU produits, en fonction de l'évolution de la population et des modes de vie. La saison a un impact significatif sur la quantité de chaque catégorie des RSU.

### **II.7.2 Le tri sélectif**

La collecte sélective permet de valoriser les matériaux susceptibles d'avoir une autre utilisation économique. La collecte sélective des RSU avant l'incinération entraîne une modification dans la composition chimique des mâchefers [63].

### **II.7.3 Le type de l'incinérateur**

Les caractéristiques physico-chimiques des mâchefers en sortie d'usine peuvent également être influencées par le mode de combustion des RSU (le type de l'incinérateur utilisé et les conditions de l'incinération) [63].

### **II.7.4 Le mode de refroidissement**

Le refroidissement des mâchefers se fait soit par l'eau, soit par l'air. Dans le monde, la plupart des usines d'incinération emploient le refroidissement par l'eau. Les mâchefers sont rarement refroidis par l'air, ce procédé permet d'obtenir une quantité et une qualité de métaux plus élevées pour les extraire et les recycler. Cette technique est plus couramment employée en Suisse et au Japon. Les principaux bénéfices de cette méthode par rapport à la méthode traditionnelle sont les suivants [63], [91] :

Un brûlage plus exhaustif en utilisant une postcombustion des résidus organiques [91]

L'oxydation des métaux est réduite, ce qui entraîne une meilleure qualité [91];

L'absence d'eau entraîne une diminution de 20 % du poids [91];

La séparation directe en fractions fines (0 à 5 mm) et grossières (> 5 mm) est possible [91].

## **II.8 Modes de Prétraitement des mâchefers**

Les mâchefers frais sont soumis à divers prétraitements pour obtenir des mâchefers prêts à être exploités [71].

### **II.8.1 Prétraitement mécanique**

**Extraction des métaux :** La plupart des usines disposent d'un système de traitement primaire des mâchefers qui consiste en un déferraillage par tri magnétique. On récupère toujours les métaux ferreux, et parfois, les métaux non ferreux (aluminium, cuivre,...) [71].

**Criblage:** En général, les mâchefers sont criblés à une taille de particules inférieure à 30-40 mm [71].

**Stockage:** Les mâchefers sont conservés jusqu'à une durée de 12 mois sur les plateformes de maturation et d'élaboration des mâchefers, en fonction des besoins, ils peuvent être utilisés selon les résultats des analyses réglementaires [71].

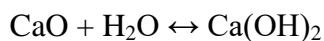
### **II.8.2 Maturation**

Le processus de maturation est utilisé pour élaborer des mâchefers d'incinération afin de diminuer le risque de pollution d'un matériau dans son environnement. En présence du dioxyde de carbone, les composés thermodynamiquement instables se transforment en composés secondaires plus stables. Cette opération peut être réalisée de manière traditionnelle, c'est-à-dire en exposant la chaux à l'air pendant une période de 1 à 12 mois, pendant laquelle elle est carbonatée par le dioxyde de carbone atmosphérique. Il est aussi possible de la réaliser dans un environnement contrôlé (carbonatation accélérée) [63].

#### **II.8.2.1 Les étapes de maturation**

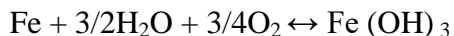
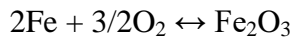
##### **Extinction de la chaux vive**

Transformation de la chaux vive en portlandite [71]



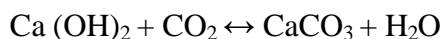
##### **Oxydation de la ferraille**

Réaction très exothermique



##### **Carbonatation de la chaux**

La portlandite réagit avec le  $\text{CO}_2$  et forme du carbonate de calcium. Le pH descend autour de 8-9.



Relargage des sulfates et chlorures

Les sels solubles ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ) se dissolvent.

La baisse du pH provoque la solubilisation des sulfates.

Stabilisation des métaux

La baisse du pH induit la formation d'hydroxydes métalliques.

### **II.8.3 Valorisation des mâchefers**

Après les traitements mentionnés précédemment, les mâchefers sont beaucoup plus pratiques à utiliser. Afin d'évaluer leurs possibilités d'application, il est essentiel de prendre en considération trois facteurs essentiels : l'aptitude au traitement, leurs performances techniques et leur influence sur l'environnement [92], [5].

#### **II.8.3.1 Techniques routières**

Un pavé routier typique est constitué de plusieurs couches, composées de différents types de matériaux [5]. En technique routière, on valorise généralement les MIRSU, car ils possèdent les propriétés d'un gravât et peuvent remplacer les granulats naturels [56]. La valorisation des MIRSU dans un pavé routier est basée sur leur impact environnemental. Deepesh Bansal et al (2024) dans leur recherche, ils ont évalués le potentiel de réutilisation des mâchefers à la place des agrégats naturels conventionnels dans les couches du pavé, ils ont trouvés que la réutilisation des mâchefers est une option durable pour remplacer les agrégats naturels dans les couches de base et de fondation des routes, sous réserve de restrictions ou de mesures de traitement appropriées [93]. Ciara'n J et al (2017), ont évalués les caractéristiques des mâchefers et leur performance dans les applications de la construction routières. Les MIRSU ont été utilisé sous forme non liée, hydraulique et liée au bitume. En tant que matériau non lié, les MIRSU présentent, après traitement, des propriétés mécaniques adaptées à une utilisation en tant que matériau de recouvrement, de remplissage et de couche de forme, ce qu'ont été démontré avec succès lors d'essais sur le terrain. Sous forme de liant hydraulique, les MIRSU peuvent être un composant d'agrégat viable dans les couches de fondation et de route à des teneurs faibles à modérées, en fonction des exigences de performance et de la teneur en liant. En tant qu'agrégat lié au bitume dans les routes, le matériau peut être utilisé à de faibles teneurs, la fraction des MIRSU autorisée étant contrôlée par les exigences relatives à la teneur en vides, à la résistance à l'abrasion et à la teneur en bitume [94].

#### **II.8.3.2 Fabrication de céramique**

Les mâchefers ont également été employés comme matières premières pour la fabrication de céramiques à haute température, car ils contiennent des concentrations élevées en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{CaO}$ , ce qui permet de remplacer une partie de l'argile dans la fabrication de céramiques [5]. Andreola.F et al(2001), ont étudiés la possibilité d'utiliser les mâchefers pour la fabrication de carreaux de céramique et ont constatés que l'introduction de 20 % de

mâchefers dans la pâte céramique ne modifiait pas significativement les caractéristiques minéralogiques et thermiques de la pâte céramique [95]. Les travaux d'Elsabet Hunachew Dagneu (2022), ont été concentrés sur la substitution de l'argile (kaolin) par les mâchefers. Des échantillons de carreaux muraux en céramique pressés à sec ont été préparés en ajoutant du mâchefer (0 à 60 % en poids) à l'argile. Les travaux montrent que l'absorption d'eau est supérieure à 10 %, et une résistance à la flexion plus élevée de 24,83 MPa a été obtenue pour l'argile additionnée de 30 % en poids de mâchefers [96].

### **II.8.3.3 Agriculture**

Les trois nutriments clés indispensables au développement des plantes sont l'azote, le phosphore et le potassium. Étant donné que les mâchefers renferment des teneurs adéquates en phosphore et en potassium, il est possible de les utiliser comme une alternative partielle aux engrais commercialisés [5]. Toutefois, l'application des mâchefers comme fertilisant est soumise à de nombreuses restrictions. Les métaux lourds contenus dans les mâchefers sont toxiques pour les plantes et les animaux ; la teneur élevée en sels induit un stress salin chez les plantes ; le pH du sol affecte la mobilité des éléments ; et la lixiviation des métaux lourds dans les eaux souterraines suscite des préoccupations environnementales. Par conséquent, des nombreuses recherches doivent être menées sur les mâchefers avant de les utiliser [97].

### **II.8.3.4 Adsorbant**

L'adsorption est largement utilisée pour éliminer les polluants des eaux, donc la recherche des alternatives moins coûteuses que le charbon actif est très importante [5]. Les MIRSUs ont été utilisés pour éliminer les colorants et les métaux lourds des eaux usées [98] ainsi que la purification des gazes toxiques [5]. L'une des principales préoccupations liées à l'utilisation des mâchefers pour le traitement des eaux usées est la lixivibilité des métaux lourds, car la présence de métaux lourds dans l'eau est un problème grave en raison de leur toxicité élevée [5]. Vinod K. Gupta et al (2005), ont transformés les MIRSUs en adsorbant pour l'élimination du jaune d'alizarine, du vert rapide et du violet de méthyle des eaux usées. Les pourcentages d'élimination du jaune d'alizarine, du vert rapide et du violet de méthyle sur cet adsorbant étaient respectivement de 87,5 %, 97,0 % et 73,0 %. Le temps de contact optimal pour les trois colorants s'est avéré être de 4 heures, tandis que l'adsorption maximale a été observée à un pH de 5,5, 5,0 et 8,0 pour le jaune d'alizarine, le vert rapide et le violet de méthyle, respectivement. La dose d'adsorbant a été optimisée à 10,0 g/L pour les trois colorants [99]. Marta Fontseré Obis et al (2017), ont appliqués les MIRSUs comme un adsorbant alternatif potentiel pour le traitement du biogaz en raison de leur réactivité avec le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) [100]. Jun Yao et al (2015), ont étudiés l'adsorption de l'ammoniac sur les MIRSUs.

Les résultats ont montrés que l'adsorption pouvait être réalisée avec une capacité d'adsorption maximale de 156,2 mg/g, et l'adsorption optimale de l'ammoniac a été observée lorsque le pH était de 6,0 [101].

#### **II.8.3.5 Production du ciment**

La valorisation des MIRSU dans la fabrication du ciment se présente soit par leur utilisation comme matière dans le cru cimentaire, soit par leur utilisation comme ajout au ciment. Plusieurs études ont été publiées dans l'axe de l'utilisation des MIRSU pour la préparation du cru [15], [16], [102], [103]. Les résultats des travaux de Joëlle Kleib et al (2021), ont montré que jusqu'à 12,4 % des matières premières du ciment Portland peuvent être remplacées par les MIRSU. En outre, les résistances à la compression des pâtes de ciment produites avec les MIRSU sont équivalentes à celles des pâtes sans mâchefers. Clavier K.A (2021) et al, ont trouvés que l'addition des MIRSU avec une proportion en dessous 5 % dans le cru est bénéfique à condition qu'elles soient lavées et contrôlées de manière appropriée afin de réduire la composition des phases délétères [15]. Aneeta Marry Joseph (2021), a montré que l'utilisation des mâchefers avec un remplacement de 5 % de la farine crue génère un clinker dont la minéralogie et la cinétique d'hydratation sont comparables à celles du clinker commercial [103]. Le recyclage des MIRSU comme ajout pour la fabrication du ciment ont étudié par plusieurs chercheurs [18], [19], [22], [90]. Tous ces chercheurs ont trouvés que la proportion des mâchefers ajoutés ne doit pas dépasser 20 %, afin d'obtenir des ciments dont les propriétés physiques et mécaniques comparables à ceux du ciment commercial.

#### **II.8.3.6 Préparation du béton et du mortier**

Le béton et le mortier sont des matériaux composites constitués du ciment, d'additifs et de granulats, ils sont largement utilisés pour les éléments de construction. Le granulat est un matériau particulier lié au ciment pour former le béton ou le mortier, qui représente normalement environ 60 à 80 % du mélange de béton ou mortier. Il peut être divisé en granulats fins (fraction de sable, inférieure à 4 mm) et en granulats grossiers (supérieurs à 4 mm, gravier) selon la norme EN 12620 (2002) [68]. Actuellement, l'application des mâchefers, en tant que remplacement d'agrégats naturels et du ciment dans le béton ou le mortier a été largement étudiée [68]. N.M. Alderete et al (2021), ont étudié la valorisation des mâchefers comme substitut du ciment Portland dans le béton. Ils ont trouvés un mélange de béton contenant 20 % de mâchefers traitées est performant [104]. Aneeta Mary Joseph et al (2020), ont trouvé que le remplacement du ciment par 25 % des mâchefers traités améliore les résistances mécaniques des mortiers à 90 jours [105]. Jacques Rémy Minane et al (2017), ont étudiés la caractérisation des mâchefers et leur faisabilité de la substitution des granulats

naturels du béton. Des essais sur des échantillons de mâchefers (0-2 mm) pour la substitution totale des agrégats naturels dans le béton ont été réalisés avec 0 %, 1,5 %, 2 % et 3 % de superplastifiant. Après 14 jours de cure, les résultats de la résistance à la compression étaient respectivement de 19,4 MPa, 26,1 MPa, 26,7 MPa et 33,3 MPa, donc la résistance à la compression a été améliorée avec l'augmentation de la teneur du superplastifiant.

## **II.9 Conclusion**

Dans les pays du monde, le traitement des RSU par incinération a connu une évolution ces dernières années. Le choix du four approprié pour incinérer les RSU est influencé par leurs caractéristiques (humidité, pouvoir calorifique, matière organique). Les caractéristiques des résidus d'incinération sont principalement influencées par la composition des RSU incinérées, les paramètres d'incinération et les traitements adéquats en amont et en aval de la filière. Les mâchefers occupent la première place en termes de quantité par rapport à d'autres résidus solides générés. Les données disponibles dans la littérature concernant les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des mâchefers témoignent de l'influence de divers facteurs sur la composition des mâchefers, tels que la collecte sélective des RSU en amont, le choix de l'incinérateur, la méthode de refroidissement et le temps de maturation. Aujourd'hui, il est observé que les mâchefers sont utilisés comme matériau routier, comme fertilisant dans l'agriculture, comme matière première dans la fabrication de céramique, comme adsorbant et aussi comme substitut du ciment ou comme granulats dans la préparation des mortiers et bétons. La valorisation des mâchefers dans la production de ciment est une voie prometteuse qui favorise l'économie circulaire et réduit les coûts de production. Le procédé de fabrication du ciment et la valorisation des mâchefers comme ajout cimentaire seront discutés en profondeur dans le chapitre III.

## **Chapitre III : Recyclage des mâchefers d'incinération des résidus solides urbains comme ajout dans la fabrication du ciment**

### **III.1 Introduction**

Une tonne de ciment Portland produite libère presque la même quantité de gaz carboniques dans l'atmosphère. En réalité, la substitution du ciment Portland par des ajouts diminue également les rejets de CO<sub>2</sub> [106]. Parmi les ajouts utilisés en industrie cimentaire, on retrouve la pouzzolane, le laitier, le calcaire et la fumée de silice. Actuellement, plusieurs chercheurs ont étudié la possibilité de valorisation des mâchefers d'incinération des RSU comme ajout au clinker pour la fabrication du ciment. Le recyclage des mâchefers dans l'industrie de ciment permet de réaliser l'économie circulaire et réduire les coûts liés à la production du clinker comme la conservation des matières premières et du carburant utilisé pour la cuisson du cru.

Ce chapitre porte sur le procédé de fabrication du ciment, les constituants du ciment, leurs caractéristiques chimiques ainsi que leurs évolutions au cours de l'hydratation ; on présente ensuite les types des additions minérales, leur importance dans l'industrie cimentaire et à la fin on a étudié l'effet de mâchefers d'incinération des RSU sur les caractéristiques du ciment lors de leur utilisation comme ajout cimentaire.

### **III.2 Le ciment Portland**

Le ciment Portland est constitué de plus 95 % de clinker qui est obtenu après la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile avec des proportions d'environ 80 % et 20 % respectivement, à une température atteinte jusqu'à 1450 °C [107].

### **III.3 Processus de production du ciment portland**

#### **III.3.1 Préparation du cru**

La préparation d'un mélange cru commence par l'extraction de matières premières trouvées dans des carrières naturelles à proximité des cimenteries. Ces matières premières représentées par le calcaire et l'argile avec des proportions majoritaires par rapport aux autres matières s'appellent des correcteurs (minerai de fer, bauxite, sables siliceux, etc.) utilisées pour ajuster les proportions en fer, soufre, silicium et aluminium dans le mélange cru.

Le cru est obtenu après le séchage des matières premières et optimisation de leurs proportions. Le mélange et le broyage de ces matières conduit à l'obtention d'un mélange homogène contenant des éléments exprimés en oxydes comme CaO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, les proportions de ces derniers varient selon la composition des carrières et le type de clinker souhaitant de fabriquer [107].

Il existe 4 voies de synthèse d'un mélange cru trouvés à ce jour [108] :

**La voie humide** : C'est le mode le plus ancien. Le calcaire et l'argile sont broyés finement et homogénéisés avec l'eau, jusqu'à l'obtention d'une pâte à une humidité varie entre 25 et 40 %, ensuite cette pate est injectée directement dans le four. Cette méthode est très couteuse à cause de la quantité importante de l'énergie consommée pour éliminer l'eau excédentaire.

**La voie semi-humide** : Suivie le même mode opératoire que celui de la voie humide, la seule différence que le mélange cru est débarrassé d'une quantité de son eau par un filtre-pressé. La teneur en eau dans la pâte est d'environ 15%, avant son injection dans le four.

**La voie sèche** : Cette technique permet l'homogénéisation des matières premières qui sont déjà séchées et broyées pour les transformer en une poudre pulvérulente. Cette dernière est transférée à une tour de préchauffage à cyclone où des gaz circulant en sens inverse chauffent la poudre à une température atteint de 800 °C, ce qui lui permet de maigrir une quantité de CO<sub>2</sub> et de l'eau. A la fin de ce processus, la poudre est injectée dans le four.

**La voie semi-sèche** : La poudre des matières premières est humidifiée pour former des granules plus ou moins sphériques de 10 à 20 mm avec une teneur en eau proche de 12 %. Ce modèle facilite l'écoulement du mélange cru dans le four. Les granules sont ensuite transportés vers une chambre de préchauffage puis vers le four.

Jusqu'à maintenant, la voie sèche et semi sèche sont les plus utilisées, car elles consomment moins d'énergie donc elles sont moins couteuses par rapport à la voie humide et semi-humide.

### **III.3.2 Optimisation des constituants du cru cimentier**

Dans une usine de ciment, les proportions des matières premières constituant d'un mélange cru sont optimisées à l'aide des modules suivants [109]:

#### **Module de saturation en chaux (LSF « Lime Saturation Factor »)**

Le LSF est lié principalement à la teneur de la chaux dans le mélange cru, donc plus la proportion de CaO est élevée, la température de clinkérisation et le temps de séjour du cru dans le four seront supérieurs, car le taux de chaux libre ne doit pas dépasser 2 % dans le clinker. Plus la valeur de LSF est élevé, plus la teneur en alite augmente et plus la proportion de bélite diminue. La valeur de LSF dans le cas du ciment Portland varie entre 95 et 97, elle est calculée selon l'équation III.1 [107].

$$LSF = \frac{\%CaO}{2,80 \times \%SiO_2 + 1,18 \times \%Al_2O_3 + 0,65 \times \%Fe_2O_3} \quad (III.1)$$

**Module silicique (SR « Silica Ratio »)**

Ce paramètre contrôlant la proportion des phases silicatées dans le mélange par rapport aux phases interstitielles alumineuses et ferreuses. Plus sa valeur est élevée, plus la cuisson du mélange sera difficile en raison de sa richesse en silice et son faible teneur en liquide assurant les processus de diffusion à l'origine des réactions solide – liquide et liquide – liquide. La valeur de SR est calculée selon l'équation III.2, elle est comprise entre 2 et 2.5 pour le ciment portland [110].

$$SR = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3} \quad (III.2)$$

**Module alumino-ferrique AF**

Ce module est important pour le contrôle de la viscosité de la phase liquide ainsi que la vitesse de formation des C<sub>3</sub>A jusqu'à la température de 1338°C. Le module alumino-ferrique varie entre 1,8 et 2,8 pour un ciment Portland, il est calculé selon l'équation III.3 [108].

$$AF = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} \quad (III.3)$$

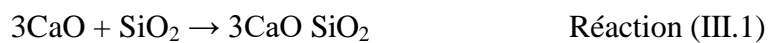
**III.3.3 Cuisson (Clinkérisation)**

Le cru est transporté à une tour de préchauffage à cyclones après avoir été finement broyé et homogénéisé, où il est préchauffé pour éliminer son humidité à une température atteint 800 °C. Cette température permet la décarbonatation de la calcite en chaux et CO<sub>2</sub> et la scission de l'argile en SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Le cru est ensuite transféré dans un four en forme de cylindre, qui tourne et il est légèrement incliné, où il descend par gravité. Les gaz chauds circulent à contre-courant et chauffent progressivement les matières jusqu'à ce qu'elles atteignent la température de clinkérisation de 1450 °C. Les matières sont cuites à cette température pendant environ dix minutes. A la sortie du four, les nodules de clinker formés passent au travers d'un refroidisseur où leur température diminue rapidement jusqu'à atteindre la température ambiante. Ce processus de refroidissement est appelé "trempe", ce système est utilisé pour empêcher la décomposition de l'alite en bélite et en chaux libre [108].

Dans le procédé de clinkérisation (figure III.1), quatre phases principales ont été formées en fonction de la température à laquelle ils se produisent [106] :

- Le silicate tricalcique nommé « alite » C<sub>3</sub>S, dont la formule est 3CaO SiO<sub>2</sub>

1220 °C



- Le silicate bicalcique nommé « bélite »  $C_2S$ , de formule  $2CaO SiO_2$ .

1220 °C



- L'aluminate tricalcique  $C_3A$  de formule  $3CaO Al_2O_3$ .

1450 °C



- L'alumino-ferrite tétra calcique (Ferro aluminate tétra calcique)  $C_4AF$  de formule  $4CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$

1450°C

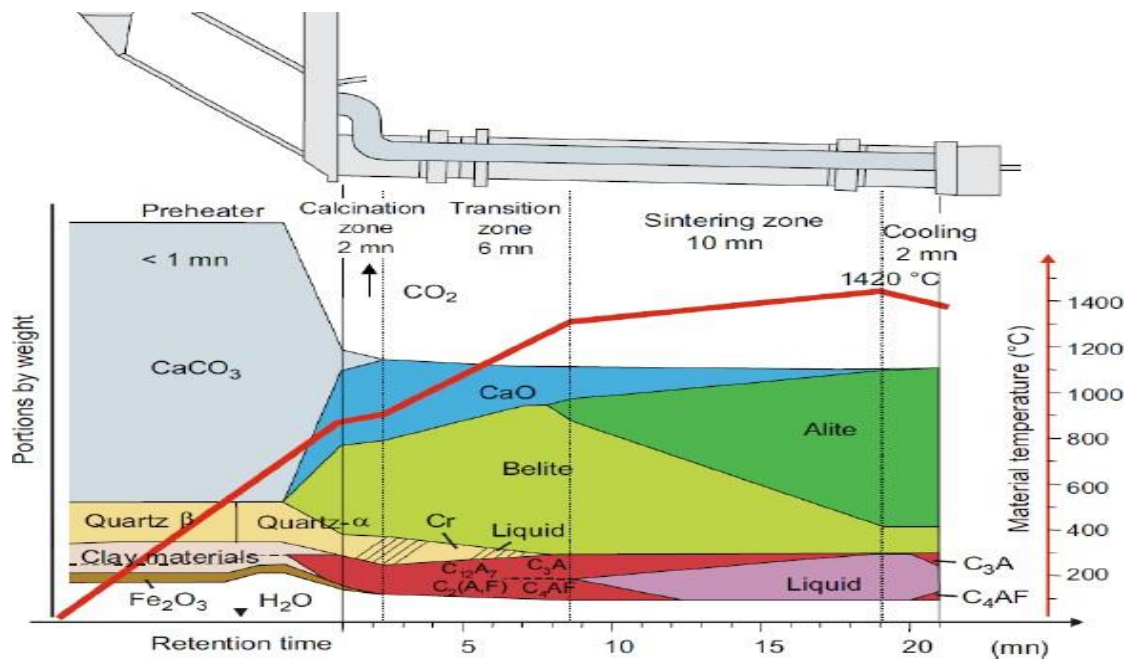
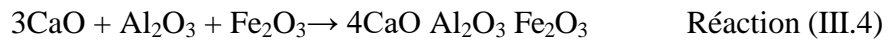


Figure III.1: Les étapes de clinkérisation (four rotatif) [107].

### III.4 Valorisation des mâchefers dans le cru cimentaire

Les constituants du cru de ciment sont l'oxyde de calcium, la silice, l'alumine et l'oxyde de fer en tant que composants principaux, ainsi que d'autres composants mineurs, avec des limites spécifiques pour chacun d'entre eux. Une composition appropriée est obtenue en dosant soigneusement différentes sources minérales naturelles telles que le calcaire, l'argile, etc. Actuellement, différentes matières premières alternatives sont ajoutées à la farine brute, généralement comme sources de silice. Le niveau de remplacement est limité en raison de la faible teneur en Ca ou de la présence d'autres matières nocives telles que les alcalis et le chlore. Le ciment étant produit en grandes quantités, l'utilisation de fractions, même limitées,

peut entraîner une consommation importante de mâchefers. Une partie des métaux lourds, Cu, Zn et Pb, qui affectent principalement l'utilisation des mâchefers, peut être incorporée en toute sécurité dans les phases minérales du clinker sans affecter ses propriétés [103]. Clavier et al. (2021), leur étude porte sur l'utilisation des mâchefers lavés dans la production de ciment ordinaire à l'échelle pilote. Trois essais distincts ont été réalisés, au cours desquels 0 %, 1 % et 2 % de mâchefers lavés ont été incorporés dans la production normale d'un four à grand échelle. La composition élémentaire et minéralogique résultante était équivalente pour chacun des trois ciments. Une analyse détaillée des paramètres de performance mécanique n'a pas révélé de différences significatives dans la broyabilité, l'ouvrabilité, la cinétique d'hydratation ou les propriétés de résistance des trois ciments. Une évaluation préalable de l'exposition directe et du risque de lixiviation n'indique aucune différence significative dans les constituants potentiellement préoccupants. Les émissions atmosphériques contrôlées au cours de chaque essai n'indiquent aucune différence de concentration pour les polluants surveillés. Les résultats confirment que l'incorporation modeste de mâchefers lavés dans la production de ciment portland à grande échelle est un moyen sûr et réalisable de remplacer les matières premières traditionnelles [111].

### **III.5 Les composants du clinker**

L'alite, la bélite, l'aluminate tricalcique et l'alumino-ferrite tétracalcique représentent les phases majoritaires du clinker. Les concentrations habituelles de ces dernières sont mentionnées dans le tableau III.1 [107].

**Tableau III.1** : Composition minéralogique du clinker Portland [107].

Phase	Formule chimique	Notations	Teneurs (%)	Concentrations (%)
Alite	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	$\text{C}_3\text{S}$	65	40–80
Bélite	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	$\text{C}_2\text{S}$	15	10–50
Aluminate tricalcique	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{C}_3\text{A}$	10	0–15
Ferrite	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$\text{C}_4\text{AF}$	10	0–20

L'existence des impuretés dans le cru, qu'il s'agisse d'éléments mineurs ou de traces, peut altérer les structures des diverses phases minéralogiques du ciment et affecter la procédure de production. Dans le processus de clinkérisation, ces impuretés peuvent également apporter des avantages. Dans un système pur  $\text{C}_2\text{S}$ - $\text{C}_3\text{A}$ - $\text{C}_4\text{AF}$ , la phase liquide se trouve à une température

de 1338 °C. Lorsque du MgO est présent, la température diminue à 1301 °C, tandis qu'en présence de MgO et d'alcalins, elle peut atteindre 1260 °C [107].

Les formules de Bogue sont des calculs permettant de fixer les composants chimiques finals d'un ciment ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) selon les équations III.4, III.5, III.6, III.7 [104].

$$C_3S = 4.071C - 7.6S - 6.718A - 1.43F \quad (III.4)$$

$$C_2S = -3.071C + 8.6S + 5.068A + 1.079F \quad (III.5)$$

$$C_3A = 2.65A - 1.692F \quad (III.6)$$

$$C_4AF = 3.043F \quad (III.7)$$

Les paragraphes suivants détaillent la composition et la minéralogie des principaux constituants du clinker.

### **III.5.1 Silicate tricalcique (Alite)**

Le clinker est principalement constitué d'alite ( $C_3S$ ) (40-80 %). Selon la température à laquelle il est soumis, sept structures cristallines distinctes ou polymorphes se présentent : trois structures tricliniques (T), trois structures monocliniques (M) et une structure rhomboédrique (R). Étant donné que la structure de l'alite change au cours du refroidissement, elle est susceptible de se décomposer en bélite et chaux libre vers 1250 °C si la vitesse de refroidissement est lente [107]. Le  $C_3S$  contient les ions Ca ou Si en substitution et des traces de Mg, Al et Fe distribués dans le réseau cristallin. En règle générale, ces impuretés augmentent la réactivité du ciment. La quantité d'impuretés du  $C_3S$  varie en fonction de divers facteurs tels que la nature des matières premières, la température de cuisson et le mode de refroidissement du clinker. Il est important de noter que l'alite est principalement responsable de la résistance du ciment, à court terme [113].

### **III.5.2 Silicate bicalcique (Bélite)**

La bélite est la deuxième composante du clinker (10-50 %). Les cinq formes polymorphiques de silicate bicalcique ( $C_2S$ ) ( $\alpha$ -bélite,  $\alpha'$ H-bélite,  $\alpha'$ L-bélite,  $\beta$ -bélite et  $\gamma$ -bélite) varient en fonction de la température [109]. La forme  $\gamma$  est la plus stable à température ambiante, mais elle manque de réactivité. Dans le clinker, la bélite se présente principalement sous forme  $\beta$ . La bélite pure contient 67 % de CaO et 33 % de  $SiO_2$ . Cependant, elle peut également renfermer d'autres traces d'oxydes pouvant atteindre 4 à 6 % comme l'aluminium, le fer et le potassium. Cette phase favorise la formation des résistances mécaniques sur le long terme [108].

### **III.5.3 Aluminate tricalcique**

Généralement, l'aluminate tricalcique est présent en une proportion entre 0 et 15 % dans le clinker portland. Elle est principalement constituée d'oxyde de calcium et d'oxyde

d'aluminium. À l'instar des silicates, la structure de l'aluminate tricalcique peut inclure des ions (le calcium est remplacé par le magnésium, les alcalins, etc.). Trois catégories distinctes de structure cristalline du C<sub>3</sub>A existent : la structure cubique, monoclinique et orthorhombique. Toutefois, contrairement aux silicates, la structure de l'aluminate tricalcique ne varie pas en fonction de la température, mais est modifiée par l'incorporation du sodium (Na) dans sa composition. Elle affiche une réactivité extrêmement intense lorsqu'elle entre en contact avec l'eau (durant l'hydratation du ciment). On contrôle cette réactivité en ajoutant du sulfate de calcium [107].

#### **III.5.4 L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferrite)**

Le clinker contient entre 0 et 20 % d'alumino-ferrite tétracalcique (Ferrite). C'est une solution solide ayant la formule chimique suivante :  $Ca_2(Al_xFe_{1-x})_2O_5$ , avec des valeurs de x variant entre 0 et 0,7. À l'opposé des phases précédentes, la ferrite ne présente pas de polymorphisme, mais plutôt une transformation de symétrie [107]. À la température de formation du clinker, les phases C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF sont liquides. Lorsqu'elles se refroidissent, elles forment une phase interstitielle qui cristallise entre les cristaux de C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S [113].

#### **III.5.5 Phases mineures**

Outre les phases principales, un clinker peut également contenir des phases mineures (<3%). Du quartz non réagi, de la chaux libre (CaO) ou du périclase (MgO) peuvent être détectés. Dans le four, les alcalis-sulfates sont également liés aux cycles d'évaporation et de condensation des composants volatils (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O et SO<sub>3</sub>) [107].

### **III.6 Préparation du ciment**

Le ciment est préparé par le co-broyage du clinker avec le gypse (régulateur de prise), ou d'autres ajouts minéraux pour former différents types de ciment.

### **III.7 Classification des ajouts minéraux**

#### **III.7.1 Ajouts actifs**

Les ajouts actifs désignent des substances artificielles ou naturelles qui ont une réactivité spécifique qui les autorise à interagir, par le biais d'une réaction physique ou chimique, avec les composants du ciment au cours de l'hydratation. La pouzzolane naturelle, l'argile opaline et les additions siliceuses font partie des ajouts actifs naturels les plus réputés. En revanche, en ce qui concerne les ajouts artificiels, on peut mentionner les laitiers provenant des hauts fourneaux, les cendres volantes, la fumée de silice, l'argile calcinée, les déchets issus de la combustion et les débris de brique concassée [114].

### III.7.2 Ajouts inertes

D'après la littérature, les particules de clinker de plus de 60 µm ne subissent pas une hydratation complète, même pendant le processus de durcissement sur le long terme. Par conséquent, ces particules de clinker pourraient se substituer par des matériaux inertes. De plus, les particules les plus fines d'un ajout inerte contribuent à remplir les pores de la pâte de ciment en tant que micro-agrégats. Les ajouts inertes comprennent les ajouts de calcaire et les fillers [114].

### III.8 Classification des ciments

#### III.8.1 Classification en fonction de leur composition

Selon la norme EN 197-1, 27 ciments courants sont classés en cinq (05) catégories en fonction de leur composition en ajouts minérales. Ces catégories sont présentées dans le tableau III.2 [20].

**Tableau III.2:** Les types de ciments courants.

Types de ciments courants	Notation	Clinker (K)	constituants (S, D, P, Q, V, W, T, L et LL)	Constituants secondaires
<b>Ciment Portland</b>	CEM I	95 – 100	-	0 – 5
<b>Ciment Portland composé</b>	CEM II/A	80 – 94	6 – 20	0 – 5
	CEM II/B	65 – 79	21 – 35	0 – 5
<b>Ciment de haut fourneau</b>	CEM III/A	35 – 64	36 – 65	0 – 5
	CEM III/B	20 – 34	66 – 80	0 – 5
	CEM III/C	5 – 19	81 – 95	0 – 5
<b>Ciment pouzzolanique</b>	CEM IV/A	65 – 89	11 – 35	0 – 5
	CEM IV/B	45 – 64	36 – 55	0 – 5
<b>Ciment composé</b>	CEM V/A	40 – 64	36 – 60	0 – 5
	CEM V/B	20 – 38	62 – 80	0 – 5

S :laitier de haut fourneau ;D :fumé de silice ;P :pouzzolanes naturelle ;Q :pouzzolanes naturelle calcinée ;V :cendres volantes siliceuse ;W :cendres volantes calcique ;T :schiste calciné ;L,LL :calcaire.

#### III.8.2 Classification en fonction de leur résistance normale

On définit trois classes basées sur la résistance normale à 28 jours. Ces trois classes principales sont liées aux sous-classes « R » pour élaborer des ciments présentant une grande résistance dès le plus jeune âge. On divise ces classes en 32.5 ; 42.5 et 52.5. Elles sont tenues de suivre les spécifications et les valeurs indiquées dans le tableau III.3 [115].

**Tableau III.3:** Spécification mécaniques et physiques d'un ciment [20].

	Résistance à la compression (MPa)				Temps de prise initial (min)	Expansion (mm)
	Au jeune âge		à 28 jours			
	2 Jours	7 Jours	Min	Max		
32,5	-	≥ 16,0	≥32.5	≤52.5	≥75	<10
32,5R	≥ 10	-				
42,5	≥10	-	≥42.5	≤62.5	≥60	
42,5R	≥20	-				
52,5	≥20	-	≥52.5	-	≥45	
52,5R	≥30	-				

### III.9 Hydratation du ciment

L'hydratation, selon Adam Neville [116], est la transformation du ciment Portland en un liant, qui se produit dans la pâte lorsqu'il est exposé à l'eau. « En présence d'eau, les silicates et les aluminates forment des produits d'hydratation qui donnent avec le temps une masse ferme et dure : la pâte de ciment hydraté. ».

#### III.9.1 Hydratation du silicate tricalcique C<sub>3</sub>S

Lorsque les silicates subissent une hydratation, ils se transforment en gels de silicate de calcium (CSH) hydraté et en hydroxyde de calcium (CH). La réaction entre le C<sub>3</sub>S et l'eau est la suivante.



Où CSH symbolise le 3CaO 2SiO<sub>2</sub> 3H<sub>2</sub>O (silicate de calcium hydraté), H signifie l'eau et CH signifie Ca(OH)<sub>2</sub>, également connu sous le nom de portlandite.

Les silicates de calcium hydratés (CSH) occupent entre 60 et 70 % du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Sa structure est sous forme des feuillets formés de cristaux très petits et mal cristallisés. Sa surface spécifique est de l'ordre (100 - 700 m<sup>2</sup>/g). Plus la teneur de C<sub>3</sub>S est élevée, plus les résistances au jeune âge sont importantes, et cela est due à la vitesse élevée de réaction de C<sub>3</sub>S. La portlandite (CH) occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. Elle a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance [106].

#### III.9.2 Hydratation du silicate bicalcique C<sub>2</sub>S

L'hydratation des silicates bicalciques (C<sub>2</sub>S) donnent aussi CSH et CH selon la réaction :

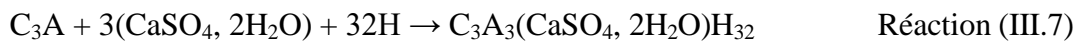


Les études calorimétriques ont montré des résultats similaires à ceux de l'hydratation du C<sub>3</sub>S mais avec moins d'évolution de la chaleur. L'hydratation de C<sub>2</sub>S génère 82 % de gel de CSH et seulement 18 % de CH. Une quantité plus élevée de C<sub>2</sub>S dans le ciment assure le développement des résistances à long terme [106].

### III.9.3 Hydratation de l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A

La présence du gypse (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O) a un impact significatif sur l'hydratation des aluminates. Sans gypse, la réaction entre le C<sub>3</sub>A et l'eau est extrêmement intense et conduit à une rigidification instantanée de la pâte, appelée prise rapide. Lorsque le gypse est présent, les C<sub>3</sub>A réagissent initialement pour créer le tri-sulfo-aluminate hydraté (Etringite) [117].

La réaction est donnée par :



L'ajout de gypse au clinker (3 à 5 % en poids) ne suffit pas pour convertir tous les aluminates en étringite. Ainsi, un mono-sulfo-aluminate apparaît en second lieu.

La réaction est donnée par :



Les aluminates hydratés occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée.

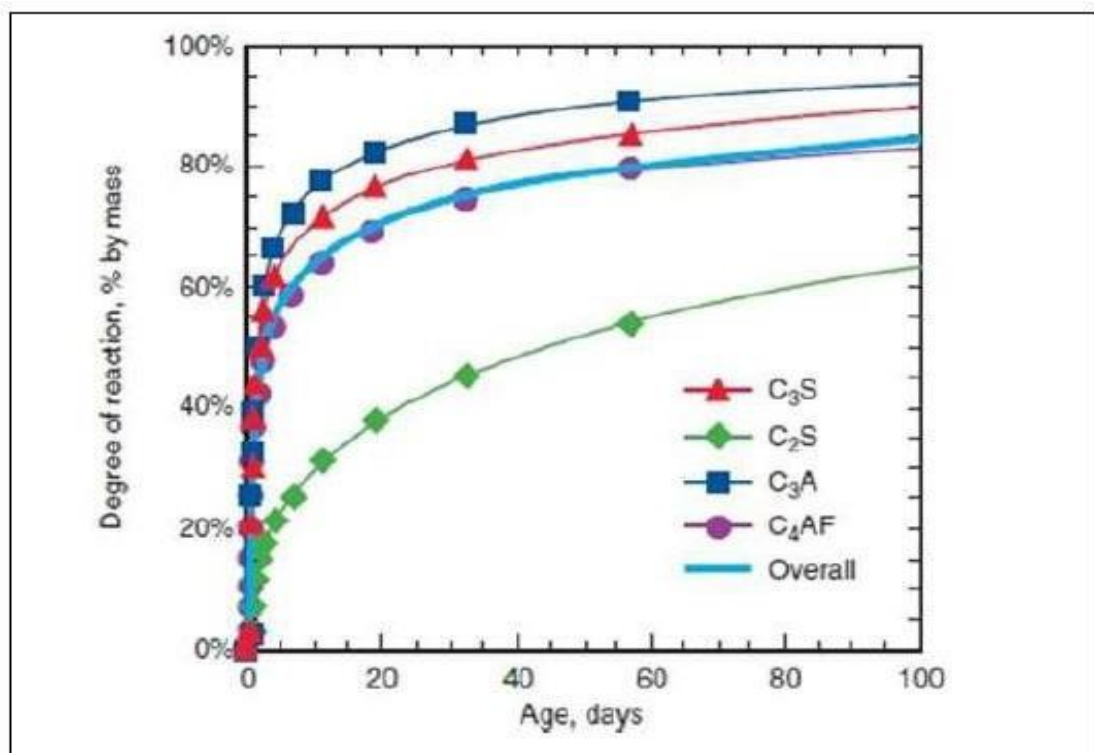
### III.9.4 Hydratation de l'aluminoferrite tetracalcique C<sub>4</sub>AF

Le C<sub>4</sub>AF interagit avec le gypse de manière similaire à celle du C<sub>3</sub>A, cependant, dans ce contexte, la réaction est nettement plus lente. Au début de la réaction, le C<sub>4</sub>AF génère une forme élevée de sulfo-aluminate de calcium qui interagit avec l'excès de C<sub>4</sub>AF pour produire une version plus basse du même produit. Ces sulfo-aluminates constituent près de 15-20% du total des solides présents dans la pâte [117]. Le tableau III.4 résume les caractéristiques des quatre composants du ciment portland ainsi que la figure III.2 présente le degré de réactivité de ces composants.

**Tableau III.4:** Caractéristiques des principaux constituants du ciment portland [117].

Constituant	Alite (C <sub>3</sub> S)	Bélite (C <sub>2</sub> S)	Aluminate tricalcique (C <sub>3</sub> A)	Aluminoferrite tetracalcique (C <sub>4</sub> AF)
Prise	Rapide (heures)	Lente (jours)	Instantanée	Très rapide (minutes)
Développement de résistance	Rapide (jours)	Lent (semaines)	Très rapide (un jour)	Très rapide (un jour)

Résistance ultime	élevée : Dizaine de MPa	élevée : Dizaine de MPa	Faible : quelques MPa	Faible : quelques MPa
Chaleur d'hydratation	Moyenne : ~500 j/g	Faible : ~250 j/g	Très élevée : ~850 j/g	Moyenne : ~420j/g
Remarques	Le constituant caractérisant du ciment portland	/	Instable dans l'eau ; vulnérable à l'attaque des sulfates.	caractérisant la couleur grise du ciment



**Figure III.2:** Réactivité des quatre constituants du ciment. La courbe « overall » représente une composition moyenne des constituants de ciment (55 % C<sub>3</sub>S, 18 % C<sub>2</sub>S, 10 % C<sub>3</sub>A, 8 % C<sub>4</sub>AF) [118].

### III.10 Importance d'un ajout minéral dans l'industrie du ciment

L'utilisation des ajouts minéraux pour la fabrication des ciments composés de type CPJCEMII dans les cimenteries, devient un moyen important pour réaliser les buts suivants :

- 1- Réduction la consommation de l'énergie lors de la fabrication du ciment ;
- 2- Amélioration des caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques du ciment ;
- 3- Utilisation des coproduits industriels tels que le laitier, les cendres, les fillers de calcaire dans les carrières permet d'éviter un problème écologique majeur [117].

Le développement local est étroitement associé à la consommation de ciment. Au cours des dernières années en Algérie, le besoin en ciment a considérablement augmenté, résultant du programme de relance économique et des travaux majeurs entrepris (l'autoroute entre l'est et l'ouest, la création de millions de logements avec les installations d'accompagnement, etc.). Deux groupes sont actuellement en charge de la production du ciment en Algérie. Le secteur public (Groupe Industriel Des Ciments D'Algérie GICA), ainsi que le secteur privé (Groupe LafargeHolcim-Algérie) [115]. Le tableau III.5 présente les cimenteries Algériennes et les matériaux utilisés comme des ajouts.

**Tableau III.5:** Cimenteries Algériennes et les ajouts utilisés [115].

	Entreprise	Wilaya	Commune	Capacité de production (tonnes)	Ajout utilisé	% d'ajout
Groupe industriel Des Ciments D'Algérie (GICA)	ERCE	Sétif	Ain Elkebira	1.000.000	Pozzolane	10 à 20
		Batna	Ain touta	1.000.000	Pozzolane	10 à 20
		Constantine	Hamma Bouziane	1.000.000	Pozzolane	10 à 15
		Skikda	Hadjar Soud	950.000	Laitier	10 à 20
		Tebessa	Elmaa Labiadh	500.000	-----	-----
	ERCC	Alger	Rais Hamidou	450.000	Poussière	5 à 10
		Blida	Meftah	1.000.000	Tuf	10 à 15
		Bouira	Sour Elghouzlane	1.000.000	Tuf-Calcaire	10
	ERCO	Ain Temouchent	Beni Saf	1.200.000	Pouzzolane	10 à 20
		Mascara	Zahana	1.200.000	Pouzzolane	10 à 20
		Saida	Hassasna	500.000	Pouzzolane	10 à 20
	ECDE	Chlef	Oued Sly	2.000.000	Calcaire	10 à 15
		Oum El Bouaghi	Sigus	2.000.000	-	-
	Lafarge Algérie	ACC	Msila	Hammam Edhlaa	4.000.000	Calcaire
Mascara			Oggaz	2.000.000	Pouzzolane	15
Biskra					-	-

### **III.11 Influence d'un ajout minéral (mâchefers) sur les caractéristiques physiques du ciment**

#### **III.11.1 Temps de prise**

L'incorporation des additions comme les MIRSU dans les ciments peut prolonger ou retarder la prise des ciments. En effet, si l'ajout provoquant une baisse de la demande en eau, une accélération de la prise est observée. L'accélération peut également être due à une réactivité rapide de l'addition. En revanche, lorsque l'addition entraîne une augmentation de la demande en eau, la prise est retardée. De plus, une réactivité lente peut entraîner un retard dans la prise [87].

Selon les travaux de Zhenzhou Yang et al (2018), sur l'incorporation de 10-50 % des mâchefers dans le ciment, ils ont trouvé que la demande en eau des composites de ciment avec les ajouts de mâchefers est réduite, et les temps de prise initial et final sont légèrement retardés par rapport à l'échantillon référent, et ça peut être attribué à la teneur élevée en métaux lourds dans les mâchefers [19].

Ana Mafalda Matos et al (2022), ont trouvés que les temps de prise sont retardés lors de substitution du ciment par 10 % de mâchefers [14].

#### **III.11.2 Stabilité (expansion)**

Selon la norme EN 197-1 [20], l'expansion admissible des ciments courants est de 10 mm. L'expansion est principalement liée à la teneur de la chaux libre et du gypse dans le ciment. D'après les recherches effectuées, la stabilité du ciment contenant les mâchefers reste comparable à celle du ciment control, elle est de l'ordre de 2 mm [14].

### **III.12 Influence d'un ajout minéral (mâchefers) sur les caractéristiques du mortier**

#### **III.12.1 Maniabilité (Etalement)**

La maniabilité d'un mortier fraîchement malaxé est la caractéristique qui détermine sa facilité d'installation et de vibration. Toutefois, c'est également une caractéristique qui impacte la qualité du produit final. Il est essentiel que le mortier possède une maniabilité adéquate afin de pouvoir être serré et de garantir une résistance mécanique accrues [119]. Dans la littérature, on trouve que la maniabilité du ciment contenant les mâchefers dépend à la quantité d'eau demandé. Selon Ana Mafalda Matos et al (2022), la maniabilité des mortiers contenant 10 % et 20 % de mâchefers est de l'ordre de 200 et 195 mm respectivement, elle reste comparable avec celle du mortier control (199 mm) [14].

Hongrong Li et al (2023), ont trouvé que la maniabilité des ciments contenant 0 %, 10 %, 20 %, 30 % et 40 % de MIRSU était respectivement de 250, 240, 230, 225 et 220 mm .Les mâchefers sont légers, ont une surface rugueuse et une forte absorption d'eau. Au cours du

processus de mélange, les mâchefers ont absorbés une partie de l'eau, ce qui a entraîné une diminution de la maniabilité [120].

### **III.12.2 Résistance mécanique**

Les résistances mécaniques sont principalement influencées par la quantité d'eau, la composition et la quantité de ciment, le type et la quantité d'agrégats et la méthode de durcissement. L'étude de l'impact des matériaux de substitution au ciment, comme les MIRSU, sur les résistances mécaniques du mortier a été riche en recherches [121]. L'utilisation des mâchefers réduit les résistances à la flexion et à la compression à court et à long terme, et la réduction de la résistance augmente avec l'augmentation de la quantité de mâchefers dans le ciment [17], [19], [22]. Cette diminution des résistances est due à la faible activité pozzolanique des mâchefers et à sa grande porosité par rapport à d'autres ajouts. Tang et al (2015) utilisent les mâchefers comme remplacement du ciment dans les mortiers avec un pourcentage varie de 10 à 30 %. Ils ont trouvés que l'utilisation des mâchefers diminue les résistances à la flexion et à la compression, et que la réduction des résistances augmente avec la quantité de mâchefers. La diminution des résistances à la flexion et à la compression des mortiers contenant des mâchefers est d'environ 20 à 50 %, en fonction de leur dosage [22]. Zhenzhou Yang et al (2018), ont utilisé 10-50 % de mâchefers comme remplacement du ciment, afin de garantir les propriétés mécaniques des ciments composites, ils ont trouvé que le taux maximal de mâchefers remplacé est 20 % [19].

### **III.13 Conclusion**

Le procédé de fabrication du ciment, la description des matières premières habituellement utilisées, la cuisson du mélange crus, le clinker obtenu, les phases du clinker, ainsi que l'hydratation des phases du ciment ont été détaillé dans ce chapitre. L'utilisation des ajouts minéraux dans l'industrie cimentaire permet d'économiser le cout et l'énergie fournie lors de la production de ciment. L'analyse des résultats de la littérature indique bien que les MIRSU est un ajout minéral inerte. Lorsqu'il est introduit en grande proportion dans le ciment, il affecte les propriétés chimiques et physiques des ciments préparés, ainsi que les propriétés mécaniques des mortiers étudiés. Cet effet varie d'une étude à une autre selon la composition chimique des mâchefers, la finesse du liant, et le rapport eau/ciment. Nous avons constaté que les travaux menés jusqu'à présent, concernant la valorisation des MIRSU comme ajout dans le ciment, ne portaient pas suffisamment sur l'effet de la composition chimique des mâchefers sur les caractéristiques du ciment à l'état frais et à l'état durci. De plus, nous avons observé une insuffisance des études sur l'utilisation des MIRSU comme matière première pour la préparation du clinker.

L'objectif du travail expérimental est la connaissance de la composition des RSU de la ville de Chlef et étude la possibilité de leur traitement par incinération. L'évaluation du potentiel d'utilisation des MIRSU comme ajout dans la fabrication du ciment est aussi expérimenté. Pour cela, nous décrivons dans le chapitre suivant, la composition et les caractéristiques physico-chimiques des RSU (Commune de Chlef), le procédé d'incinération des RSU, les matériaux et les méthodes de caractérisation utilisées, ainsi que les différents mélanges de pâtes des ciments et de mortiers.

**PARTIE 02**  
**MATERIELS ET METHODES**

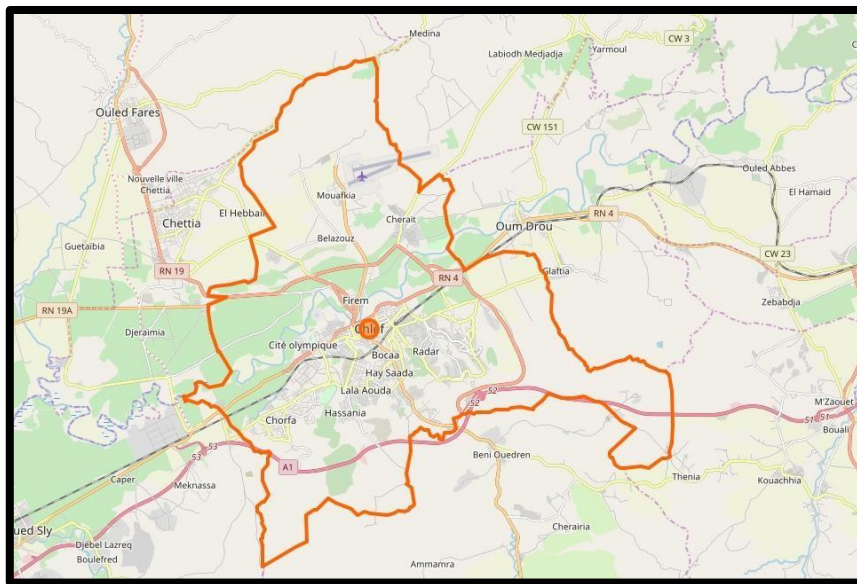
## **Chapitre I : Méthodes de caractérisation physico-chimique des résidus solides urbains de la commune de Chlef**

### **I.1 Méthodes de caractérisation des résidus solides urbains**

#### **I.1.1 Zone d'étude**

La commune de Chlef est une municipalité de la Wilaya de Chlef, localisée dans le nord de l'Algérie. Au Nord, elle est limitée par les municipalités d'Ouled Fares et de Labiod Medjadja, à l'Ouest par la municipalité de Chettia, au Sud-Ouest par la municipalité d'Oued Sly, au Sud par la municipalité de Sendjas, au Sud-Est par la municipalité de Harchoun et à l'Est par la municipalité d'Oum Drou.

La municipalité de Chlef, illustrée dans la figure I.1, s'étend sur une surface de 124 km<sup>2</sup> et abrite une population de 289 500 individus, ce qui équivaut à une densité de population de 2 227 habitants par kilomètre carré.



**Figure I.1** : Carte localisant la commune de Chlef [122].

Cette population est répartie en huit zones, chacune étant composée de plusieurs secteurs (cf. tableau I.1) [122].

**Tableau I.1 : Zonage et sectorisation de la commune de Chlef [123].**

Zones	Centre-ville	Ouled Mohammed	Salam	Horia	Chorfa	Mouafkia	Bradai	Chegga
Secteurs	- Centre-ville Ouest	- Cité Radar	- Cité Salam	- Cité Horia	-Chorfa 02	- Cité Mouafkia	- Cité Bradai	- Cité Chegga
	- Centre-ville Est	Zebboouj	-Cité frère Abbad		-Chorfa 03			
	- Centre-ville nuit	Mohamed	- Cité Mossalaha					
	- RN 04	Ouled						
	- Cité Arrouj	Mohamed						
	- Cité Benssouna							
	- Nouvelle ville cité Benssouna							

## **I.2 Echantillonnage**

### **I.2.1 Organisation**

Afin de suivre l'évolution de la composition des résidus solides urbains (RSU) dans la commune de Chlef au fil du temps, des campagnes de caractérisation saisonnières des RSU ont été menées pendant deux années consécutives (2018 et 2019) selon trois étapes distinctes :

#### **I.2.1.1 Prélèvement de l'échantillon**

Un échantillon représentatif de 200 kg de déchets a été prélevé au Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Meknassa après un quartage. Ensuite, l'échantillon a été transporté vers la plate-forme de tri-compostage située à la station agronomique de l'Ardh Elbaydha, à 21 km du CET de Meknassa [3].

#### **I.2.1.2 Tri des déchets**

Le tri des RSU est réalisé à l'aide d'une table de tri conformément au protocole MODECOM (mode de caractérisation des ordures ménagers) en utilisant deux méthodes de tri distinctes [124].

- **Par taille**

Le tri par taille s'effectue à l'aide de la table de tri (figure I.2) en tenant compte des diamètres spécifiques de chaque bac. – les gros (> 100 mm) ; -les moyens (20-100 mm) ; - les fins (< 20 mm). Pendant cette étape de tri, le lot de 200 kg a été divisé en 4 sous-lots de 50 kg afin de simplifier le processus de tri manuel. Chaque sous-échantillon de 50 kg est déchargé sur la table de tri afin de subir le tamisage illustré à la figure I.2 : Tri des objets de grande taille (> 100 mm). Tri des moyens (20 à 100 mm) ; Récupération des fins (< 20 mm).



**Figure I.2** : Table de tri des RSU.

- **Par catégories**

Les RSU de grande et moyenne taille sont ensuite classés en catégories : putrescibles, papiers, cartons, composites, textiles, textiles sanitaires, plastiques, combustibles non classés, verre, métaux, incombustibles non classés et déchets spéciaux (MODECOM, 1993).

### **I.2.1.3 Analyses physico-chimiques des RSU**

- **Densité**

La densité ou la masse volumique, est mesurée en remplissant un récipient de 10 litres, préalablement pesé à vide, avec un échantillon hétérogène des RSU sans tassement, puis en pesant à nouveau le récipient. Les mesures sont réalisées à l'aide d'une balance de précision de  $\pm 0,1$  g [31]. La masse volumique est calculée selon l'équation I.1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (I.1)$$

Avec :

$\rho$  : masse volumique en  $\text{kg/m}^3$

m: masse de l'échantillon en kg ;

V: volume de récipient en m<sup>3</sup>.

- **Humidité (% H)**

La méthode employée implique le séchage d'une masse de 100 g de différentes catégories des RSU à une température de 105 °C dans une étuve (Mettler) pendant 24 heures (figure I.3), jusqu'à l'atteinte de la constante du poids, conformément à la norme NF U 44-171. Le taux d'humidité est calculé en fonction de la variation de poids de l'échantillon avant et après le processus de séchage, conformément à l'équation (I.2). Les analyses sont effectuées en triple afin d'assurer une bonne représentativité [31].

$$\% H = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad (I.2)$$

Avec :

% H : pourcentage d'humidité,

M<sub>0</sub> : masse de l'échantillon humide (g),

M<sub>1</sub> : masse de l'échantillon séché (g).



**Figure I.3** : Séchage des RSU.

- **Matière organique (% MO)**

La norme NF U 44-160 a été appliquée pour évaluer le taux de matière organique. Le protocole implique la calcination de 25 g de différentes catégories des RSU, préalablement séchés, à 550 °C pendant 2 heures dans un four à moufle (figure I.4). Le taux de matière organique (% MO) ou de solide volatil est déterminé par la différence de poids entre la masse du déchet avant et après calcination selon l'équation I.3 [31]. Les analyses sont réalisées en triple pour garantir une bonne représentativité.

$$\% M = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad (I.3)$$

Avec :

% MO : pourcentage de matière organique dans l'échantillon,

$M_0$  : masse de l'échantillon séché à 105 °C,

$M_1$  : masse de l'échantillon après calcination.



**Figure I.4 :** Calcination des RSU.

## Chapitre II : Méthodes d'incinération et de caractérisation des mâchefers

### II.1 Incinération des RSU

#### II.1.1 L'entreprise GREEN SKY de l'incinération

GREEN SKY est une société algérienne qui se spécialise dans la collecte, l'emportage, la préparation, le transport, le prétraitement, ainsi que le traitement des déchets spéciaux et dangereux depuis 2010. Cette entreprise est située dans la zone industrielle d'Oued Sly. Dans le cadre de notre recherche, l'incinérateur de GREEN SKY a été employé pour le traitement par incinération des déchets solides urbains de la commune de Chlef.

#### II.1.2 Incinérateur

L'incinérateur à four rotatif (KALFRISA) a été utilisé pour l'incinération des RSU, il est composé d'une chambre de combustion, une chambre de postcombustion et une cheminée d'évacuation des gaz (figure II.1).



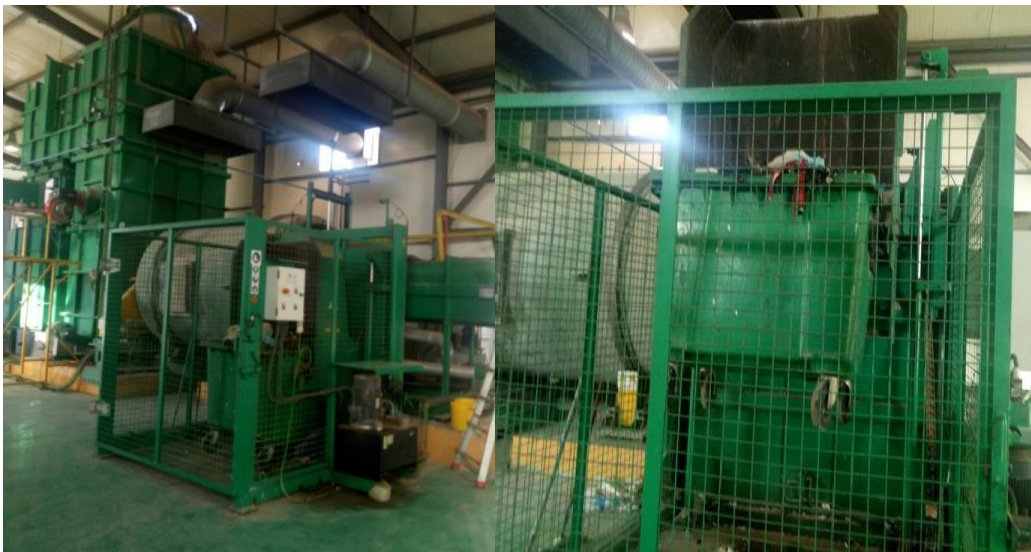
Figure II.1 : Incinérateur rotatif.

#### II.1.3 Incinération des RSU de la commune de Chlef

Une tonne des RSU et 500 kg des RSU organiques séchés à l'air libre (putrescibles, papiers, cartons) ont été incinérés dans le four d'incinération.

Les RSU sont introduits dans la chambre d'incinération par le biais d'un alimentateur mécanique (figure II.2). La chambre est le lieu où l'incinération des déchets se déroule par

apport de chaleur provenant d'un brûleur et par injection de la quantité d'air requise pour une combustion complète. La chambre effectue une rotation contrôlée afin d'homogénéiser la charge et le processus d'incinération. Les gaz générés lors de l'incinération sont combustibles et possèdent un pouvoir calorifique élevé. Ils sont conduits vers la chambre de postcombustion où ils se combinent à la quantité d'air requise pour leur oxydation complète. Le mélange est effectué dans des conditions de forte turbulence afin d'optimiser le rendement de la réaction. La chaleur requise pour l'oxydation est fournie par un brûleur assurant une température de postcombustion conforme à la directive relative à l'incinération des déchets.



**Figure II.2** : Incinérateur Green Sky de la zone industrielle, Chlef.

## **II.2 Méthodes de caractérisation des mâchefers d'incinération des RSU**

### **II.2.1 Echantillonnage et quartage**

Après l'incinération des RSU, deux types de mâchefers (figure II.3) ont été obtenus : mâchefers d'incinération des résidus solides urbains de type 1 (MIRSU1) et mâchefers d'incinération des résidus solides urbains de type 2 (MIRSU2). Un échantillon représentatif de ces mâchefers a été préparé pour les essais en appliquant la méthode de quartage (figure II.3).



**Figure II.3** : Mâchefers d'incinération des RSU (a. MIRSU1 ; b. MIRSU2).

### II.2.2 Analyse granulométrique

La séparation granulométrique en huit fractions a été effectuée à partir de 1 kg de chaque type de mâchefers. Ce tri granulométrique par tamisages a été réalisé à l'aide d'une tamiseuse SIEVE SHAKER (figure II.4) à vibration, en utilisant des tamis de mailles de 40,10, 5, 2, 1, 0,5, 0,250, 0,125 et 0,080 mm.



**Figure II.4** : Tamiseuse SIEVE SHAKER.

### II.2.3 Broyage des mâchefers

Afin d'obtenir des mâchefers dont la taille des particules ne dépasse pas 80  $\mu\text{m}$ , il est nécessaire de broyer l'échantillon dans un broyeur à boulets selon la figure II.5.



Figure II.5 : Broyage des mâchefers.

#### II.2.4 Surface spécifique Blaine (SSB)

La Surface Spécifique Blaine (SSB) est évaluée selon la norme NF EN 196-6 [125], en mesurant le temps requis pour qu'une quantité fixe d'air traverse un lit de ciment compacté ayant des dimensions et des porosités spécifiques. En conditions standard, la surface spécifique du ciment est directement proportionnelle à la racine carrée de  $t$ , où  $t$  désigne le temps nécessaire pour qu'une quantité fixe d'air traverse un lit de ciment compacté. Cette approche est davantage comparative que absolue, d'où la nécessité d'utiliser un échantillon de référence avec une surface spécifique connue pour calibrer l'appareil. Les Surfaces Spécifiques Blaine des ciments et les mâchefers sont mesurées à l'aide d'un appareil de Blaine (figure II.6).

La surface spécifique ( $S$ ) est déterminée par l'équation (II.1) :

$$S = \frac{k}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{1-e} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \times \eta}} \quad (\text{II.1})$$

Avec:

$K$  : constante de l'appareil ;

$e$  : porosité du lit ;

$t$  : temps mesuré en secondes (s) ;

$\rho$  : masse volumique du ciment en grammes par centimètre cube ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ;

$\eta$  : viscosité de l'air à la température de l'essai, en pascals. Secondes (Pa.s).

La constante de l'appareil  $K$  est calculée selon l'équation II.2

$$K = \frac{S_0 \times \rho_0 \times (1-e) \times \sqrt{10 \times \eta}}{\sqrt{e^3} \times \sqrt{t_0}} \quad (\text{II.2})$$

Avec:

$S_0$  : Surface spécifique du ciment de référence en centimètres carrés par gramme ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) ;

$\rho_0$  : masse volumique du ciment de référence en grammes par centimètre cube ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ;

$t_0$  : moyenne des trois mesures de temps en secondes (s) ;

$\eta_0$  : viscosité de l'air à la moyenne des trois températures en pascals.secondes (Pa.s).



**Figure II.6** : Appareil Blaine.

### **II.2.5 Masse volumique**

La masse volumique des mâchefers broyés est déterminée à l'aide d'un pycnomètre (figure II.7), en utilisant le benzène comme solution inerte. Le protocole suivi est détaillé en annexe 02 conformément à la norme NF P15-435[126]. La masse volumique est calculée par l'équation II.3 :

$$\rho = \frac{m \times \rho_k}{m + m_4 - m_3} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$m$  : masse de l'échantillon testé ( $m = m_2 - m_1$ ) ;

$m_1$  : masse du pycnomètre sec et vide, y compris le bouchon ;

$m_2$  : masse du pycnomètre sec avec échantillon et bouchon ;

$m_3$  : masse du pycnomètre fermé avec échantillon et le liquide de mesure ;

$m_4$  : masse du pycnomètre fermé avec le liquide de mesure ;

$\rho_k$  : masse volumique du benzène à la température testée.



**Figure II.7 :** Pycnomètre.

## **II.2.6 Caractérisation chimique et minéralogique**

### **II.2.6.1 Composition chimique de la poudre des mâchefers**

La solution à analyser a été préparée par fusion de 0,5 g de la poudre de mâchefers mélangée avec 1,5 g de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) dans un four à moufle à 1000 °C pendant 1 heure. Une fois la fusion terminée, l'échantillon fondu a été dissous dans l'acide chlorhydrique (HCl), et la méthode standard de test du ciment a été suivie pour l'analyse des oxydes chimiques dans la solution [127]. Le mode opératoire détaillé est décrit en annexe 03.

### **II.2.6.2 Minéralisation**

Les concentrations de métaux lourds ont été mesurées suite à une digestion acide réalisée par micro-ondes. Des échantillons de 250 mg de mâchefers tamisés à une taille de 80  $\mu\text{m}$  ont été exposés à du peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) dans des tubes, puis placés sous une hotte pendant 24 heures afin de dégrader la matière organique. Par la suite, 6 mL d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$  69 %) et 3 mL d'acide chlorhydrique (HCl 36 %) ont été introduits aux échantillons, lesquels ont été ensuite placés dans un four à micro-ondes Multiwave GO (Anton Paar) (figure II.8) et chauffés à 180 °C pendant une durée d'une heure, avec une rampe de chauffe de 0 à 180 °C atteinte en 40 minutes. Suite à cette phase préliminaire, 2 mL d'acide fluorhydrique (HF 39,5 %) ont été ajoutés à la solution. Après avoir atteint la température ambiante, l'excès d'acide fluorhydrique est neutralisé en ajoutant 6 mL d'acide borique ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) à une concentration de 55  $\text{g.L}^{-1}$ . Ensuite, les tubes sont réchauffés à une température de 160 °C pendant une durée de 30 minutes. Par la suite, les échantillons sont transférés dans des fioles jaugés de 50 mL, complétés jusqu'au trait de jauge avec l'eau ultra pure. Par la suite, les solutions obtenues ont été soumises à une filtration à 0,45  $\mu\text{m}$  (matériau en Nylon) avant d'être soumises à l'analyse [128].



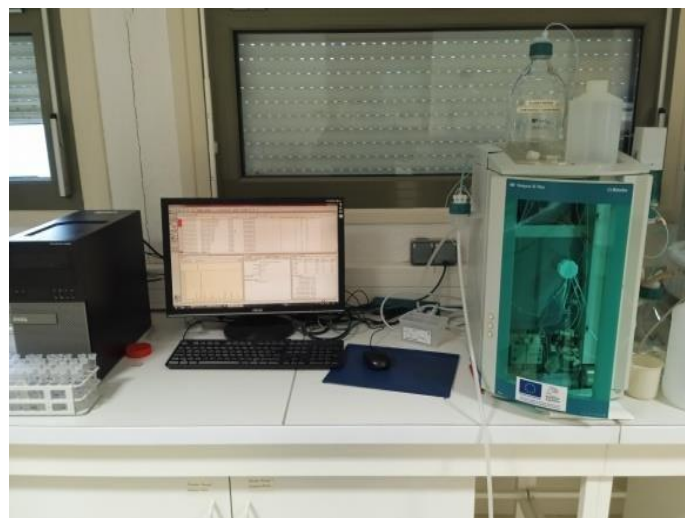
**Figure II.8:** Microondes Multiwave GO (Anton Paar).

### **II.2.6.3 Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS)**

L'ICP-MS est une méthode de spectrométrie de masse qui utilise une torche à plasma à couplage inductif (ICP) comme source d'ionisation. Cette méthode d'analyse permet de détecter les éléments traces présents à des concentrations faibles.

### **II.2.6.4 Chromatographie ionique (CI)**

La chromatographie ionique (CI) illustrée dans la figure II.9, est utilisée pour quantifier les ions contenus dans les éluats après leur séparation sur une colonne contenant une résine échangeuse d'ions en tant que phase stationnaire. La capacité de rétention des ions par la résine dépend à la fois de leur taille et de leur charge. Ainsi, le temps de rétention varie en fonction de chaque espèce ionique. La solution à étudier est injectée dans la colonne et est transportée par une phase mobile (éluant). Un dispositif de mesure de la conductivité électrique positionné à la sortie de la colonne est utilisé pour quantifier les espèces ioniques présentes dans l'échantillon liquide [100].



**Figure II.9 :** Appareil chromatographie ionique (IC, Metrohm).

### **II.2.6.5 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)**

La spectroscopie IRTF a été utilisée pour l'analyse des mâchefers sous forme des pastilles préparés par mélange 100 mg de KBr et 2 mg de l'échantillon de mâchefers broyé et séché. Les analyses ont été réalisées sur un spectromètre infrarouge Thermo-Scientific Nicolet 8700 spectrometer (USA). Les spectres FTIR ont été enregistrés dans la gamme des nombres d'ondes 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  avec une résolution de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

### **II.2.6.6 Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX)**

La diffraction des rayons X est une technique utilisée pour caractériser les matériaux cristallins. Elle est applicable aux matériaux cimentaires, aux roches. Etc. Dans cette étude, la DRX est appliqué sur les échantillons des mâchefers à l'aide d'un diffractomètre Rigaku (figure II.10). Les échantillons de mâchefer sont disposés sur des porte-échantillons de sorte à avoir une surface bien plane. Les spectres sont détectés avec un rayonnement  $\text{Cu K}_\alpha$  ( $\lambda = 1,54059 \text{ \AA}$ ), un angle de détection compris entre 5 et 90 ° (2 theta) et un pas de 0,01. Les phases minérales sont détectées en analysant les spectres à l'aide d'un logiciel X'Pert HighScore Plus.



**Figure II.10** : Appareil diffraction des rayons X (XRD, Rigaku Miniflex 600).

### **II.2.6.7 Perte au feu**

La perte au feu a été évaluée en enflammant les mâchefers à une température de  $950 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$  dans un four à moufle (figure II.11), conformément à la norme EN 196-2 [129].



**Figure II.11** : Four à moufle.

#### **II.2.8.8 Analyse environnementale**

La lixiviation « batch » a été réalisée en triplicats sur des échantillons de 20 g, conformément à la norme EN 12457-2 [130]. Les échantillons ont été mélangés avec de l'eau ultra pure selon un rapport massique L/S = 10 (L/kg) dans des flacons en polypropylène de 0,5 L. Ces mélanges sont agités à l'aide d'un éluteur rotatif pendant 24 heures. Ensuite, les lixiviats sont soumis à un filtrage à travers un filtre à membrane en cellulose de porosité de 0,45  $\mu\text{m}$ . Par la suite, les cations présents dans les lixiviats sont analysés à l'aide de la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS), tandis que les anions sont analysés par chromatographie ionique (CI). Les éléments qui ont été analysés sont les suivants : Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Mg, Na, Pb, Zn, les chlorides et les sulfates [100].

## **Chapitre III : Préparation des ciments avec la poudre de mâchefers**

### **III.1 Présentation de la cimenterie de Chlef**

L'entreprise des ciments et dérivés d'Ech-chèliff (ECDE) est localisée dans la zone industrielle de Oued Sly à environ 9 km au sud-ouest de la ville de Chlef. Cette société par actions (SPA) est établie par le Décret n°82/325 du 30 octobre 1982, à la suite de la restructuration de la Société Nationale des Matériaux de Construction (SNMC). Elle a acquis le statut d'entreprise publique économique autonome par le biais d'un acte notarié daté du 9 octobre 1989. Les activités de cette société consistent à produire et à vendre du ciment portland artificiel (CPA), du ciment portland aux ajouts (CPJ) et du ciment résistant au sulfate (CRS).

La capacité de production de ciment de la cimenterie de 'Oued Sly est de quatre millions de tonnes par an, répartie sur trois lignes de production. La cimenterie est équipée d'un laboratoire d'analyse chimique et physique qui est utilisé pour effectuer un contrôle précis de la composition chimique des matières premières, du clinker et du ciment, ainsi que des propriétés physiques et mécaniques du ciment. Chaque année, l'ensemble de l'équipement utilisé pour les analyses est calibré par un organisme spécialisé.



**Figure III.1 :** Cimenterie de Chlef

### **III.2 Matériaux utilisés**

#### **III.2.1 Ciment de la cimenterie de Chlef**

Le ciment CEM I 42.5 N de l'Entreprise des Ciments et Dérivés d'Ech-chèliff (ECDE) ou la cimenterie de Chlef (figure III.2) a été utilisé. Sa surface spécifique Blaine est de 3732 cm<sup>2</sup>/g et sa densité est de 3.06 g/cm<sup>3</sup>.



**Figure III.2:** Ciment I 42.5 N de la cimenterie de Chlef.

### **III.2.2 Clinker CRS**

Le clinker CRS (figure III.3) de couleur grise provenant de la cimenterie de Chlef est utilisé pour la préparation des ciments.



**Figure III.3 :** Clinker CRS

### **III.2.3 Gypse**

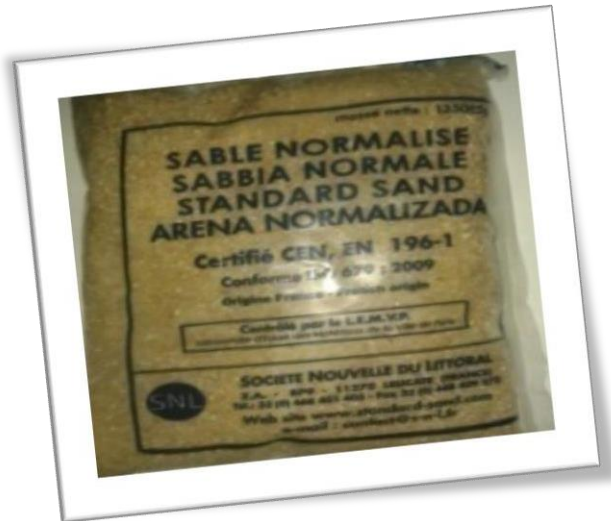
Le gypse est une roche sédimentaire composée de sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ). Le gypse provenant de la carrière de Bouzghaia, Chlef est employé pour contrôler le temps de prise du ciment dans cette étude expérimentale. Il se distingue par sa teinte blanche (figure III.4).



**Figure III.4** : Gypse

### **III.2.4 Sable**

Le sable utilisé est un sable normalisé (figure III.5). L'analyse granulométrique du sable est présentée dans la figure III.6.



**Figure III.5** : Sable normalisé

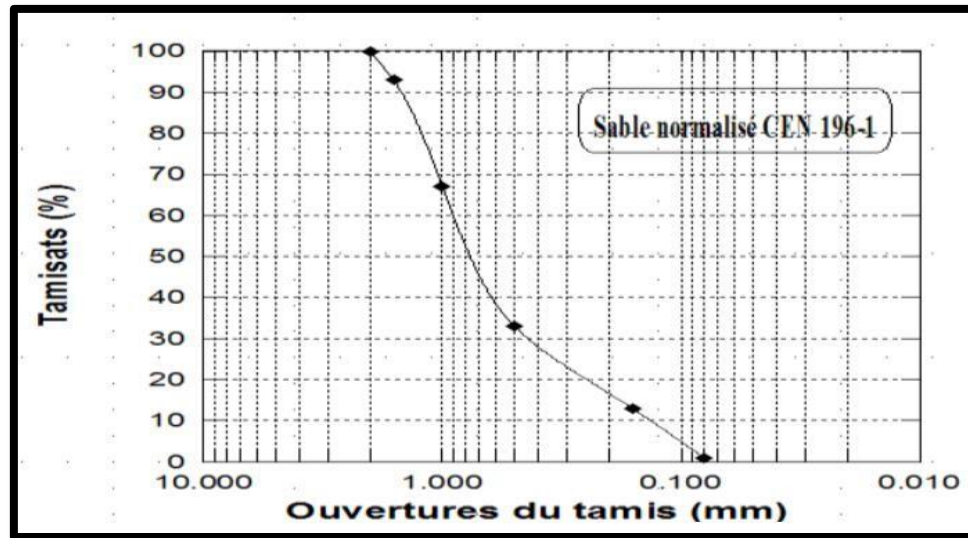


Figure III.6: Granulométrie du sable normalisé [131].

### III.3 Matrices des ciments préparés

Les proportions de chaque matériau utilisé pour la préparation des différents ciments sont présentées dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Proportions des matières dans les ciments préparés.

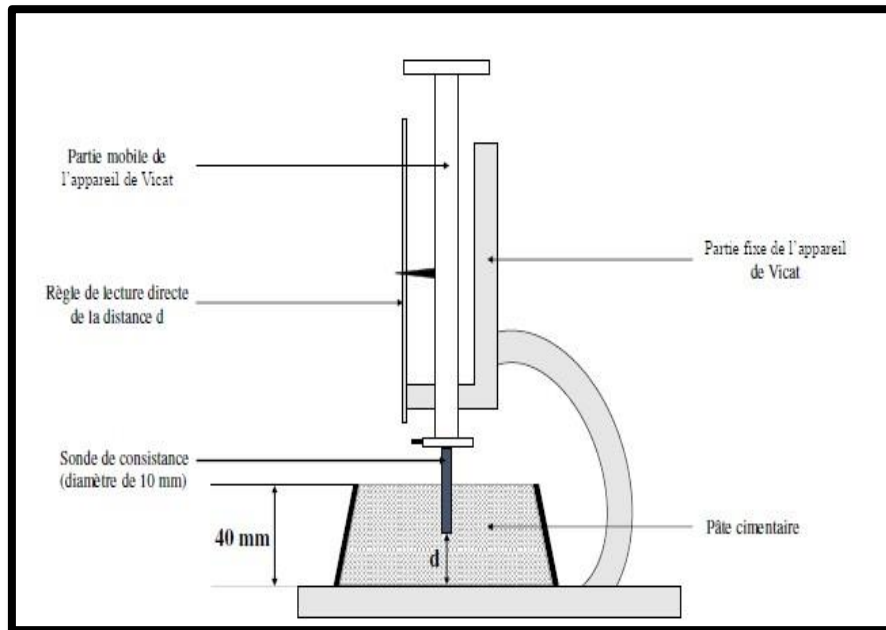
	Clinker	Ciment	Mâchefers	Gypse
CRS	96	/	/	4
CRS5 %	91	/	5	4
CEM5 %	/	95	5	/
CEM10 %	/	90	10	/
CEM20 %	/	80	20	/

### III.4 Préparation des pâtes

#### III.4.1 Demande en eau

La quantité d'eau requise pour obtenir une consistance normale est établie conformément à la norme EN 196-3 [132]. La méthodologie adoptée implique de mélanger 500 g de ciment avec diverses quantités d'eau dans un malaxeur pendant trois (03) minutes. Suite au mélange, une quantité de la pâte obtenue est versée dans un moule tronconique placé sur une plaque en verre, nivelée, puis placée sur le support de l'appareil de Vicat (figure III.7). Quatre (04) minutes plus tard, la sonde est posée à la surface de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan, elle s'enfonce. Après 30 secondes d'attente, la sonde est immobilisée, la distance « d » séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base est mesurée. La teneur

en eau choisie est celle permettant d'obtenir une distance  $d = 6 \pm 1$  mm entre l'extrémité de la sonde et la plaque de base [87].



**Figure III.7 :** Appareil de Vicat [107].

#### **III.4.2 Temps de prise**

Le temps de prise est évalué conformément à la norme EN 196-3 [132] en utilisant un dispositif automatique de Vicat de la marque CONTROLAB (figure III.8). L'appareil Vicat est pourvu d'une aiguille d'un diamètre de 1,13 mm. Une pâte de consistance standardisée est préparée et délicatement déposée dans le moule tronconique placé sur une plaque de verre, sans subir de tassement ou de vibrations, le moule est conservé en eau à 20 °C. Ensuite, l'aiguille est relâchée dans la pâte sans mouvement. Lorsque l'aiguille s'immobilise à une distance  $d = 4 \text{ mm} \pm \text{mm}$  du fond du moule, on considère que le processus de prise a débuté. Le temps écoulé depuis le début du malaxage est désigné sous le terme de temps de début de prise. Le temps de fin de prise correspond au moment où la pénétration de l'aiguille est limitée à 0,5 mm [87].



Figure III.8 : Appareil de Vicat automatique.

### III.4.3 Test d'expansion à chaud

Le test d'expansion pour évaluer la stabilité est effectué selon la norme EN 196-3[132]. L'objectif est de préparer une pâte avec une consistance standardisée, qui sera par la suite moulée dans le moule de Chatelier (figure III.9). Après avoir été rempli, le moule est placé dans une salle pendant une période de 24 heures, durant laquelle le taux d'humidité est maintenu à  $90 \% \pm 5 \%$  et la température à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . À l'issue de cette période, la distance A séparant les extrémités des aiguilles est mesurée avec une précision de 0,5 mm. Par la suite, le moule est immergé dans un bain d'eau maintenu à une température de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , puis porté à ébullition pendant environ 03 heures. La distance entre les pointes des aiguilles une fois que le moule s'est refroidi jusqu'à une température de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , est représentée par la lettre B. La stabilité S est caractérisée par l'écart entre les valeurs de B et de A selon l'équation III.1 [87].

$$(mm) = B - A \text{ (III.1)}$$

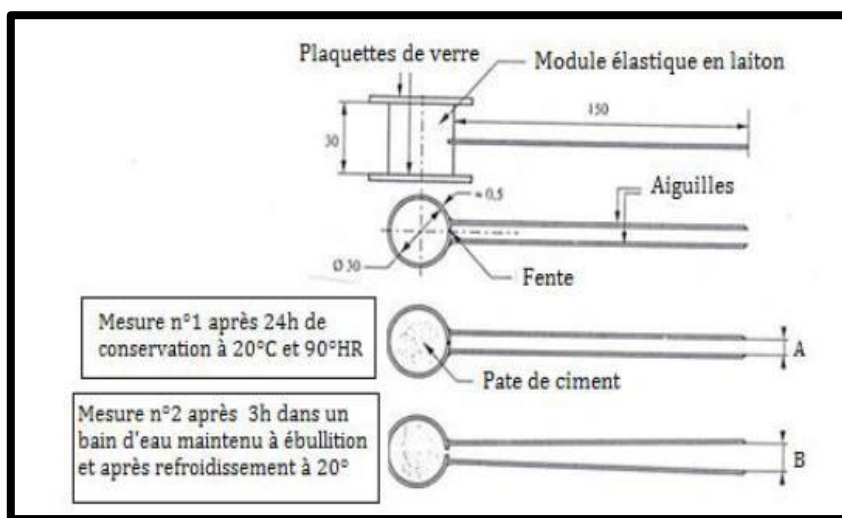


Figure III.9 : Moules de Chatelier utilisé pour la mesure de l'expansion des ciments [145].

### **III.4.4 Préparation des mortiers**

Un mélange de 450 g de ciment et de 1350 g de sable normalisé est combiné avec 225 g d'eau, selon un rapport E/C de 0,5, conformément à la norme EN 196-1[133]. Le mélange de ces composants a été réalisé à l'aide d'un malaxeur, tel qu'illustré dans la figure III.10. Le mélange est ensuite introduit dans des moules de dimensions 40×40×160 mm<sup>3</sup>, puis compacté à l'aide d'une presse à chocs. Les moules renfermant les échantillons sont recouverts d'un film plastique puis placés dans une enceinte humide maintenue à une température de 20 ± 1°C pendant une durée de 24 heures. Suite à cette étape, les briquettes sont démoulées puis placées dans une chambre humide (T = 20 °C, HR = 90 %) pendant des périodes de 2, 7, 28 et 90 jours.



**Figure III.10:** Préparation des mortiers.

### III.5 Propriétés des mortiers à l'état frais

#### III.5.1 Etalement

L'essai d'étalement est utilisé pour évaluer la capacité d'écoulement des échantillons de mortier qui seront utilisés pour fabriquer des éprouvettes des essais mécaniques. L'essai d'étalement conformément à la norme NF EN 1015-3[134] est effectué sur une table mobile munie d'un plateau plat relié par des charnières à une base rigide. Un moule en forme de tronc de cône, avec un diamètre à la base  $D_0$  de 10 cm, est placé au centre du plateau (figure III.11). Avant utilisation, il est nécessaire d'appliquer de l'huile sur le moule et le plateau. Le cône est progressivement rempli de mortier par strates successives, et chaque strate est compactée en effectuant des piquages à l'aide d'une tige. Le moule est soulevé verticalement sans aucun déplacement latéral, permettant ainsi au mortier de s'étaler sur la plaque métallique. En actionnant la manivelle, on effectue 15 cycles de chute. Chaque période a une durée comprise entre 01 et 03 secondes. La distance de chute du plateau mobile est de 15 mm. Les diamètres  $D_i$  occupés par le mortier étalé sur la table sont mesurés, puis l'étalement est calculé selon l'équation suivante [135].

$$E_{talement} = \frac{D_m - D_0}{D_0} \times 100 \quad (III.2)$$

Avec :

$D_m$  : le diamètre moyen du mortier étalé ;

$D_0$ : le diamètre de la base du moule tronconique.



**Figure III.11:** Etalement du mortier.

### **III.6 Propriétés des mortiers à l'état durci**

#### **III.6.1 Résistances mécaniques**

Les tests de flexion et de compression sont effectués sur des échantillons prismatiques en accord avec la norme EN 196-1 [133]. Les éprouvettes de dimensions  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  sont initialement soumises à un essai de flexion à 03 points, puis les demi-éprouvettes ainsi obtenues sont soumises à un test de compression jusqu'à la rupture. Les expérimentations ont été menées en utilisant une presse mécanique (figure III.12). Le logiciel de la presse se charge de l'acquisition des données. Il est noté que lors de cette analyse, un essai de flexion a été réalisé sur trois éprouvettes de chaque formulation, suivies par des tests de compression sur les six demi-éprouvettes obtenues [87].



**Figure III.12** : Presse mécanique.

#### **III.6.2 Absorption d'eau par capillarité**

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est effectué selon la norme EN 1015-18 [136], l'essai est réalisé sur des échantillons de mortier non saturés, lorsqu'ils sont en contact avec de l'eau sans application de pression hydraulique, en ne considérant que la pression atmosphérique.

L'essai de sorptivité consiste à évaluer le taux ou la vitesse d'absorption par capillarité d'une demi-éprouvette prismatique de dimensions  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . Cette éprouvette est positionnée sur un bac contenant de l'eau selon le schéma illustré dans la figure III.13, de manière à ce que l'eau n'entre en contact avec l'éprouvette que sur une hauteur de 5 mm à partir du fond du bac. Les autres faces de l'éprouvette sont préalablement rendues imperméables en les recouvrant de paraffine [117]. Ensuite, on mesure l'accroissement de la masse de l'échantillon en fonction du temps et en une période de 24 heures.

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation III.3 [87]:

$$Ca = \frac{Mx - M0}{S} \text{ (III.3)}$$

Avec :

Ca : Coefficient d'absorption capillaire en  $\text{kg/m}^2$ ;

Mx : Masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg) ;

M0 : Masse initiale de l'éprouvette (kg) ;

S : Section de l'éprouvette ( $\text{m}^2$ ) en contact avec l'eau.



**Figure III.13** : Essai d'absorption capillaire.

### **III.7 Clinkérisation**

Les matières utilisées pour la préparation du clinker sont le calcaire, l'argile, minerai de fer et mâchefers.

#### **III.7.1 Calcaire**

Le calcaire (figure III.14) est extrait de la carrière de Sidi Laroussi située à trois (03) kilomètres de l'usine. Cette carrière est réputée pour son important gisement de calcaire, ce qui en fait la plus significative.



**Figure III.14** : Calcaire

#### **III.7.2 L'argile**

L'argile (figure III.15) est essentielle dans le mélange utilisé pour la fabrication du ciment. L'extraction de l'argile se déroule à la carrière MAAMRIA située à six (06) kilomètres de l'usine, puis elle est acheminée par des camions jusqu'à la carrière de Sidi Laroussi, Chlef.



**Figure III.15** : Argile

### **III.7.3 Minerai de fer**

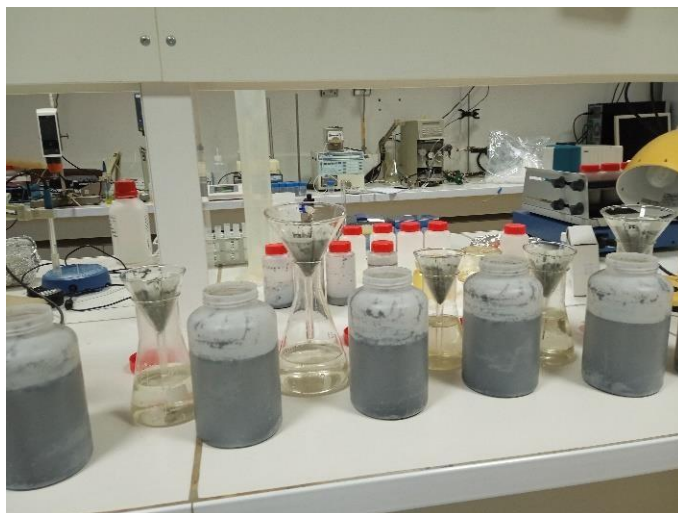
Le minerai de fer (figure III.16) provient des carrières de Rouina, Beni Saf et El Attaf, et il est acheminé par des camions jusqu'à la carrière de Sidi Laroussi.



**Figure III.16 :** Minerai de fer

### **III.7.4 Mâchefers**

Les mâchefers générés de l'incinération d'une tonne des RSU sont d'abord traités avant leur utilisation. L'eau ultrapure est utilisé pour le lavage des mâchefers avec un rapport L/S = 30 (figure III.17), le mélange est filtré et les mâchefers traités sont séchés [15].



**Figure III.17:** Lavage des mâchefers.

### **III.7.5 Clinker**

Le clinker Portland gris est utilisé comme référence.

**III.8 Méthode de préparation et calcul d'un mélange cru**

Pour la sélection des matières premières en vue de la préparation de la bonne chimie du mélange brut pour le processus de production de clinker, un calcul de mélange a été nécessaire pour obtenir la portion optimale de mâchefers utilisée avec les matières premières. L'application numérique de cette base de calcul est réalisée sur le logiciel EXCEL, qui est basé sur l'analyse chimique de chaque matière première et la variation des modules cimentiers (LSF, SR, et AF), selon la figure III.18 et l'annexe 04.

Dans cette recherche, les divers composants des crus ont d'abord été broyés individuellement jusqu'à l'obtention d'un résidu nul sur un tamis de 250 µm. Par la suite, ils ont été pesés pour obtenir 100 g du cru, selon les proportions déterminées par les optimisations (tableau III.2). Les matériaux ont subi une pré-homogénéisation grâce à un co-broyage rapide dans un broyeur, pendant 04 minutes.

RAW MEAL CALCULATION															
Raw Ma	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Cl	LOI	Total	Raw Material			
Limesto	4,62	0,73	1,15	51,58	0,69					40,65	99,42	81,74			
Clay	63,28	17,2	3,45	2,58	1,74					5,73	93,98	15,08			
Iron	31,22	3,22	43,84	8,38	0,46					12,08	99,2	1,18			
Bottom	38,16	5,57	1,83	28,05	0,34					21,79	95,74	2,00	LSF	SR	AR
Raw Me	14,45	3,34	2,01	43,21	0,84					34,669	98,52	100	94,51	2,7	1,66

Bogue's Equations			
C3S	C2S	C3A	C4AF
0	0	0	0

SR	COEFFICIENTS
2,70	a 1
	b 1
	c 1
	d 1
	e 100
	f 1,179
	g -11,473
	L

MATRIX	DETERMINANTS
DW	-3E+09
Dx	-5E+08
Dy	-4E+07
Dz	-6E+07
D	-3E+07

RAW MATERIALS %
LSF 94,51
SR 2,7
AR 1,66

**Figure III.18:** Tableur de calcul d'un mélange cru.

Les proportions des matières premières dans le mélange cru sont données dans le tableau III.2.

**Tableau III.2:** Proportions des matières premières dans le mélange cru.

	Cru 2 %	Cru 4 %	Cru 6 %	Cru 8 %
Calcaire (%)	81.74	80.64	79.58	78.61
Argile (%)	15.08	13.89	13.17	11.87
Minerai de fer (%)	1.18	1.47	1.25	1.53
MIRSU1 (%)	2.00	4.00	6.00	8.00

Les proportions des matières premières dans le cru industriel sont données dans le tableau III.3.

**Tableau III.3:** Proportions des matières premières dans le cru industriel.

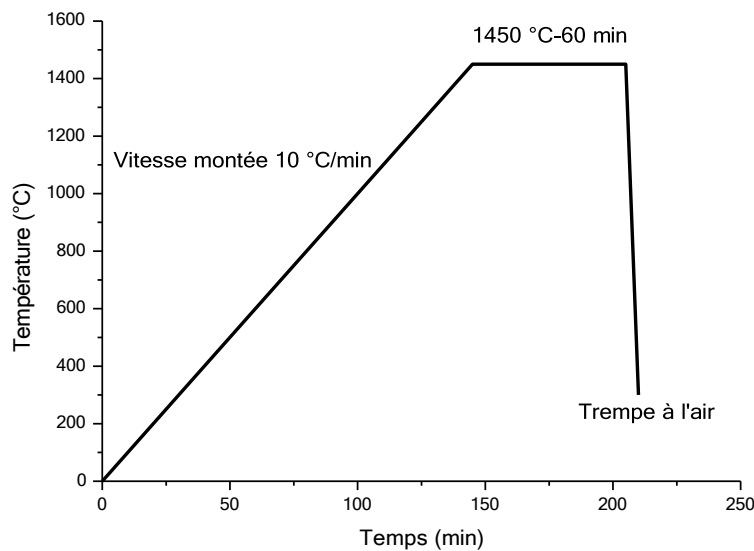
	Calcaire	Argile	Sable	Minerai de fer
Proportion (%)	79.17	16.36	3.53	0.94

### III.9 Clinkérisation

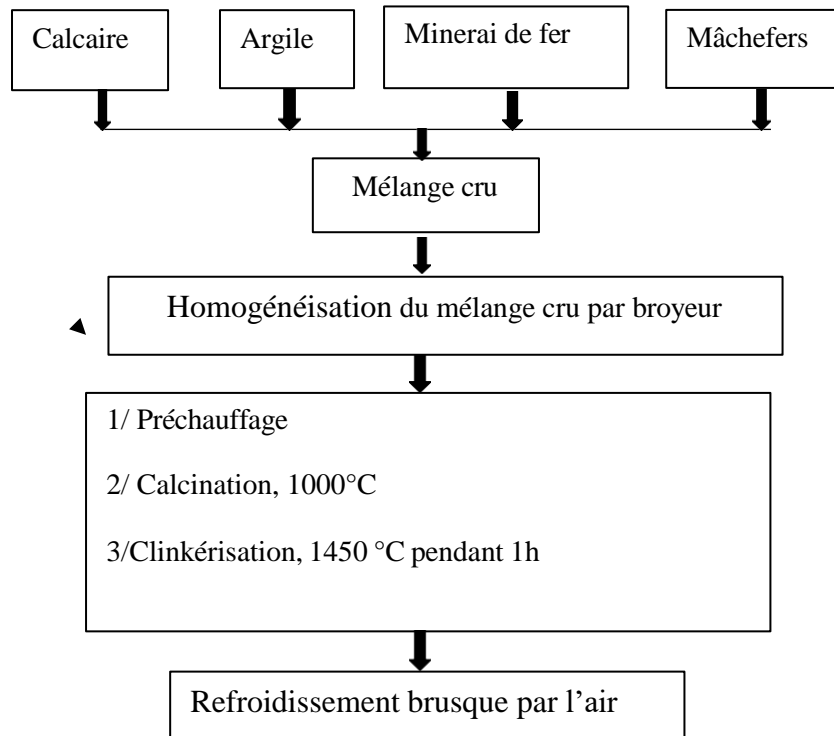
Des échantillons de crus pesant 32g et renfermant 2%, 4%, 6% et 8% de mâchefers sont disposés dans des creusets en platine, puis soumis à une cuisson dans un four à moufle (vitesse de chauffe 10°C/min) à une température de 1450°C pendant une durée d'une heure. Après la cuisson, les échantillons sont vite refroidis à la température ambiante (trempe à l'air). Les clinkers obtenus sont ensuite broyées en poudre et tamisés jusqu'à résidu nul à 100 µm pour les analyses chimiques et minéralogiques.

L'évolution de la température de la cuisson et le protocole suivi sont présentés dans les figures III.19 et III.20 respectivement.

Il faut noter que, les protocoles utilisés au laboratoire diffèrent par rapport aux procédés industriels (cuisson, rotation des fours, refroidissement).



**Figure III.19:** Température de clinkérisation.



**Figure III.20:** Etapes suivies pour la préparation et la cuisson des crus.

### III.5.3 Analyse de la chaux libre du clinker

La chaux libre se réfère à la chaux qui n'est pas liée aux constituants minéralogiques du clinker. Lorsque sa concentration dépasse 2 % dans un ciment, elle peut entraîner des gonflements et des fissurations dans le béton.

Afin d'effectuer l'analyse de la chaux libre, il convient de prélever 01 g de clinker, puis de le placer dans un erlenmeyer qui aura été préalablement séché dans une étuve.

On incorpore 50 mL de la solution d'éthylène glycol dans l'erlenmeyer, puis on le place dans un bain de sable pendant 30 minutes. Suite à cette étape, le mélange est filtré, puis la solution filtrée est titrée avec de l'acide chlorhydrique (0.1 N). Chaque changement de couleur, notamment le virage jaune paille, marque la fin de l'analyse.

Le volume de solution d'acide chlorhydrique ( $V_{\text{HCl}}$ ) employé lors du titrage, multiplié par le coefficient 0,7, correspond à la proportion de CaO non liée [137]. La teneur en chaux libre est calculée selon l'équation III.4

$$\% \text{ CaO}_{\text{libre}} = 0,7 \times V_{\text{HCl}} \quad (\text{III.4})$$

**PARTIE 03**  
**RESULTAS ET DISCUSSION**

## Chapitre I : Caractérisation physico-chimique des résidus solides urbains (RSU)

### I.1 Introduction

La caractérisation physico-chimique détaillée du gisement des RSU de la commune de Chlef par saisons et pendant deux années consécutives (2018/2019-2019/2020) est abordée dans ce chapitre. La connaissance de la composition physico-chimique des RSU permettra le choix du mode de leur traitement et de leur valorisation.

### I.2 Ratio de production des RSU dans la commune de Chlef

La production des RSU dépend du nombre de la population. La relation entre la production et le nombre de population est définie par un rapport reliant la quantité des RSU produite en une journée par habitant, ce dernier est appelé le ratio de production, il est donné en kg/jour/habitant.

Les valeurs des ratios de production au niveau de la commune de Chlef sont présentées dans le tableau I.1.

**Tableau I.1:** Les ratios de production des RSU pour chaque zone de la commune de Chlef [138].

Zones	Centre-ville	Ouled-Mohammed	Hay-ESalam	Hay-ElHoria	Hay-Chorfa	Mouafkia	Bradai	Cheggua
Population	50092	35918	66398	9558	27606	4025	16917	11508
Production(kg/j)	40540	29280	53950	6160	22500	3280	13790	9380
Production(kg/j/hab)	0.80	0.81	0.81	0.64	0.81	0.81	0.81	0.81

Les résultats montrent que les taux de production des RSU pour les zones d'étude sont compris entre 0,64 et 0,81 kg/j/hab. Le ratio de production est constant pour toutes les zones, à l'exception de la zone de Hay-El Horia qui a un ratio de production inférieur à 0,81 kg/j/hab. Ces résultats montrent que la population de la commune de Chlef a le même niveau de vie.

Le ratio de production des RSU de la commune de Chlef est comparable avec celui de la commune d'Oran (0,80 kg/j/hab à El Othmania) [24], et de la commune de Mostaganem (0,82 kg/j/hab) [32].

### **I.3 Caractérisation physique des RSU**

Après la collecte, la caractérisation physique (tri par catégories et par taille) des déchets consiste à déterminer la quantité de chaque catégorie dans le flux des déchets. Ces informations sont une base de données qui aide à planifier la réduction des déchets, à mettre en place des programmes de recyclage et à économiser les ressources naturelles.

#### **I.3.1 Le tri par taille**

Le tri par taille a été réalisé sur 200 kg des RSU humides par le biais d'une table de tri. Cette dernière est constituée de trois tamis avec des granulométries différentes : les gros ( $\emptyset > 100$  mm); les moyens ( $20 > \emptyset < 100$  mm) et les fines ( $\emptyset < 20$  mm).

La caractérisation par taille a été effectuée pour chaque zone de la commune de Chlef, et pendant les quatre saisons au cours de deux ans (2018/2019 et 2019/2020). Les résultats de la caractérisation des RSU par taille (en %) et par saisons (hiver, printemps, été et automne) pendant les deux années sont schématisés dans les figures I.1, I.2, I.3 et I.4.

Les résultats montrent que les déchets de taille moyenne des RSU ( $20 > \emptyset < 100$  mm) sont prédominants avec un pourcentage qui varie entre 84 et 93 % en hiver 2018 et entre 82 et 94 % en hiver 2019 (Figure I.1). Par contre, le taux des RSU de taille moyenne oscille entre 77 à 91 % et 59 à 90 % respectivement pendant la saison du printemps de 2018 et celle du printemps 2019 (Figure I.2). Pendant les étés 2018 et 2019, la fraction des RSU oscille entre 72 à 89 % et 68 à 93 % respectivement (Figure I.3). Le pourcentage des RSU était compris entre 72 % et 92 % à l'automne 2018, et entre 81 % et 93 % à l'automne 2019 (Figure I.4). Ces résultats montrent que la grande quantité des RSU comme les putrescibles, les papiers, les cartons, les métaux, les textiles sanitaires et les composites ont une taille entre 20 et 100 mm. Le pourcentage des gros ( $\emptyset > 100$ ) varie de 4 à 15 % en hiver, de 7 à 40 % en printemps, de 7 à 31 % en été, et de 6 à 25 % en automne au cours des deux années. Les grandes quantités des déchets de grande taille dans certaines zones, sont dues à l'origine commerciale de certaines catégories des RSU comme les cartons, les plastiques et les papiers [3].

La valeur moyenne de fractions fines varie entre 0,73 et 3,39 % en hiver, entre 0,48 et 8,71 % en printemps, entre 0,76 et 8,45 % en été, et entre 0,91 et 4,46 % en automne.

Les résultats obtenus sont en accord avec ceux obtenus (le taux des RSU de taille moyenne, varie entre 66 et 88 %, les gros ont un taux qui oscille entre 12 et 30 %, et le taux des déchets fins est de l'ordre de 2,3 %) au cours des années 2010-2011 et 2011-2012 par Tahraoui Douma [3]. Ce qui veut dire que le niveau de vie de la population de la commune de Chlef, n'a pas beaucoup changé.

Les résultats de caractérisation physique pendant les deux années montrent que les RSU peuvent évoluer par saisons et par zones, et cela est dû au nombre des habitants ainsi que la situation géographique des zones, et la nature des aliments consommés par la population pendant chaque saison.

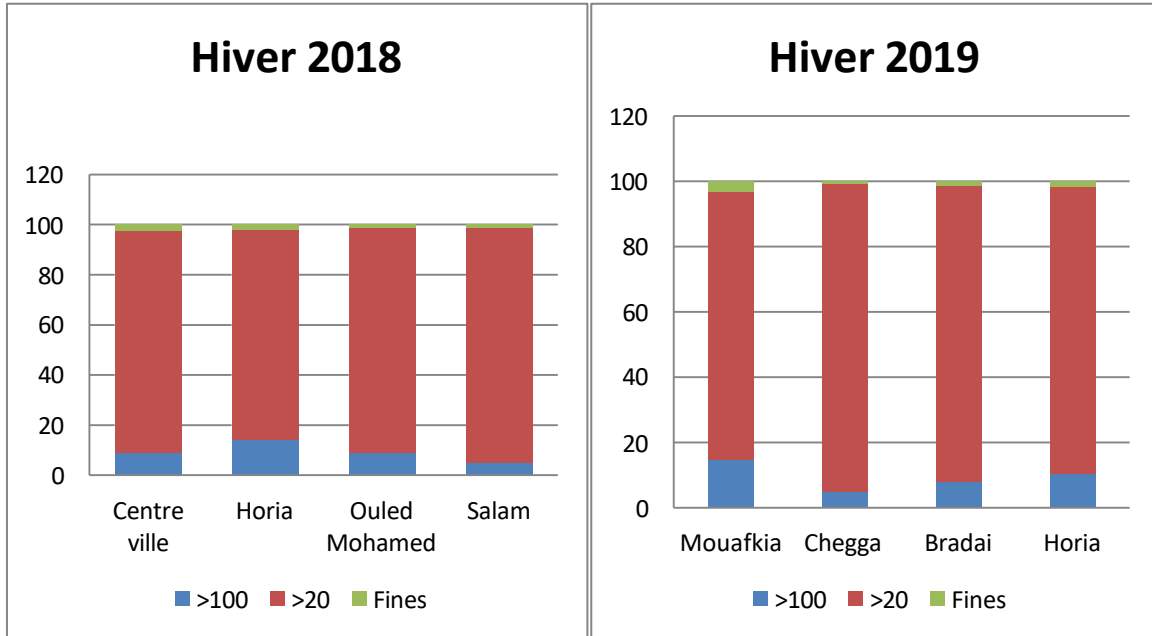


Figure I.1 : Répartition par taille des résidus solides urbains durant les hivers de 2018 et 2019.

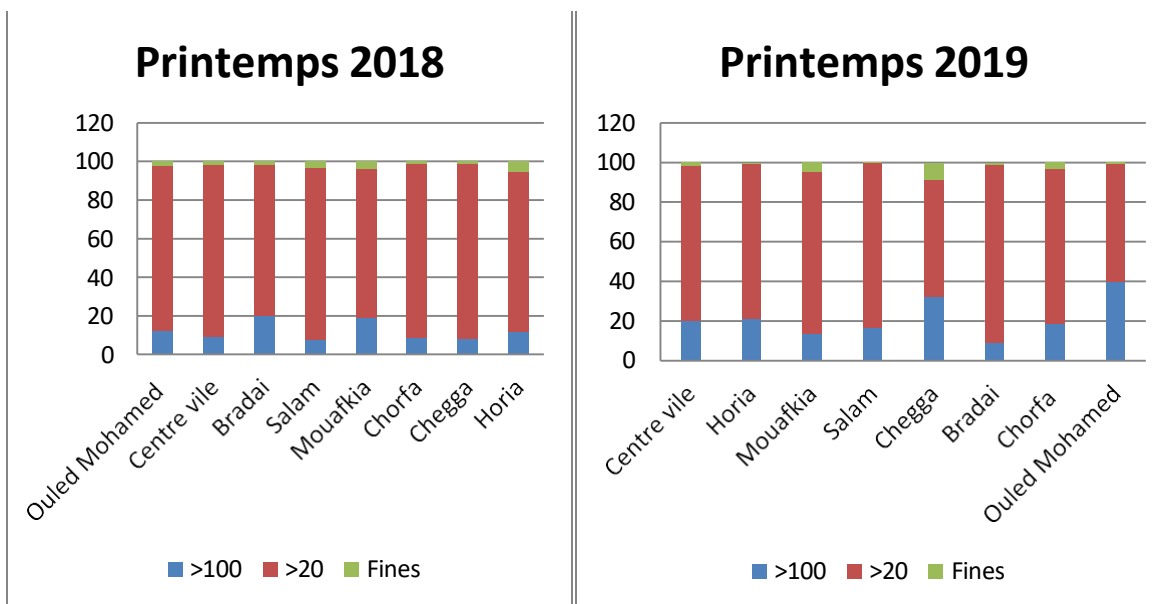


Figure I.2 : Répartition par taille des résidus solides urbains durant les printemps de 2018 et 2019.

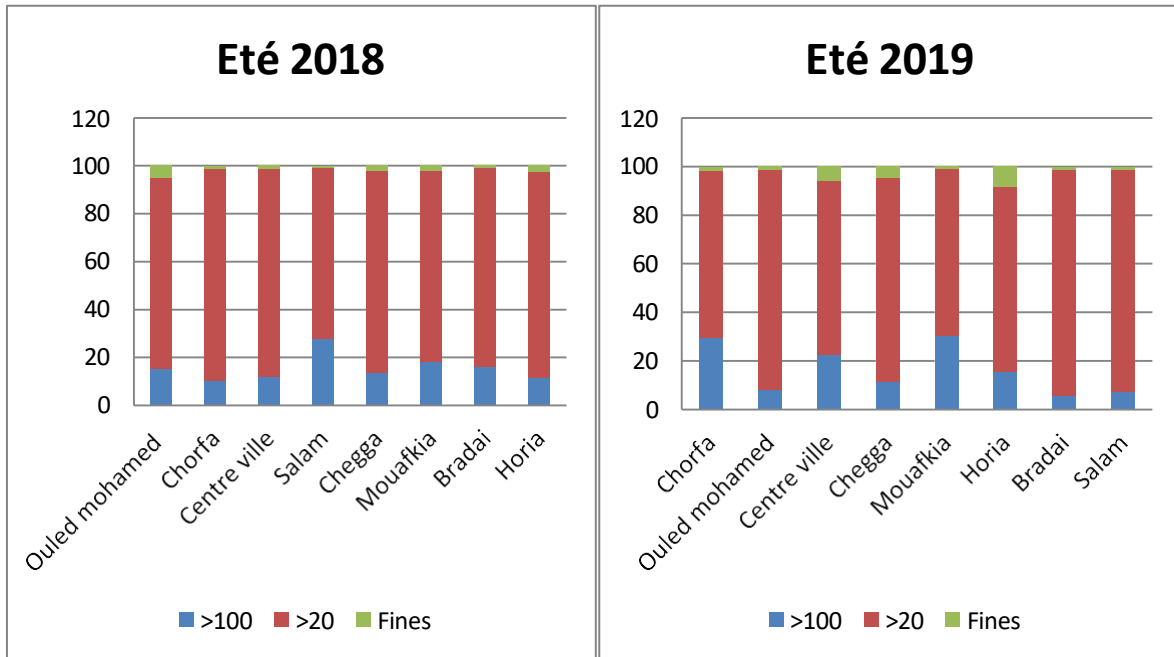


Figure I.3 : Répartition par taille des résidus solides urbains durant les étés de 2018 et 2019.

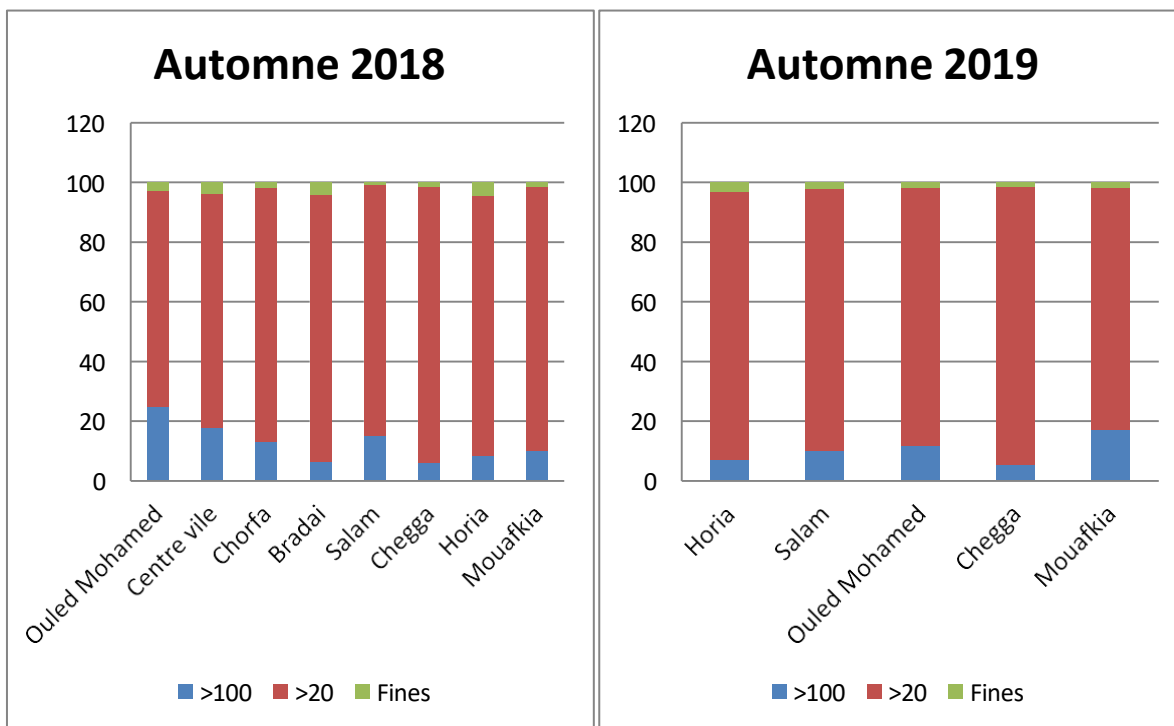


Figure I.4 : Répartition par taille des résidus solides urbains durant les automnes de 2018 et 2019.

### I.3.2 Composition des RSU en catégorie par zone et par saison au cours de deux ans

Les tableaux I.2 et I.3 présentent la caractérisation des résidus solides urbains par catégories en pourcentage, en fonction des saisons et des zones pendant deux ans (2018-2019 et 2019-2020).

Le protocole MODECOM qui a été utilisé au cours du tri manuel des RSU pendant cette étude expérimentale, montre que ces derniers sont classés en treize (13) catégories: putrescibles, papiers, cartons, composites, textiles, textiles sanitaires, plastiques, combustibles non classés CNC, verres, métaux, combustibles non classés INC, déchets dangereux et les déchets fines (Tableaux I.2 et I.3).

**Tableau I.2 :** Composition des RSU par catégorie, par zone et par saison, année 2018-2019.

Saison/Année	Hiver 2018							
Zones Déchets	Centre-ville	Horia	Ouled Mohammed	Salam				
<i>Putrescibles</i>	66.912	64.607	74.578	73.949				
<i>Papiers</i>	2.200	1.329	0.705	1.151				
<i>Cartons</i>	1.964	4.223	2.630	1.895				
<i>Composites</i>	1.277	1.784	1.164	1.254				
<i>Textiles</i>	1.989	2.952	2.861	0.902				
<i>Textiles sanitaires</i>	13.734	12.219	4.671	10.521				
<i>Plastique</i>	7.663	8.683	10.065	6.657				
<i>Combustibles Non Classés (CNC)</i>	0.330	0.716	0.607	0.102				
<i>Verre</i>	0.090	0.209	0.331	0.364				
<i>Métaux</i>	0.515	0.963	0.687	0.779				
<i>Incombustible Non Classés (INC)</i>	0.788	0.329	0.032	0.406				
<i>Déchets ménagers spéciaux</i>	0.060	0.000	0.166	0.492				
<i>Matière Fine</i>	2.478	1.986	1.503	1.528				
Total	100	100	100	100				
Saison/Année	Printemps 2018							
Zones Déchets	Ouled Mohamed	Centre-ville	Bradai	Salam	Mouafkia	Chorfa	Horia	Chegga
<i>Putrescibles</i>	48.548	60.755	48.942	60.465	52.896	51.867	54.593	63.683
<i>Papiers</i>	2.658		2.125	1.820	10.960	7.815	1.928	2.095
<i>Cartons</i>	2.674	5.519	3.344	4.969	6.670	2.258	2.820	4.982
<i>Composites</i>	2.512	0.564	1.415	1.784	0.415	1.015	0.639	0.763
<i>Textiles</i>	4.369	2.920	11.847	3.157	1.571	6.559	9.494	0.517
<i>Textiles</i>	25.195	13.028	13.757	10.926	11.831	13.678	14.759	11.503

**Résultats et Discussion**

<i>sanitaires</i>									
<i>Plastique</i>	8.022	10.180	12.176	11.727	10.806	12.725	8.999	12.797	
<i>Combustibles non Classés (CNC)</i>	0.401	0.000	2.356	0.000	0.000	0.128	0.000	0.146	
<i>Verre</i>	0.093	1.073	0.714	0.776	0.000	0.369	0.826	1.295	
<i>Métaux</i>	0.451	0.706	0.878	0.918	0.07	1.04	0.672	0.998	
<i>Incombustible non classés (INC)</i>	2.666	0.000	0.333	0.000	0.769	0.758	0.000	0.000	
<i>Déchets ménagers spéciaux</i>	0.000	0.000	0.227	0.146	0.114	0.39	0.000	0.103	
<i>Matière Fine</i>	2.411	1.749	1.886	3.312	3.898	1.398	5.27	1.118	
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	
<b>Saison/Année</b>	<b>Été 2018</b>								
<b>Zones Déchets</b>	<b>Ouled Mohamed</b>	<b>Chorfa</b>	<b>Centre-Ville</b>	<b>Salam</b>	<b>Chegga</b>	<b>Mouafkia</b>	<b>Bradai</b>	<b>Horia</b>	
<i>Putrescibles</i>	44.682	56.317	66.367	52.169	66.056	61.013	70.566	43.416	
<i>papiers</i>	3.973	3.991	1.281	2.607	0.511	1.872	0.628	1.927	
<i>Cartons</i>	2.757	2.897	2.408	2.605	1.684	3.002	1.272	1.194	
<i>Composites</i>	2.629	1.234	1.375	1.703	1.15	1.607	1.511	1.057	
<i>Textiles</i>	1.068	2.489	2.533	4.788	3.116	4.165	3.836	7.549	
<i>Textiles sanitaires</i>	16.669	11.544	12.535	20.407	13.415	9.713	10.171	26.038	
<i>Plastique</i>	13.4	15.729	8.723	12.524	10.32	12.035	10.274	13.749	
<i>Combustibles non Classés (CNC)</i>	4.885	2.514	0.308	0.088	0.345	0.204	0.035	0.163	
<i>Verre</i>	2.338	1.168	0.641	0.783	0.202	0.258	0.000	1.114	
<i>Métaux</i>	2.176	0.413	0.783	0.505	0.84	0.530	0.445	0.867	
<i>Incombustible non classés (INC)</i>	0.000	0.000	1.589	0.296	0.218	3.355	0.067	0.026	
<i>Déchets ménagers spéciaux</i>	0.250	0.491	0.093	0.771	0.108	0.144	0.33	0.447	
<i>Matière Fine</i>	5.173	1.213	1.364	0.754	2.035	2.102	0.865	2.453	
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	
<b>Saison/Année</b>	<b>Automne 2018</b>								
<b>Zones Déchets</b>	<b>Ouled Mohamed</b>	<b>Centre-ville</b>	<b>Chorfa</b>	<b>Bradai</b>	<b>Salam</b>	<b>Chegga</b>	<b>Horia</b>	<b>Mouafkia</b>	
<i>Putrescibles</i>	26.201	62.639	60.443	57.128	71.262	68.398	61.438	54.022	
<i>papiers</i>	2.562	1.163	1.605	1.011	0.767	1.691	2.378	1.323	
<i>Cartons</i>	3.041	2.744	4.213	1.216	1.142	2.403	2.402	2.739	
<i>Composites</i>	3.892	1.514	2.732	0.744	1.192	0.983	1.718	2.223	
<i>Textiles</i>	11.756	0.857	2.354	1.085	0.541	1.589	0.835	2.869	
<i>Textiles</i>	7.613	13.111	11.426	22.430	14.160	12.507	8.643	13.941	

<i>sanitaires</i>								
<i>Plastique</i>	36.422	10.124	13.187	8.82	7.839	9.673	12.634	8.148
<i>Combustibles non Classés (CNC)</i>	3.285	1.193	0.474	0.194	0.176	0.148	0.791	0.016
<i>Verre</i>	0.000	0.000	0.224	0.499	0.000	0.170	1.259	0.904
<i>Métaux</i>	1.562	0.307	1.101	0.603	1.900	0.545	1.293	0.891
<i>Incombustible non classés (INC)</i>	0.061	1.931	0.335	2.071	0.000	0.358	0.768	0.000
<i>Déchets ménagers spéciaux</i>	0.901	0.465	0.106	0.191	0.114	0.111	1.381	11.512
<i>Matière Fine</i>	2.704	3.952	1.800	4.008	0.907	1.424	4.460	1.412
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau I.3 : Composition des RSU par catégorie, par zone et par saison, année 2019-2020.

Saison/Année	Hiver 2019							
Zones Déchets	Mouafkia	Chegga		Bradai		Horia		
<i>putrescibles</i>	74.271	62.501		68.470		72.323		
<i>papiers</i>	0.419	2.976		0.780		1.170		
<i>Cartons</i>	1.703	1.531		0.874		1.320		
<i>Composites</i>	1.213	1.386		0.944		0.563		
<i>Textiles</i>	2.097	1.752		2.866		1.551		
<i>Textiles sanitaires</i>	7.149	19.338		14.054		12.269		
<i>Plastique</i>	7.778	8.139		6.861		6.148		
<i>Combustibles non Classés (CNC)</i>	0.054	0.055		2.733		0.038		
<i>Verre</i>	0.341	0.502		0.277		0.396		
<i>Métaux</i>	0.398	0.770		0.743		0.413		
<i>Incombustible non classés (INC)</i>	0.479	0.135		0.000		1.992		
<i>Déchets ménagers spéciaux</i>	0.708	0.188		0.104		0.231		
<i>Matière Fine</i>	3.390	0.727		1.294		1.586		
Total	100	100		100		100		
Saison/Année	Printemps 2019							
Zones Déchets	Centre-Ville	Chorfa	Horia	Ouled Mohamed	Mouafkia	Salam	Chegga	Bradai
<i>Putrescibles</i>	59.378	40.310	65.143	45.613	52.116	53.384	44.254	62.520
<i>papiers</i>	3.360	5.446	1.273	1.571	2.835	1.214	12.921	1.281
<i>Cartons</i>	5.377	3.903	3.250	3.180	4.199	4.661	4.994	0.916
<i>Composites</i>	6.102	2.569	0.710	2.135	0.951	1.414	2.115	1.505
<i>Textiles</i>	4.465	4.144	1.172	3.314	2.557	6.382	1.757	1.717
<i>Textiles</i>	4.952	16.684	17.255	22.881	17.101	18.773	7.092	16.465

*Résultats et Discussion*

<i>sanitaires</i>								
<i>Plastique</i>	12.058	17.334	8.490	18.568	11.665	11.436	10.719	10.779
<i>Combustibles non Classés (CNC)</i>	0.063	0.153	0.487	0.000	2.121	0.013	2.541	0.153
<i>Verre</i>	1.224	4.981	0.296	0.806	0.195	0.633	0.000	2.866
<i>Métaux</i>	0.877	0.887	1.255	0.732	0.361	0.808	2.818	0.335
<i>Incombustible non classés (INC)</i>	0.118	0.258	0.000	0.000	0.855	0.000	1.110	0.416
<i>Déchets ménagers spéciaux</i>	0.232	0.185	0.153	0.285	0.178	0.804	0.972	0.000
<i>Matière Fine</i>	1.794	3.146	0.516	0.915	4.866	0.478	8.707	1.047
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Saison/Année</b>	<b>Été 2019</b>							
<b>Zones Déchets</b>	<b>Ouled Mohamed</b>	<b>Chorfa</b>	<b>Centre-ville</b>	<b>Chegga</b>	<b>Mouafkia</b>	<b>Horia</b>	<b>Bradai</b>	<b>Salam</b>
<i>Putrescibles</i>	55.349	45.428	61.463	54.583	53.914	47.238	65.463	59.170
<i>papiers</i>	4.224	15.147	1.393	1.705	1.775	0.961	1.720	1.817
<i>Cartons</i>	4.560	4.887	0.313	3.005	0.891	2.812	1.359	3.436
<i>Composites</i>	2.675	4.409	1.373	1.695	1.156	1.505	1.379	2.624
<i>Textiles</i>	0.868	2.165	6.262	4.626	3.051	1.223	3.130	9.758
<i>Textiles sanitaires</i>	15.315	4.456	19.774	15.192	26.750	13.393	14.603	4.892
<i>Plastique</i>	13.691	14.888	3.140	12.197	10.241	13.968	9.451	15.305
<i>Combustibles non Classés (CNC)</i>	0.201	2.231	0.044	0.255	0.052	3.444	0.127	0.822
<i>Verre</i>	0.526	0.591	0.000	0.000	0.000	2.048	0.000	0.000
<i>Métaux</i>	0.899	1.468	0.000	1.895	0.754	3.057	0.396	0.766
<i>Incombustible non classés (INC)</i>	0.181	0.053	0.084	0.000	0.000	1.790	0.517	0.020
<i>Déchets ménagers spéciaux</i>	0.023	2.577	0.000	0.035	0.349	0.113	0.629	0.137
<i>Matière Fine</i>	1.488	1.700	6.154	4.812	1.067	8.448	1.226	1.253
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Saison/Année</b>	<b>Automne 2019</b>							
<b>Zones Déchets</b>	<b>Horia</b>	<b>Salam</b>	<b>Ouled Mohamed</b>	<b>Chegga</b>	<b>Mouafkia</b>			
<i>Putrescibles</i>	61.031	60.613	59.076	70.204	45.942			
<i>papiers</i>	1.870	2.023	0.834	1.299	1.156			
<i>Cartons</i>	1.785	3.086	2.921	2.230	2.053			
<i>Composites</i>	1.652	1.812	2.097	1.227	0.956			
<i>Textiles</i>	3.441	1.374	0.701	0.645	3.736			
<i>Textiles sanitaires</i>	14.728	14.965	16.973	10.785	33.325			
<i>Plastique</i>	11.027	6.398	11.966	8.075	9.046			
<i>Combustibles non Classés (CNC)</i>	0.000	2.854	0.084	0.931	0.01			

<i>Verre</i>	0.019	2.763	1.209	0.005	0.000
<i>Métaux</i>	0.665	0.765	2.028	0.514	0.015
<i>Incombustible non classés (INC)</i>	0.328	1.007	0.000	1.057	0.658
<i>Déchets ménagers spéciaux</i>	0.266	0.081	0.414	1.435	1.166
<i>Matière Fine</i>	3.188	2.259	1.697	1.593	1.937
Total	100	100	100	100	100

Les résultats montrent une variation saisonnière des différentes catégories par zones pendant les années successives. La fraction majoritaire des RSU est celle des putrescibles. Au cours de l'année 2018-2019, cette fraction varie en hiver entre 64. 607 et 74. 578 %, entre 48. 548 et 63. 683 % en printemps, entre 43. 416 et 70. 566 % en été, et entre 26. 201 et 71. 262 % en automne. Cette variation est presque comparable au cours de l'année 2019. Le pourcentage des putrescibles oscillent de 62.501 à 74.271 % en hiver, de 40.310 à 65.143 % en printemps, de 45.428 à 65.463 % en été, et de 45.942 à 70.204 % en automne. La variation des pourcentages de cette catégorie au cours les quatre saisons et pendant les années d'étude est reliée principalement à la nature des aliments consommés par les habitants qui sont généralement des légumes et des fruits. Les pourcentages des putrescibles des zones de Chlef sont comparables à celles d'autres villes algériennes où le pourcentage est de 65.5 % à Mostaganem [32], et de 55 % à Blida [33].

Dans les pays en développement, les taux des putrescibles est proche à celui de Chlef, ils sont de l'ordre de 48 % en Arabie saoudite [35], 68.3 % en Palestine [38], 61 % en Ghana [26]. Par contre les fractions des putrescibles dans les pays développés sont inférieure à 40 %, cette faible fraction par rapport à celle du pays en développement est due aux modes de vie des habitants.

Les textiles sanitaires occupent la deuxième place en pourcentage après les putrescibles, leur proportions varie d'une saison à une autre. Pendant les deux années, le taux des textiles sanitaires varie entre 4.671 et 19.338 % en hiver, entre 4.952 et 25.195 % en printemps, entre 4.456 et 26.750 % en été, et entre 7.613 et 33.325 % en automne. Les pourcentages élevés pour cette catégories est du généralement aux couches bébés et couches d'adultes qui sont gorgées d'eau, ainsi que la présence des papiers hygiéniques, des lingettes, etc. Certaines de ces valeurs obtenues sont un peu élevées par rapport à d'autres villes algériennes et d'autres pays dans le monde, les taux des textiles sanitaires sont de l'ordre de 10 % à Blida [33], de

14.65 % à Ouargla [34], de 11.6 à Jijel [34], de 6.3 % en Kuwait [39], de 5.9 % en Asia [40] et de 11 % en France [42].

Le plastique occupe la troisième place en proportion après les textiles sanitaires, il est composé de films en plastiques, bouteilles PET, PVC et autres. Pendant l'année 2018, le taux des plastiques varie entre 5.293 et 10.065 % en hiver, entre 8.022 et 12.797 % en printemps, entre 8.723 et 15.729 % en été, et entre 7.839 et 36.422 % en automne. Au cours de l'année 2019, cette fraction oscille entre 6.148 et 8.139 % en hiver, entre 8.490 et 18.568 % en printemps, entre 3.140 et 15.305 % en été, et entre 6.398 et 11.966 % en automne. Ces pourcentages élevés sont dus aux forts achats des sacs, des bouteilles d'eau, des bouteilles de boissons, des bouteilles des détergents par les habitants. L'existence de cette catégorie dans les RSU avec une fraction importante est expliquée aussi par le faible taux de recyclage des plastiques au niveau de la wilaya de Chlef. Les résultats obtenus sont comparables avec ceux obtenus à Blida, 18 % de plastiques [33] et à Ouargla, 16.57 % [34]. Par contre la fraction de plastique dans certains pays dans le monde est de l'ordre de 25 % en Arabie Saoudite [35], de 24.26 % en Inde [36], de 5 % en Iran [27], de 11.26 en Egypte [37], de 10.83 % en Espagne [28] et de 12 % en France [42].

La quantité de papier varie entre 0.419 et 15.147 % pendant les quatre saisons au cours les deux années, les grandes quantités remarquables sont pendant les printemps des deux années, elles sont de l'ordre de 10.960 % pour la zone de Mouafkia ,12.921 % pour la zone de Chegga. Pendant l'été 2019, le pourcentage de papier est de l'ordre de 15.147 % pour la zone de Chorfa. Ces grandes proportions peuvent être attribuées au caractère administratif et commercial de la zone pendant cette saison.

Le pourcentage du carton varie de 0.443 à 6.670 % pendant l'année 2018 et au cours des quatre saisons. Il varie de 0.313 à 5.377 % pendant l'année 2019. Les résultats de la littérature pour certaines villes en Algérie et d'autre dans le monde sont comparables avec nos résultats. A titre d'exemples, le taux de papier-carton est de l'ordre de 15.3 % à Mostaganem [32], de 8 % à Blida [33], de 8 % en Tunisie [41], de 20.5 % en Espagne [28], et de 20 % en Arabie Saoudite [35].

Le pourcentage des composites varie entre 0.415 et 6.102 % pendant les quatre saisons et au cours les deux années. Alors que, le pourcentage de textiles varie de 0.517 à 9.758 % à l'exception de deux saisons : printemps et automne 2018, ou le taux atteint 11 % dans certaines zones de la commune de Chlef.

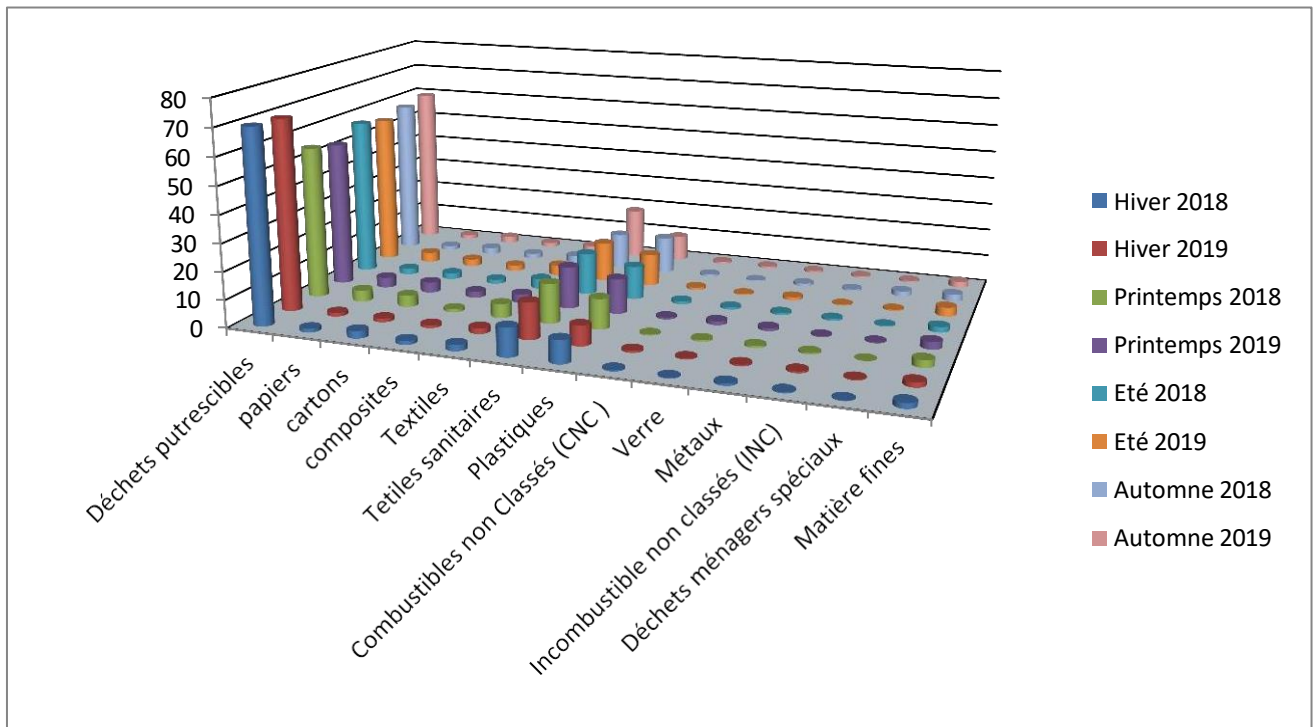
Le taux de verre (bouteilles en verre, vaisselles, débris de verre, lampes .....etc.) varie de 0 à 2,338 % pendant toutes les saisons de l'année 2018-2019, et entre 0 à 4,981 % pendant les

saisons de l'année 2019-2020. Aussi, les pourcentages des combustibles non-classés (CNC), les incombustibles non-classés (INC) et les métaux sont inférieurs à 4 %.

Les déchets ménagers spéciaux représentent une fraction minoritaire dans la composition des RSU de la commune de Chlef, leurs pourcentages varient de 0 à 2.577 % pendant les quatre saisons au cours des années, à l'exception de l'automne 2018 ou le pourcentage des déchets ménagers spéciaux atteint 11.512 % dans la zone de Mouafkia.

Enfin, les résultats du tri manuel montrent que les fines sont composées de proportions variant entre 0.755 et 5.270 % au cours de l'année 2018-2019 et entre 0.476 et 8.707 % au cours du printemps et l'année 2019-2020. Ces résultats se traduisent par la présence d'un taux élevé des aliments secs dans les déchets fins tels que : le riz, les lentilles, les haricots.....etc., ainsi que du gravier, du sable, de petits cailloux et de verre,.....etc.

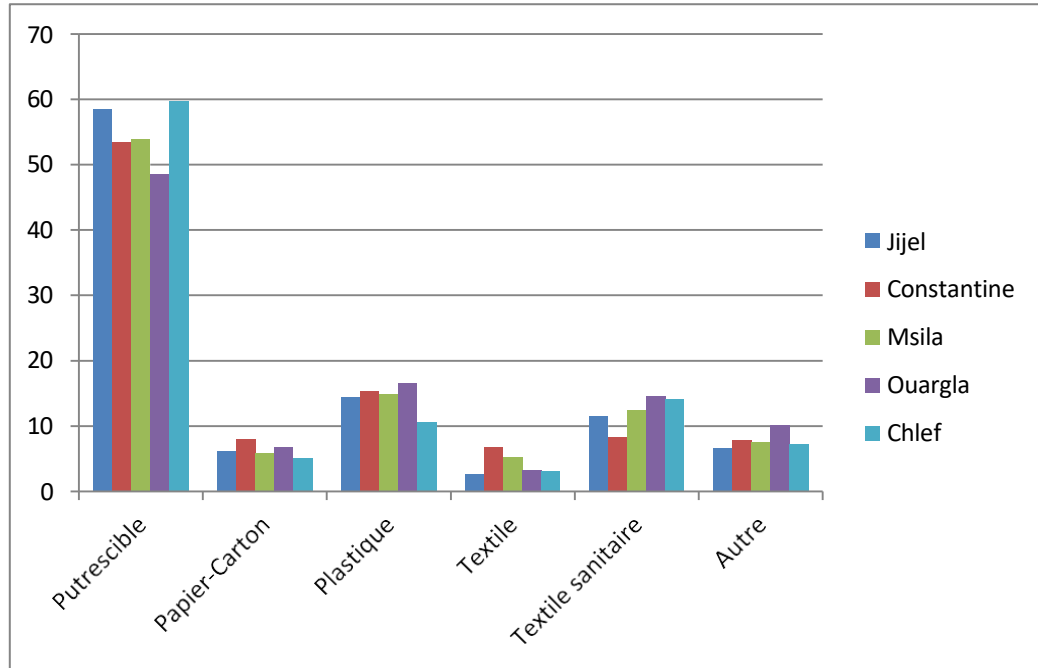
La figure I.5 présente la comparaison des pourcentages des 13 catégories de déchets générés par la population des différentes zones de la commune de Chlef, sur une période de deux ans et au cours de quatre-saisons. Les résultats indiquent que les pourcentages des mêmes catégories sont similaires tout au long des quatre-saisons sur les deux années.



**Figure I.5 :** Composition moyenne des RSU par catégorie des quatre saisons sur les deux années (2018-2019 et 2019-2020).

### I.3.3 Comparaison de la composition moyenne des RSU de Chlef avec celle d'autres villes algériennes

L'analyse de la composition moyenne des résidus solides urbains (RSU) de Chlef par rapport à celle d'autres villes algériennes telles que Jijel, Constantine, M'sila et Ouargla sur une période de deux ans est illustrée dans la figure I.6 [34].



**Figure I.6 :** Composition moyenne des RSU dans certaines villes algériennes pendant l'année 2018-2019.

Les résultats montrent que les RSU de toutes les villes algériennes ont une fraction prédominante des putrescibles, elle est de l'ordre de 58 % à Jijel, de 53 % à Constantine, de 54 % à Msila, de 48 % à Ouargla et de 59.7 % à Chlef. Ces proches proportions sont dues au même mode de vie de la population de toutes les villes algériennes.

Le plastique occupe la deuxième place dans la classification des RSU pour certaines villes, son taux est de l'ordre de 14 % à Jijel, de 15 % à Constantine, de 14.9 % à Msila, de 16.57 % à Ouargla. Par contre, à Chlef, les textiles sanitaires occupent la deuxième fraction après les putrescibles avec un taux de 14.18 %. Dans les villes de Jijel, Constantine, M'sila et Ouargla, les textiles sanitaires se classent au troisième rang, après les plastiques, avec des pourcentages respectifs de 11,6 %, 8,34 %, 12,34 % et 14,65 %. Dans l'ensemble des villes algériennes, les papiers et cartons se classent au quatrième rang, représentant 6.22 % à Jijel, 8.05 % à Constantine, 5.04 % à M'sila, 6.82 % à Ouargla et 5.13 % à Chlef. Les pourcentages des textiles sont de l'ordre de 2.62 % à Jijel, de 6.78 % à Constantine, de 5.32 % à Msila, de 3.34 % à Ouargla, et de 3.10 % à Chlef. Les autres catégories de déchets tels que : les composites,

les CNC, le verre, les métaux, les INC, les déchets ménagers spéciaux et les déchets fins ont des pourcentages de 6.66 % à Jijel, 7.92 % à Constantine, 7.54 % à M’sila, 10.09 % à Ouargla et 7.24 % à Chlef.

### **I.3.4 Densité des RSU**

Les résultats de la densité sont présentés dans le tableau I.4. La densité des RSU à Chlef change selon les saisons. Pendant l’année 2018-2019, la valeur de la densité est de 0.43 en hiver, 0.48 au printemps, 0.61 en été et 0.41 en automne. Cependant, la densité au cours de l’année 2019-2020 est de 0.53 en hiver, 0.40 au printemps, 0.38 en été et en automne. Ces résultats sont comparables avec ceux obtenus par Guermoud [32], la densité des déchets de la ville de Mostaganem est de 0.36. Et avec ceux de Derias et Bouhadiba [50,24], la densité des RSU de la ville d'Oran est de 0.71. La connaissance de cette caractéristique physique facilite le choix des moyens de collecte et de transport des déchets.

**Tableau I.4** : Densité des RSU de la commune de Chlef.

<b>Densité Saison</b>	<b>Densité (kg/L)/ Année 2018</b>	<b>Densité (kg/L)/ Année 2019</b>
<i>Hiver</i>	0.4403	0.5329
<i>Printemps</i>	0.4831	0.4046
<i>Eté</i>	0.6119	0.3839
<i>Automne</i>	0.4174	0.3820

### **I.3.5 Caractérisation chimique de certaines catégories des RSU par saison pendant les deux années (2018/2019-2019/2020)**

Les résultats des caractéristiques chimiques des RSU (taux d’Humidité (% H), taux de la Matière Organique (% MO)) sont consignés dans le tableau I.5. Les catégories qui sont susceptibles de fixer beaucoup d’eau sont les putrescibles, les papiers, les cartons et les déchets fins. Les putrescibles contiennent une forte teneur eau qui est élevé pendant les quatre saisons au cours les deux années. Elle varie de 73 à 87 %. Ce taux élevé est interpréter par la nature des légumes et fruits qui sont contenus dans les putrescibles qui sont trop humides.

Les papiers-cartons renferment une teneur en eau qui varie entre 34 et 53 %. Cette teneur est due principalement au pourcentage élevé en putrescibles dans les déchets qui humidifient les cartons et les papiers par manque de tri des déchets à la source.

La teneur en eau des fines varie selon leur composition, si elles sont composées des constituants un peu humide leurs taux d’humidité est de l’ordre de 36 %, et si elles sont composées des constituants humides, leurs taux d’humidité est de l’ordre de 53 %.

Les résultats des taux d'humidité des déchets obtenus sont proches de ceux trouvés par Bouhadiba et Derias pour la ville d'Oran [24,50], le taux d'humidité varient entre 20 de 63 % pour les déchets fins, entre 60 et 89 % pour les fermentescibles, de 40 à 61 % pour les papiers-cartons.

La connaissance du taux d'humidité des RSU permet de choisir le type de l'incinérateur utilisé, dans le cas de l'incinération de ces derniers. Puisque le taux d'humidité de ces déchets est supérieur à 50 %, donc il est préférable d'utilisé un four rotatif afin d'assurer la combustion complète des RSU.

Les résultats montrent que les teneurs en matière organique des putrescibles restent comparables pendant les quatre saisons et les deux années d'étude expérimentale. Elle varie entre 74 à 78 % en année 2018-2019 et elle est de 76 à 84 % pendant l'année 2019-2020. Les taux de la matière organique des papiers-cartons sont proches entre eux, ils varient entre 73 à 84 % pendant les saisons humides et sèches. Les résultats obtenus montrent que les putrescibles, les papiers-cartons contient une teneur importante de la matière organique. Donc, leur utilisation comme combustible est un moyen de traitement et de valorisation de ces catégories. Les valeurs des pourcentages de la matière organique des putrescibles de la ville d'Oran sont de l'ordre de 96 %, les taux de la matière organique des papiers sont de l'ordre 87 % et ceux des cartons sont de 95 % selon les travaux de Bouhadiba et Derias [24, 50].

Les déchets fins renferment un taux en matière organique qui varie entre 30 et 60 %. Ces résultats confirment que les déchets fins sont un mélange hétérogène et contiennent principalement les putrescibles et d'autres catégories de déchets fins.

Les résultats de la caractérisation chimiques des RSU trouvés par les travaux de Tahraoui Douma [3], sont très comparables avec ces résultats. Ce qui montre que la stabilité des taux d'humidité et de la matière organique des putrescibles, des papiers-cartons et des déchets fins de la commune de Chlef au cours du temps.

**Tableau I.5:** Caractérisation chimique des résidus solides urbains sur une période de deux ans, répartie sur les quatre saisons.

Saison (% H et %MO) Déchet	Hiver 2018		Printemps 2018		Été 2018		Automne 2018	
	(% H)	(% MO)	(% H)	(% MO)	(% H)	(% MO)	(% H)	(% MO)
<i>Putrescibles</i>	85.212	76.031	82.193	76.819	84.276	74.020	81.719	78.233
<i>Papiers</i>	45.734	80.062	49.362	80.823	39.587	80.001	42.321	82.146
<i>Cartons</i>	48.448	78.739	51.100	79.780	49.615	75.951	44.833	73.618
<i>Matières fines</i>	53.207	43.960	53.692	60.198	52.634	53.686	39.734	39.062

Saison	Hiver 2019		Printemps 2019		Été 2019		Automne 2019	
(% H et %MO) Déchet	(% H)	(% MO)	(% H)	(% MO)	(% H)	(% MO)	(% H)	(% MO)
<i>Putrescibles</i>	87.026	84.004	83,147	81.236	77.786	76.933	73.800	77.989
<i>Papiers</i>	46.553	83.760	41,128	83.026	45.227	79.500	36.282	80.882
<i>Cartons</i>	50.799	81.680	40.198	77.403	53,034	80.800	34.120	70.524
<i>Matières fines</i>	41.222	30.577	41.823	59.576	50.999	54.000	36.695	53.850

### I.3.6 Estimation des quantités des RSU pour chaque filière de traitement

La connaissance de la composition physico-chimique des RSU de la commune de Chlef vise à sélectionner la méthode de traitement adéquate pour toutes les catégories de déchets.

En se basant sur une production journalière des RSU de la commune de Chlef de 188 t/j, le tableau I.6 illustre la proportion des RSU valorisable par recyclage, par compostage, et par incinération ainsi, que la quantité de ces derniers générés en tonne par jour.

#### a. Les résidus solides urbains recyclables

On note que certaines catégories des RSU peuvent être valorisé par recyclage, ces RSU est représenté par les papiers, les cartons, les plastiques, les verres, avec des pourcentages de 17.67 % en 2018, et 16.91 % en 2019, et avec une production journalière de 33.22 t/j en 2018 et 31.79 t/j en 2019. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Tahraoui Douma [3].

Les grands cartons, les bouteilles en plastique, et les métaux sont triés en aval au niveau des deux Centres d'Enfouissements Techniques (CETs) de la commune de Chlef, ces derniers sont vendus par les autorités locales aux certaines entreprises de recyclage au niveau de la wilaya de Chlef et aux wilayas limitrophes.

#### a. Les résidus solides urbains incinérables

Le tri à la source n'existe pas pendant la collecte des RSU de la commune de Chlef, donc après séchage, les putrescibles, les papiers, les cartons, les composites, les plastiques, les textiles, les CNC peuvent être incinérés. Ces déchets sont présents dans les RSU par des pourcentages de 95.17 % en 2018, et 94.98 % en 2019, et avec une production journalière de 178.92 t/j en 2018 et 178.56 t/j en 2019.

**b. Les résidus solides urbains compostables**

Les résultats de la caractérisation chimique des putrescibles, des papiers-cartons montrent que ce type de catégories peuvent être valorisé par compostage. Les RSU de la commune de Chlef renferment une quantité importante de ces catégories avec des pourcentages de 65.29 % en 2018, et 64.32 % en 2019, et avec une production journalière de 122.75 t/j en 2018 et 120.92 t/j en 2019. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de Derias [50] concernant la ville d'Oran, où le pourcentage des déchets solides urbains compostables fluctue entre 42 % et 56 %.

**Tableau I.6 :** Proportions des RSU de la commune de Chlef selon les modes de traitement.

Mode de traitement	Recyclables		Incinérables		Compostables	
Catégories	Papiers cartons, plastiques, verres et métaux		Putrescibles, papiers, cartons, composites, textiles, plastiques et CNC		Putrescibles, papiers et cartons	
Années	2018-2019	2019-2020	2018-2019	2019-2020	2018-2019	2019-2020
Composition (%)	17.67	16.91	95.17	94.98	65.29	64.32
Quantité (T/J)	33.22	31.79	178.92	178.56	122.75	120.92

**I.4 Conclusion**

Les résultats de la caractérisation physique du gisement des RSU de la commune de Chlef montrent que la variation de la composition des RSU reste proche au cours des saisons durant deux années successives (2018-2019 et 2019-2020) d'étude expérimental. Les RSU se composent majoritairement par des catégories valorisables énergétiquement comme les putrescibles, les papiers, les cartons, les CNC, les textiles, et les plastiques.

Les analyses chimiques révèlent que les résidus solides urbains (RSU) comportent une quantité significative de matière organique, ce qui rend leur valorisation par incinération essentielle pour les traiter et les convertir en matériaux valorisables.

Le prochain chapitre portera sur l'étude de l'incinération des résidus solides urbains (RSU) dans la commune de Chlef, ainsi que sur la caractérisation physique et chimique des mâchefers produits.

## Chapitre II : Incinération des résidus solides urbains et caractérisation physico-chimique des mâchefers générés

### II.1 Introduction

Ce deuxième chapitre se concentre principalement sur l'analyse de l'incinération des RSU, d'abord à l'état brut, puis après un tri sélectif. Les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des mâchefers produits sont également présentées, dans le but d'améliorer leur potentiel de valorisation.

### II.2 Incinération des résidus solides urbains

#### II.2.1 Composition en catégories des RSU

La composition des RSU à incinérer et leur caractéristiques chimiques (taux d'humidité et taux de la matière organique) est présentée dans le tableau II.1. Pour la première incinération, on a incinéré une tonne des RSU qui sont classés selon MODECOM (mode de caractérisation de l'ordure ménagère) en 13 catégories : 58.46 % de putrescible, 1.64 % de papiers, 3.23 % de cartons, 1.63 % de composites, 2.03 % de textiles, 17.88 % de textiles sanitaires, 9.11 % de plastiques, 2.43 % de fines et 3.58 % d'autres déchets (CNC, verre, métaux, INC). Pour la deuxième incinération, on a fait un tri sélectif des RSU, en choisissant 03 catégories avec une masse de 500 kg (30 % de putrescibles, 30 % de papiers, 40 % de cartons) pour savoir l'effet de la composition des RSU sur les caractéristiques des mâchefers générés.

La caractérisation chimique montre que les 13 catégories des déchets incinérés ont une teneur d'humidité de 57.54 % et un taux de matière organique de 83.26 %. Les catégories tels que les putrescibles, les papiers, les cartons issues du tri sélectif ont une teneur d'humidité de 58.68 % et un taux en matière organique de 80.921 %. Les deux types de composition des RSU ont une teneur en matière organique trop élevé ce qui suggère leur incinération.

**Tableau II.1** : Composition physique et caractéristiques chimiques des RSU à incinérer.

Catégories	% RSU	% RSU (tri sélectif)
Putrescible	58,459	30
Papier	1,638	30
Carton	3,228	40
Composites	1,634	/
Textiles	2,027	/
Textiles sanitaires	17,888	/
Plastiques	9,115	/
CNC	0,646	/

Verre	0,666	/
Métaux	0,798	/
INC	0,832	/
Fines	2,426	/
Humidité moyenne	57.539	58.682
Matière organique moyenne des combustibles	83.257	80.921

### **II.3 Incinération des RSU**

Les températures de l’incinération des RSU et des déchets triés sélectivement sont présentées dans le tableau II.2.

Au cours de l’incinération des treize (13) catégories des RSU, on constate que la température de la chambre de combustion est de l’ordre de 623.23 °C. La température dans la chambre de postcombustion ou lieu l’oxydation des gaz issus de la combustion est de l’ordre de 1 163.48 °C. La proportion des mâchefers générés est de 10 %.

Pendant l’incinération des RSU triés tels que les putrescible, les papiers et les cartons, on note que la température dans la chambre de combustion est de 938.73 °C. La température dans la chambre de postcombustion est 1 150.26 °C. La quantité des mâchefers générés est 11 %.

Le temps de séjour des RSU dans le réacteur de l’incinération atteint une durée de six (06) heures, ce long temps de séjour est dû à la nature des RSU incinérés qui sont trop humide. Par contre le temps de séjour des RSU organique atteint une durée de trois (03) heures, il y a une réduction dans le temps de séjour ce qui montre l’influence du séchage à l’air libre sur la durée de combustion.

**Tableau II.2** : Paramètres d’incinération.

Quantité des résidus solides urbains	<b>1 tonne</b>	<b>500 kg (triés sélectivement)</b>
Temp moy (°C) (chambre de combustion)	623.23	938.73
Temp moy (°C) (chambre de postcombustion)	1163.47	1150.26
Temps de séjour (h)	6	3
Taux de mâchefers générés	10%	11%

### **II.4 Caractérisation des mâchefers**

#### **II.4.1 Analyse granulométrique des mâchefers**

L’analyse granulométrique par tamisage a été effectuée sur les deux types des mâchefers, elle est représentée dans le tableau II.3. Pour les mâchefers résultants d’incinération des résidus

solides urbains type 1 (MIRSU1). Les fractions majoritaires représentent 32,84 % de diamètres supérieurs à 10 mm, 13,07 % pour ceux supérieurs à 2 mm, 11,71 % pour ceux > 0.250mm, 8,34% pour ceux > 5mm, 8,32% pour ceux > 0.5mm et 7,54 % pour ceux > 0.125 mm. Ces fractions sont plus lourdes parce qu'elles sont constituées de cailloux, de métaux ...etc. Les fractions mineures représentent 4,27 % pour ceux > 0.080 mm et 1,08 % pour ceux inférieurs < 0.080 mm. Ces fractions sont composées par des cendres résultantes de l'incinération des RSU combustibles. Les mâchefers d'incinération des résidus solides urbains type 2 (MIRSU2) contiennent des fractions en grandes proportions de 23,33 % de diamètres > 0.080 mm, 22,55 % pour ceux > 0.250 mm, 15,8 % pour ceux > 0.080 mm, 11,66 % pour ceux > 2mm et 9,96 % pour ceux > 5mm, tandis que les fractions qui ont des proportions mineures sont de 3,17 % pour ceux > 1mm, 7,38 % pour ceux > 0,5 mm et 6,16 % pour ceux > 0,125 mm.

**Tableau II.3 :** Analyse granulométrique des deux types de mâchefers.

<i>Mâchefers Granulométrie</i>	<b>MIRSU1 (%)</b>	<b>MIRSU2 (%)</b>
> 40 mm	5.83	/
> 10 mm	32.84	/
> 5 mm	8.34	9.96
> 2 mm	13.07	11.66
> 1 mm	7.00	3.17
> 0.5 mm	8.32	7.38
> 0.250 mm	11.71	22.55
> 0.125 mm	7.54	6.16
> 0.080 mm	4.27	15.8
< 0.080 mm	1.08	23.33

#### **II.4.2 Caractéristiques physiques des mâchefers**

Les densités spécifiques et les surfaces spécifiques Blaine (SSB) des MIRSU1 et des MIRSU2 broyés à 80 µm sont données dans le tableau II.4. Les densités spécifiques des MIRSU1 et MIRSU2 sont respectivement de 2,35 g/cm<sup>3</sup> et 2,51 g/cm<sup>3</sup>. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés dans la littérature [72]. La valeur de la surface spécifique Blaine des MIRSU2 est de 6 636,64 cm<sup>2</sup>/g, elle est supérieure à celle de MIRSU1 qui est de 4 182,29 cm<sup>2</sup>/g. Cette différence est attribuée à la composition chimique de chaque type des mâchefers.

**Tableau II.4 :** Propriétés physiques des mâchefers.

	MIRSU1	MIRSU2
Densité spécifique (g/cm <sup>3</sup> )	2.35	2.51
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	4 182.29	6 636.64

### II.4.3 Composition chimique des deux types des mâchefers

Les analyses de la composition chimique des mâchefers (MIRSU1 et MIRSU2) sont indiquées dans le tableau II.5. La composition chimique des MIRSU est influencée par la composition des RSU et par les paramètres de l'incinération tels que la température, l'air, la turbulence, le temps de séjour et le type d'incinérateur [105], [139]. Les mâchefers type 1 (MIRSU1) ont une teneur en SiO<sub>2</sub> de 37,86 %, elle est plus élevée que celle des mâchefers type 2 (MIRSU2) qui est de 15,80 %. La teneur en CaO des MIRSU1 est de 25,23 %, cette dernière est faible devant celle des MIRSU2 qui est de 39,06 %. La valeur faible de la teneur en SiO<sub>2</sub> des MIRSU2 est due au tri du verre avant l'incinération, tandis que la teneur élevée en CaO dans le cas des MIRSU2 est attribuée à la composition des RSU brut qui sont riche en déchets organiques comme les putrescibles, les papiers et les cartons. Les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et MgO sont relativement plus faibles dans les deux MIRSU par rapport à leurs teneurs en SiO<sub>2</sub> et CaO. Des études ultérieures [73], [140], ont trouvé des valeurs similaires à ceux de cette étude. La perte au feu (PAF) des deux MIRSU est très élevée, ce qui indique la présence de grandes quantités de matières carbonées dans les MIRSU1 et MIRSU2 [141].

**Tableau II.5:** Composition chimique des deux types de mâchefers.

Oxydes (%)	MIRSU1	MIRSU2
Oxyde de silicium (SiO <sub>2</sub> )	37.86	15.80
Oxyde de calcium (CaO)	25.23	39.06
Oxyde de magnésium (MgO)	0.23	1.15
Oxyde de fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.15	1.60
Oxyde d'aluminium (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.58	7.60
Perte au feu (PAF)	25.31	29.12
Autres	4.64	5.67

**II.4.4 Éléments traces métalliques dans les mâchefers et les lixiviats**

Les concentrations en métaux lourds dans les MIRSU1 et dans les MIRSU2 sont présentées dans le tableau II.6. Les teneurs en éléments traces métalliques comme le Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Sb, Ba et Pb sont plus élevées dans les MIRSU1 que dans les MIRSU2. Les concentrations de Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Sb, Ba, Pb dans les MIRSU2 sont respectivement de 64 %, 62 %, 15 %, 42 %, 95 %, 51 %, 13 % et 49 % inférieures à celles des MIRSU1. Dezh et al. (2018), ont constaté que les mâchefers contiennent des concentrations élevées de Pb, Cu, Zn, Cr et Mn et une concentration faible de Cd [86]. Les concentrations faibles en métaux lourds dans les MIRSU2 sont liées à la composition des RSU qui sont exempts de toute source de métaux grâce au tri sélectif effectué avant l'incinération. Ces conclusions sont en accord avec les résultats de Dezh Shi et al. (2018), qui ont prouvé que l'élimination des déchets dangereux, y compris les thermomètres à Mercure, les lampes fluorescentes et les piles avant l'incinération, réduit les teneurs en métaux lourds dans les mâchefers [86].

**Tableau II.6:** Eléments traces métalliques des mâchefers de type 1 (MIRSU1) et les mâchefers de type 2 (MIRSU2).

<b>Eléments</b>	<b>MIRSU1 (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>MIRSU2 (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<i>V</i>	27.74	21.70
<i>Cr</i>	642.47	233.90
<i>Co</i>	12.93	8.23
<i>Ni</i>	270.09	103.30
<i>Cu</i>	393.11	333.18
<i>Zn</i>	2 374.95	1 382.54
<i>As</i>	7.88	5.87
<i>Mo</i>	< 6	40.16
<i>Cd</i>	64.96	3.04
<i>Sb</i>	54.09	26.42
<i>Ba</i>	738.25	640.75
<i>Pb</i>	236.42	120.24

Les teneurs en métaux lourds des lixiviats de MIRSU1 et des MIRSU2 sont résumées dans le tableau II.7. Les concentrations des métaux lourds dans les lixiviats des MIRSU1 et des MIRSU2 sont presque similaires, le lixiviat de MIRSU2 contient des concentrations élevées en Ba, Mo et Cr, tandis que le lixiviat de MIRSU1 contient une concentration élevée de Sb. Les résultats indiquent que le lixiviat des MIRSU2 contient des teneurs élevées en éléments traces métalliques par rapport au lixiviat des MIRSU1, ce qui se traduit par la grande surface spécifique Blaine des MIRSU2 et qui est de 6 636,64 cm<sup>2</sup>/g comparée à celle des mâchefers de type 1 qui est de 4 182.29 cm<sup>2</sup>/g. Ces résultats sont comparables à ceux de Caprai et al. (2019), qui ont détecté une lixiviation excessive des métaux lourds comme le Sb, Cr, Cu, et Mo [69].

**Tableau II.7:** Eléments traces métalliques des lixiviats des mâchefers de type 1 (MIRSU1) et des mâchefers de type 2 (MIRSU2).

<b>Eléments</b>	<b>MIRSU1 (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>MIRSU2 (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>LL. (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<i>V</i>	0.21	0.01	Nd
<i>Cr</i>	0.08	0.20	10
<i>Co</i>	Nd	Nd	Nd
<i>Ni</i>	< 0,06	< 0.06	10
<i>Cu</i>	0.08	< 0.04	50
<i>Zn</i>	< 1	< 1	50
<i>As</i>	< 0.01	< 0.01	2
<i>Mo</i>	1.11	4.60	10
<i>Cd</i>	0.01	0.01	1
<i>Sb</i>	1.51	0.04	0.7
<i>Ba</i>	1.25	11.49	100
<i>Pb</i>	< 0.01	< 0.01	10
<i>SO<sub>3</sub><sup>2-</sup></i>	9540	507	20,000

<i>Cl</i>	34,910	74,600	15,000
-----------	--------	--------	--------

La concentration de l'ion sulfate ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) dans le lixiviat des MIRSU1 est plus élevée que celle du lixiviat des MIRSU2, alors que, la concentration de l'ion chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) dans le lixiviat des MIRSU2 est plus élevée que celle du lixiviat des MIRSU1. Les résultats de la lixiviation des deux mâchefers indiquent que les concentrations des métaux lourds et des sulfates sont inférieures aux valeurs limites [130]. Les valeurs des ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) dans les lixiviats des deux mâchefers dépassent les valeurs limites selon les normes européennes, ces valeurs sont semblables à ceux trouvés par Tang et al. (2015) [22].

#### **II.4.5 Analyse des mâchefers par DRX**

Les résultats de l'analyse minéralogique par DRX sont montrés par les figures II.1 et II.2. Ces derniers montrent que la composition minéralogique des MIRSU1 et des MIRSU2 diffère légèrement. Les phases cristallines prédominantes dans les MIRSU1 (Figure.II.1) sont le quartz (PDF N° 96-500-0036) et la clinoenstatite (PDF. N° 96-900-2716) avec des pics importants ; le gypse (PDF.N° 96-901-3170), la calcite (PDF.N° 96-101-0929), l'halite (PDF. N° 96-900-3309), magnétite (PDF.N° 96-900-2324), aluminat tricalcique (PDF.N° 96-901-4360), et brownmillerite (PDF.N° 96-901-4662) présents avec des pics faibles. Les MIRSU2 (Figure.II.2) contient de l'alite (PDF.N° 96-154-0706) avec un pic élevé, la calcite (PDF.N° 96-101-0929), et de l'halite (PDF.N° 96-900-3309) avec de nombreux pics mineurs, il contient également de l'aluminat tricalcique (PDF.N° 96-901-4360), de la coésite (PDF.N° 96-900-7171), et de la portlandite (PDF.N° 96-900-0113). Certaines des phases détectées dans les deux MIRSU ont été signalées dans des études antérieures [72], [142]. La présence d'alite (composant du ciment) dans les MIRSU2 est due à la température d'incinération élevée. D'après l'analyse chimique, les deux MIRSU contiennent du Si, du Ca, du Al, du Fe et du Mg; les résultats obtenus par l'analyse DRX confirment cette composition, et ces éléments sont répartis dans les phases détectées [74].

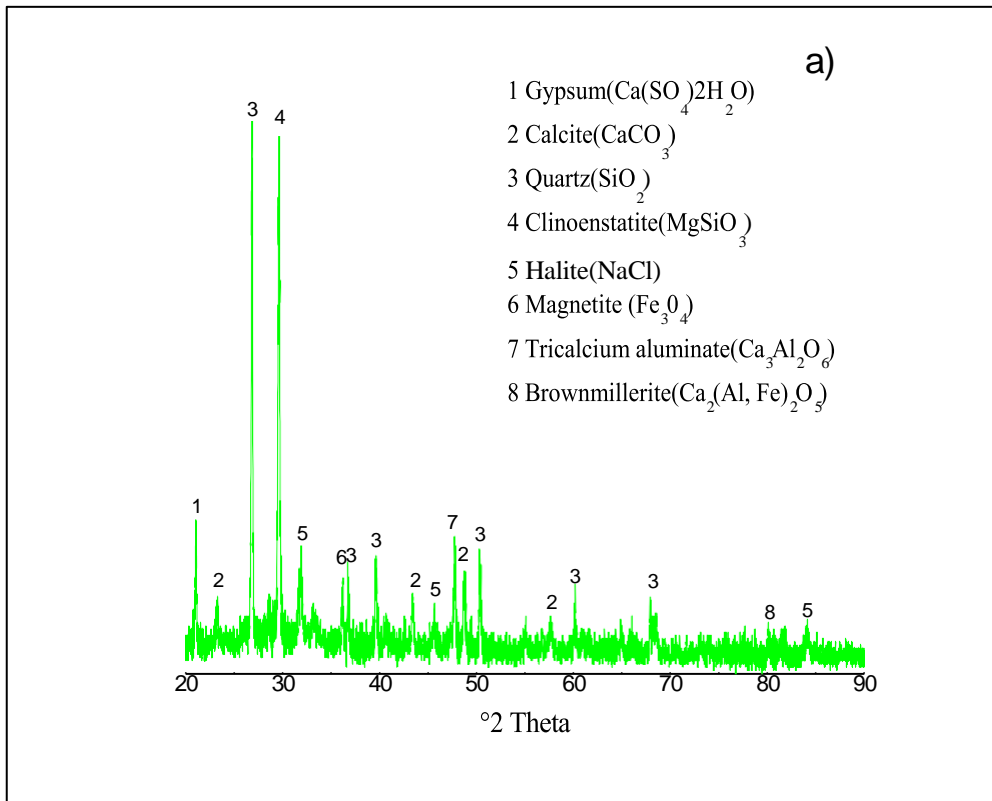


Figure II.1: DRX des MIRSU1.

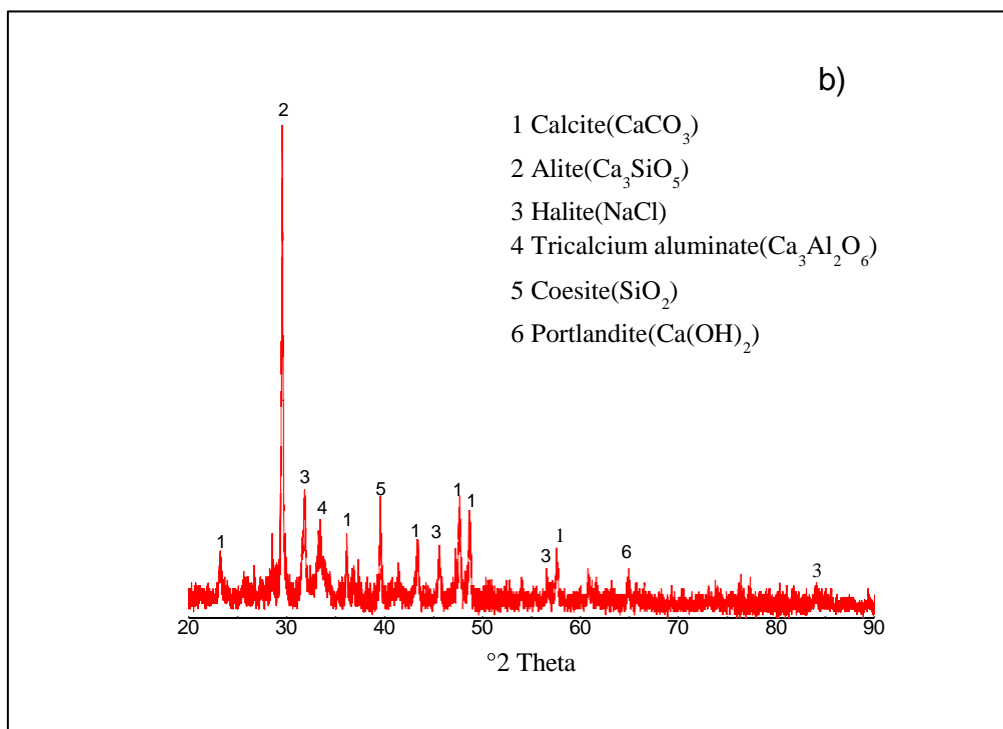


Figure II.2: DRX des MIRSU2.

#### II.4.6 Analyse des mâchefers par spectroscopie IRTF

Les spectres IRTF des MIRSU1 et des MIRSU2 sont présentés dans les figures II.3 et II.4. D'après les graphes les deux spectres sont un peu près similaires. Les larges bandes autour de 3 435 et 3 428  $\text{cm}^{-1}$  sont liées aux vibrations de l'étirement des groupes hydroxyles (O-H) liés et non liés et de l'eau, ce qui montre qu'il y a une certaine humidité dans les deux mâchefers [143]. Les vibrations du carbonate (C-O) sont identifiées par de petits pics centrés sur 2 520, 1 797, 714  $\text{cm}^{-1}$  et de forts pics à 1 430 et 875  $\text{cm}^{-1}$  [144]. Les valeurs des absorbances 1 045, 510 et 459  $\text{cm}^{-1}$  indiquent la présence de Si-O-Si (quartz) [145], [146]; les faibles pics situés à 2 925  $\text{cm}^{-1}$  sont liés à l'étirement C-H (as) du groupe méthylène aliphatique [143], et les pics observés à 2 360  $\text{cm}^{-1}$  sont dus à des molécules de  $\text{CO}_2$  [147]. Ces résultats concordent avec les analyses chimiques et de DRX, qui prouvent que les principaux composants des deux mâchefers sont le Ca, représenté par le carbonate de calcium [148], et le Si, représenté par le quartz.

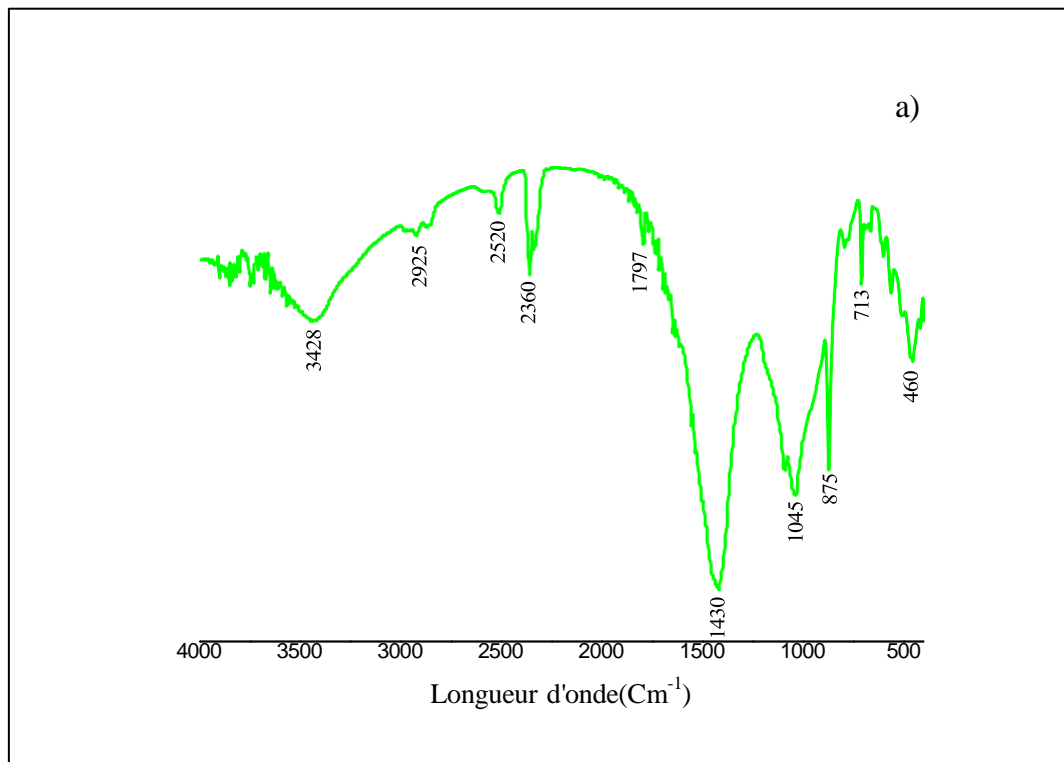


Figure II.3:IRTF des MIRSU1.

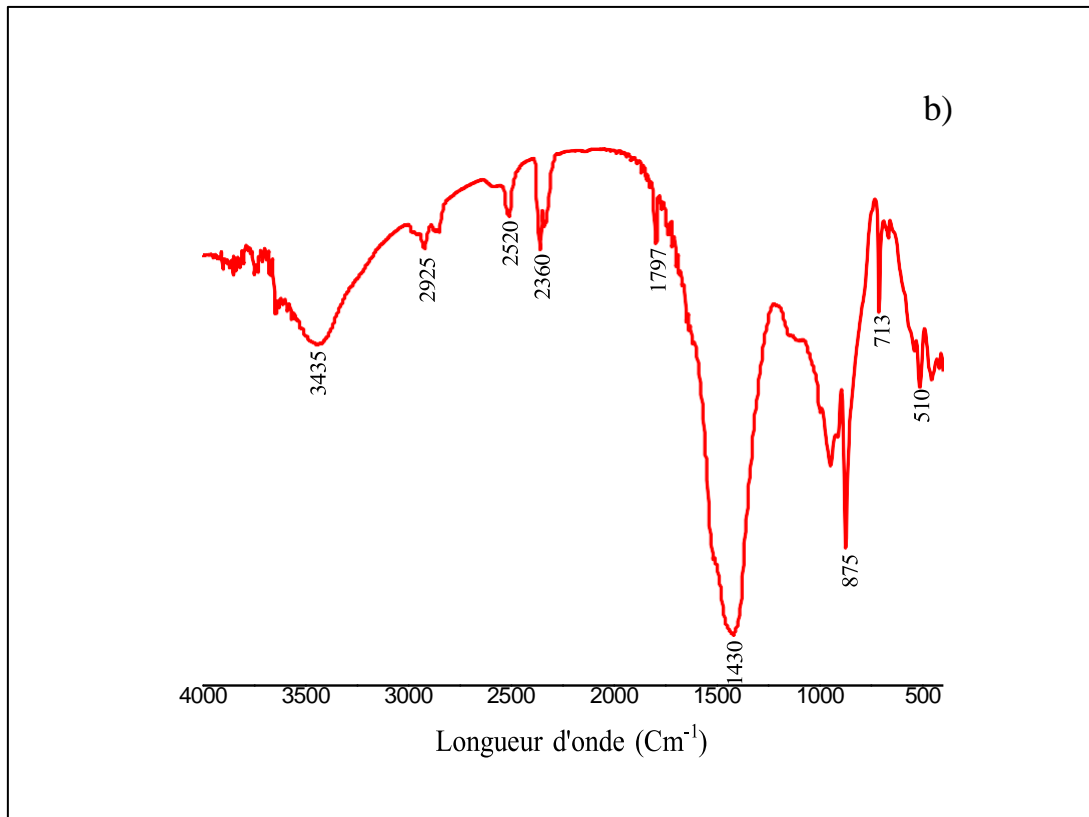


Figure II.4:IRTF des MIRSU2.

## II.5 Conclusion

A partir des résultats obtenus, la température moyenne pour l'incinération d'une tonne des RSU est de 623 °C, tandis que la température moyenne de l'incinération de 500 Kg des RSU issues du tri sélectif est de 839 °C.

L'incinération d'une tonne des RSU génère 10 % de mâchefers de type 1 (MIRSU1), tandis que l'incinération de 500 kg de putrescibles, papiers, cartons génère 11 % de mâchefers de type 2 (MIRSU2).

L'analyse granulométrique des deux types des mâchefers brutes montre que les MIRSU1 ont une granulométrie varie de 0.250 mm à 40 mm, tandis que les MIRSU2 ont une granulométrie varie de 0.250 mm à 5 mm avec différents proportions.

Les résultats des caractéristiques physiques des mâchefers montrent que les densités spécifiques des MIRSU1 et des MIRSU2 sont de l'ordre de 2.35 g/cm<sup>3</sup> et 2.51g/cm<sup>3</sup> respectivement, tandis que leurs surfaces spécifiques Blaine sont 4 182.29 cm<sup>2</sup>/g et 6 636.64 cm<sup>2</sup>/g respectivement.

Les résultats montrent que le tri sélectif des RSU a une influence sur la quantité des éléments traces métalliques contenus dans les deux types des mâchefers, aussi les concentrations des

éléments traces métalliques tels que le Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Sb, Ba et Pb sont plus élevées dans les MIRSU1 que dans les MIRSU2.

Les principales phases minéralogiques détectés dans les MIRSU1 et dans les MIRSU2 étaient le quartz, la clinoenstatite, l'alite, la calcite, l'halite, le gypse, la portlandite, l'aluminate tricalcique, la magnétite et la brownmillerite. Les analyses par spectroscopie IRTF montrent que les mâchefers contiennent des groupes hydroxyles, méthylène aliphatique, carbonates, quartz et CO<sub>2</sub>.

## Chapitre III. Valorisation des mâchefers comme ajout dans la fabrication du ciment

### III.1 Introduction

Le chapitre président montre que les caractéristiques physiques et chimiques des mâchefers sont semblables à celles d'autres matières utilisées habituellement dans la fabrication du ciment. Ce chapitre porte essentiellement sur la valorisation des deux types des mâchefers en tant que substitut du ciment et matière première secondaire pour la préparation du cru. Les caractéristiques physiques et mécaniques des ciments préparés ont été étudiées. La composition chimique et minéralogique des clinkers a été déterminée.

### III.2 Caractérisation de CEMI 42.5N

#### III.2.1 Composition chimique

Le tableau III.1 résume la composition chimique du ciment utilisé. Le ciment CEMI 42.5N contient les mêmes oxydes comme les deux mâchefers, mais il y a une différence dans leur pourcentages, 62,95 % de CaO et 22,16 % de SiO<sub>2</sub> ; leurs teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, SO<sub>3</sub>, CaO<sub>1</sub> ainsi que la perte au feu (PAF) sont inférieures à 5 %.

**Tableau III.1:** Composition chimique du CEMI 42.5N.

	SiO <sub>2</sub>	CaO	FeO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>1</sub>	PAF
<i>Composition chimique (%)</i>	22.16	62.95	3.47	4.88	0.93	2.25	1.05	1.22

### III.3 Surface spécifique Blaine

Les surfaces spécifiques Blaine (SSB) des ciments préparés avec les mâchefers sont présentées dans la figure III.1. Les résultats montrent que la SSB augmente avec l'augmentation de l'ajout des deux types des mâchefers dans le ciment. Les ciments préparés avec les MIRSU2 avec des pourcentages de 5 % et de 10 % ont une surface spécifique Blaine supérieure à ceux préparés avec les MIRSU1. La SSB peut atteindre jusqu'au 4 374 cm<sup>2</sup>/g pour le ciment préparé avec 20 % de MIRSU1 et elle est de 4 352 cm<sup>2</sup>/g pour le ciment préparé avec 20 % de MIRSU2.

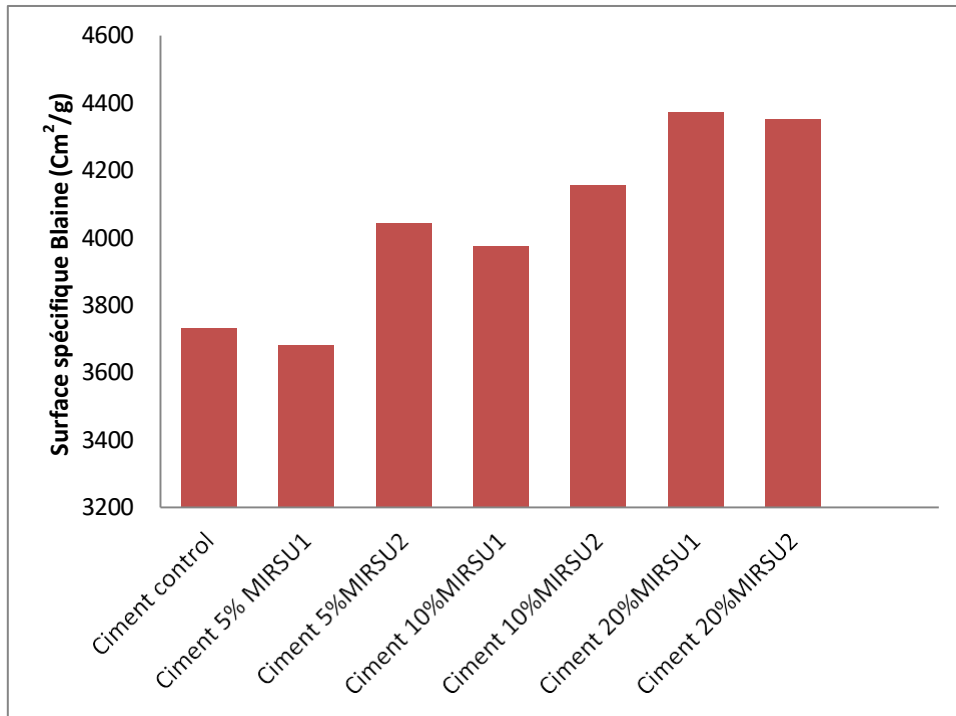


Figure III.1: Surface spécifique Blaine des ciments préparés.

#### III.4 Propriétés physiques des pâtes de ciment

La demande en eau pour une consistance normale, le temps de prise initial et l'expansion des ciments préparés sont indiqués dans le tableau III.2. On constate que l'incorporation des deux mâchefers dans le ciment peut légèrement augmenter la demande en eau pour une consistance normale par rapport à celle du ciment de référence qui est de 145 g. Les ciments préparés avec 5 %, 10 % et 20 % de MIRSU1, la demande en eau est de 150 g, 155 g et 155 g respectivement. On remarque que la demande en eau des ciments contenant 10 % et 20 % de MIRSU2 est plus élevée, elle est de 160 g et 170 g respectivement. Cette augmentation de la demande en eau a également été approuvée par Xiang-Guo Li (2012) [19], lors du remplacement de différentes proportions de ciment par les mâchefers. La teneur en oxyde de calcium est plus élevée dans les MIRSU2 que dans les MIRSU1, ce qui veut dire que la réaction entre l'oxyde de calcium et l'eau augmente la demande en eau [19]. La perte au feu élevée des deux mâchefers est également responsable de l'augmentation de la demande en eau, parce que les particules de carbone non brûlées dans les mâchefers absorbent l'eau libre [149].

Le temps de prise initial du ciment préparé avec 5 % des deux mâchefers est approximativement similaire à celui du ciment de contrôle. Le temps de prise initial est retardé avec l'augmentation des niveaux des MIRSU1 dans le ciment, ce retard qui est de 39 min est observé lorsque le ciment est remplacé par 10 % de MIRSU1 et il est de 157 min avec

20 % de MIRSU1 par rapport au ciment contrôle. Ces résultats peuvent être expliqués par la diminution de la teneur en alite ( $C_3S$ ) lorsque le ciment est remplacé par les MIRSU1, ce composant est essentiel pour le processus d'hydratation dans les premières heures.

La teneur élevée en métaux lourds dans les mâchefers est un autre facteur qui retarde l'hydratation, comme l'ont montré des études antérieures [14], [18], [19]. Les MIRSU1 contiennent des teneurs élevées en Zn, Cu, Cd, Cr et Pb [149-151], leur hydrolyse forme des hydroxydes métalliques qui précipitent à la surface du  $C_3S$  et retardent la nucléation de la portlandite (CH) et du silicate de calcium hydraté (C-S-H) au cours des premières heures [79]. Le temps de prise initial des pâtes de ciment contenant 10 % et 20 % de MIRSU2 est réduit de 11 min et 9 min par rapport à celui des pâtes de ciment sans MIRSU2. Cette diminution s'explique par l'existence d'alite ( $C_3S$ ) et d'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) dans les MIRSU2, comme le montrent les résultats de DRX, ces composés s'hydratent dans le ciment mélangé en présence d'eau aux premières heures en formant du CH, du C-S-H et de l'ettringite. En outre, les teneurs plus faibles en métaux lourds dans les MIRSU2 par rapport au MIRSU1 entraînent une diminution du temps de prise initial. La teneur de 39,06 % en oxyde de calcium dans les MIRSU2 peut accélérer le processus d'hydratation car sa dissolution entraîne la formation du composé CH.

L'expansion de toutes les pâtes de ciments préparés avec les MIRSU1 et les MIRSU2 se situe entre 0.5 mm et 2 mm. Les valeurs de l'expansion sont légèrement supérieures à celle du ciment de référence 0.0 mm, mais elles sont inférieures à la valeur limite qui est de 10 mm recommandée par la norme EN 197-1 [20]. Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes [14].

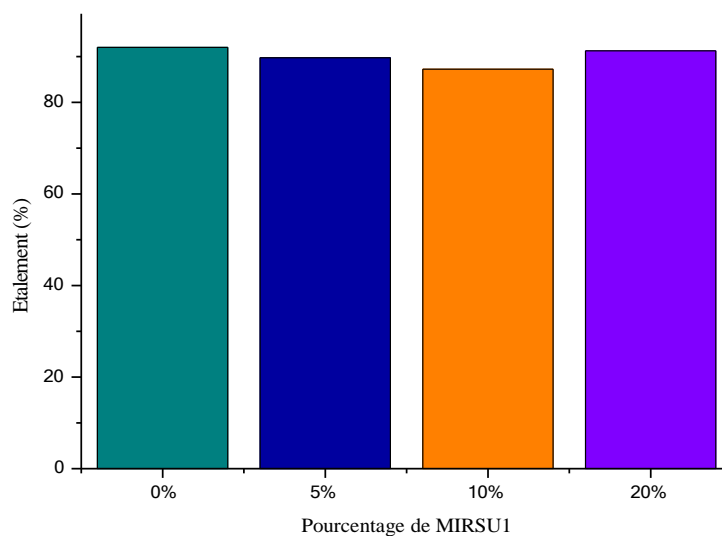
**Tableau III.2:** Propriétés physiques des pâtes de ciment.

Echantillons	Proportions (%)			Consistance (%)	Temps de prise initial (min)	Expansion (mm)
	CEMI	MIRSU1	MIRSU2			
CEMI	100	0	0	29	124	0.0
5 % MIRSU1 CEMI	95	5	0	30	125	0.5
10 % MIRSU1 CEMI	90	10	0	31	163	1.0

20 % MIRSU1 CEMI	80	20	0	31	281	2.0
5 % MIRSU2 CEMI	95	0	5	30	123	0.5
10 % MIRSU2 CEMI	90	0	10	32	113	1.0
20 % MIRSU2 CEMI	80	0	20	34	115	1.0

### III.5 Etalements des mortiers

L'étalement des mortiers frais contenant 5 %, 10 % et 20 % des MIRSU1 est respectivement de 89,75 %, 87,25 % et 91,25 % (Figure III.2), elle diminue légèrement par rapport à celle du mortier de référence qui est de 92 %. De plus, l'étalement des mortiers avec 5 %, 10 %, et 20 % des MIRSU2 diminue progressivement, elle est de 91 %, 83.66 %, et 80.33 %, respectivement (Figure III.3). Cette diminution expliquée par la haute teneur en oxyde de calcium [19], la haute PAF [147], et la grande surface spécifique qui est de 6 634.64 cm<sup>2</sup>/g [150] des MIRSU2, ce qui explique l'augmentation de la demande en eau. Ces résultats confirment l'augmentation de la demande en eau pour une consistance normale de tous les ciments contenant les MIRSU1 et les MIRSU2. Des résultats similaires ont été observés dans la littérature [14].



**Figure III.2** : Etalement des mortiers préparés avec les MIRSU1.

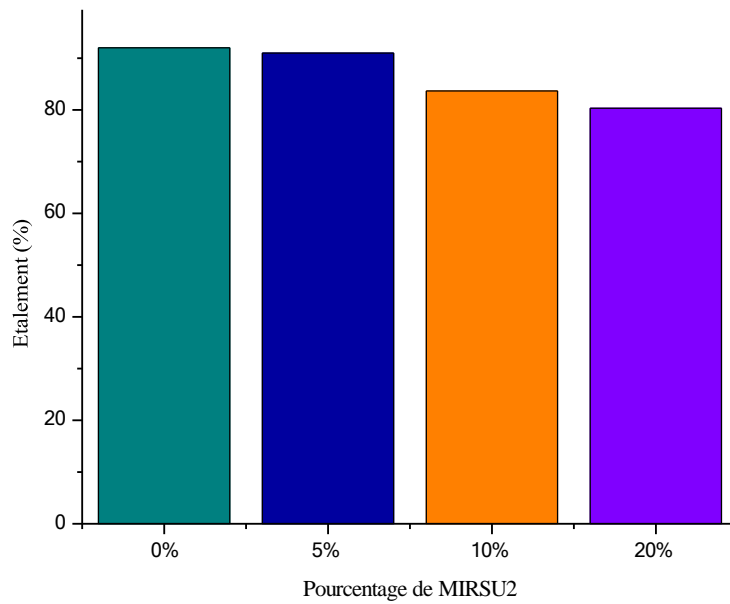


Figure III.3 : Etalement des mortiers préparés avec les MIRSU2.

### III.6 Propriétés mécaniques

#### III.6.1 Résistances à la flexion

Les figures III.4 et III.5 montrent l'impact des MIRSU1 et des MIRSU2 sur les résistances à la flexion des mortiers au cours de 2, 7, 28 et 90 jours de durcissement. Les valeurs des résistances à la flexion des ciments contenant 5 % et 10 % de MIRSU1 et de MIRSU2 augmentent légèrement à 2 jours et diminuent légèrement à 7 jours par rapport aux valeurs de résistance du ciment de contrôle qui sont de 3,46 MPa à 2 jours et de 6,90 MPa à 7 jours. Les résistances à la flexion du ciment contenant 20 % de MIRSU1 sont de 3,46 et 5,16 MPa à 2 jours et 7 jours, respectivement. Les résistances à la flexion du ciment contenant 20 % de MIRSU2 sont de 3,41 et de 4,77 MPa à 2 jours et 7 jours, respectivement. Les résultats de la résistance à la flexion à 7 jours de cure sont inférieurs à ceux du mortier de contrôle. Ce constat est dû au fait que le ciment a été dilué par l'ajout de 20 % de mâchefers.

Après 28 jours et 90 jours de cure, les résistances à la flexion du ciment de référence sont respectivement 7,68 et 7,79 MPa. La résistance à la flexion diminue progressivement avec l'augmentation des teneurs des deux mâchefers dans le ciment. Après 28 jours, le remplacement de 5 %, 10 % et 20 % du ciment par les MIRSU1 donne des résistances à la flexion de 7,02, 6,97 et 6,24 MPa respectivement, tandis qu'à 90 jours, les résistances à la flexion sont respectivement 7,21; 6,86 et 5,98 MPa. D'autre part, les résistances à la flexion des ciments contenant 5%, 10 % et 20 % de MIRSU2 sont respectivement 7,30; 6,73 et

6,14 MPa à 28 jours. En outre, les résistances à la flexion sont respectivement 7, 55; 6, 79 et 5, 60 MPa à 90 jours.

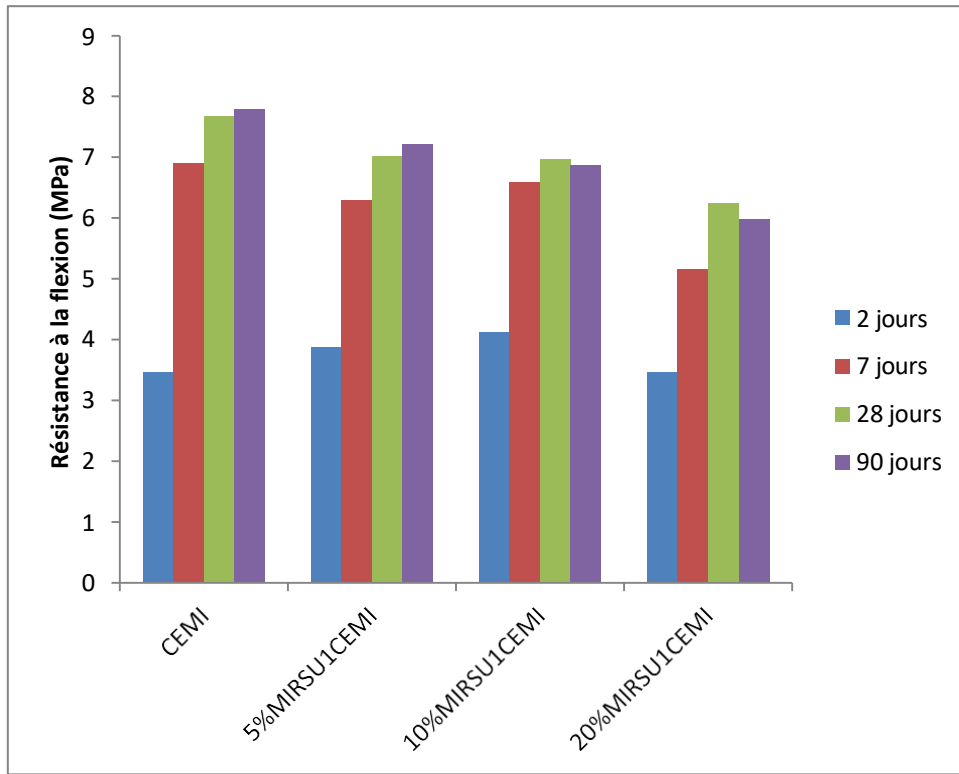


Figure III.4: Effet des MIRSU1 sur les résistances à la flexion des mortiers.

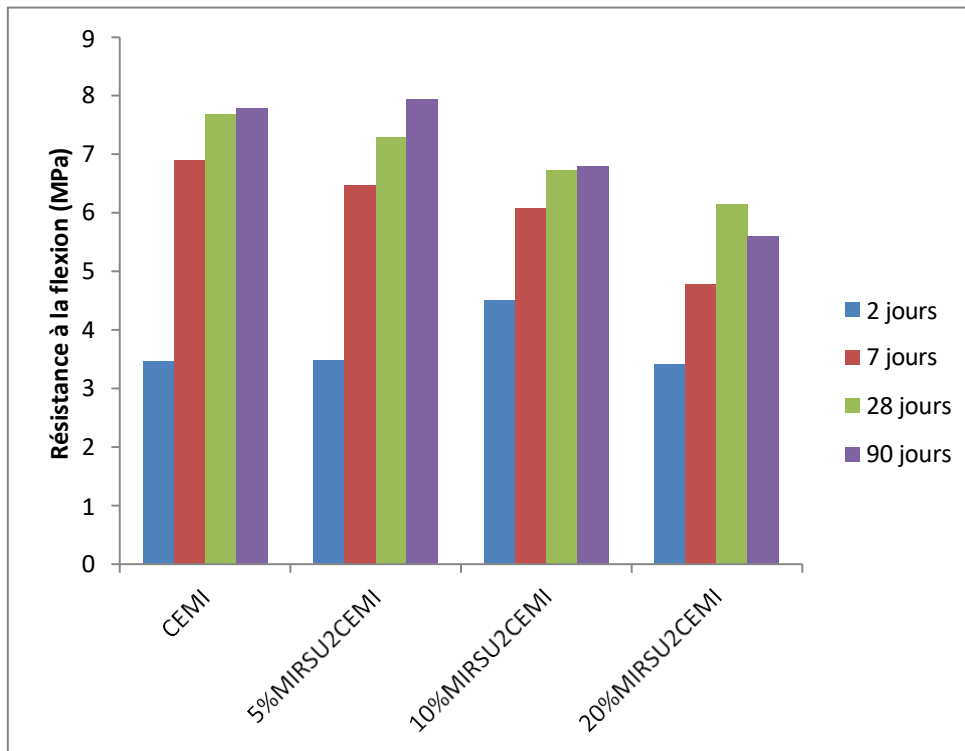


Figure III.5: Effet des MIRSU2 sur les résistances à la flexion des mortiers.

### **III.6.2 Résistances à la compression**

L'effet des MIRSU1 et des MIRSU2 sur les résistances à la compression des mortiers à 2, 7, 28 et 90 jours de cure est présenté dans les figures III.6 et III.7. Les résistances à la compression du ciment de référence à 2 et 7 jours sont respectivement 15, 78 et 41, 98 MPa. On remarque que les résistances à la compression des ciments contenant 5 % et 10 % de MIRSU1 après 2 jours sont respectivement 19, 68 et 20, 86 MPa. Tandis que, les résistances à la compression après 7 jours sont respectivement 42, 94 et 45, 12 MPa. Il en va de même pour les ciments préparés avec 5 % et 10 % des MIRSU2 ; après 2 jours, les résistances à la compression sont respectivement 21,30 et 21,83 MPa, tandis que les résistances à la compression après 7 jours sont respectivement 44, 93 et 43, 93 MPa.

Par rapport aux résultats des résistances à la compression à 2 et 7 jours du ciment de contrôle, il y a une augmentation des résistances à la compression des ciments avec 5 % et 10 % de MIRSU2. Cette augmentation des résistances à 2 et 7 jours explique que l'ajout des MIRSU2 accélère le processus d'hydratation pendant dès les premiers jours, l'hydratation est réalisée par la réaction des différents composés du ciment et des mâchefers ( $C_3A$ ,  $C_3S$ ,  $CaO$ ) avec l'eau et formant ensuite des hydrates comme l'ettringite, CH et C-S-H.

Comme le montrent les résultats précédents concernant le temps de prise, les métaux lourds retardent le processus d'hydratation du ciment avec les MIRSU1, et les résistances à la compression à 2 et 7 jours de ce mélange ont donc augmenté par rapport à celles du ciment témoin, cette augmentation étant attribuée à la nucléation de C-S-H lorsque les métaux lourds ont précipité avec l'hydroxyde de calcium [150].

Les résistances à la compression des ciments avec 20 % des MIRSU1 et 20 % des MIRSU2 après 2 jours sont respectivement 16 et 14,29 MPa, tandis que les résistances à la compression après 7 jours de ces mélanges sont respectivement 32,59 et 29,11 MPa. D'après ces résultats, on remarque une diminution remarquable des résistances à la compression par rapport à celles des ciments avec 5 % et 10 % des deux types de mâchefers. Cette réduction est liée à la diminution de la quantité d'alite ( $C_3S$ ) lors du remplacement du ciment avec 20 % des deux mâchefers [90]. Il a été observé que les résistances à la compression du ciment avec 20 % de MIRSU1 sont légèrement plus élevées que celles du ciment avec 20 % de MIRSU2, ceci s'explique par les teneurs faibles en métaux lourds dans les MIRSU2.

Les résistances à la compression des ciments contenant 5 % et 10 % des MIRSU1 sont respectivement 57, 31 MPa, 57, 18 MPa à 28 jours, et 66, 41 MPa, 63, 67 MPa à 90 jours. Pour les ciments préparés avec 5 % et 10 % des MIRSU2, les résistances à la compression sont respectivement 58, 90 MPa, 57, 80 MPa à 28 jours, et 65, 86 MPa, 61, 12 MPa à 90

jours. En comparant ces résultats avec ceux du mortier contrôle (60.94 MPa à 28 jours, 71.16 MPa à 90 jours), on constate qu'il y a une légère diminution des résistances à la compression parce que le ciment a été remplacé par de faibles proportions de mâchefers (5 % et 10 %). D'après les travaux de Loginova et al (2021), le remplacement du ciment 42.5 N avec 5 % de mâchefers diminue légèrement les résistances à la compression de 7 %, et 2 % pour 28, et 91 jours, respectivement, par rapport au mortier de contrôle. Ces résultats sont en accord avec les résultats de Loginova et al (2023) [21], ils ont constaté une légère diminution de la résistance à la compression du ciment 52.5R mélangé avec 10 % des mâchefers après 2 jours et une diminution remarquable de la résistance après 28 jours [17].

Les résistances à la compression des ciments contenant 20 % de MIRSU1 et 20 % de MIRSU2 sont respectivement 42, 39 et 36, 44 MPa après 28 jours de durcissement, tandis qu'après 90 jours, les résistances à la compression sont respectivement 47, 28 et 40, 91 MPa. La réduction des résistances à la compression est liée à la diminution de la teneur en bélite ( $C_2S$ ) responsable phase de résistance à des âges plus tardifs lorsque le ciment est remplacé par un niveau élevé des mâchefers (20 %). Cheng et al. (2022) ont prouvé que la réduction de la résistance à la compression augmentait avec l'augmentation de la teneur des mâchefers dans le ciment après 28 jours de cure [152]. Les résultats montrent que les résistances à la compression du ciment avec 20 % de MIRSU1 sont plus élevées que celles du ciment avec 20 % de MIRSU2. Ces constats s'expliquent une faible réactivité pouzzolanique des MIRSU2 à des âges plus tardifs.

Les MIRSU1 contiennent une grande quantité de  $SiO_2$  qui est de 37,86 %, cette quantité a donc réagi avec le CH provenant de l'hydratation des composés actifs du ciment et a formé des C-S-H supplémentaires. Les résultats des résistances à la compression des types de ciment contenant des quantités élevées de MIRSU1 et de MIRSU2 (20 %) à 28 jours sont similaires aux résultats obtenus dans des études antérieures [17-19, 152]. Les résultats obtenus pour les résistances à la compression suggèrent l'utilisation des mâchefers comme ajouts cimentaires jusqu'à 10 %, car les résistances à la compression du CEMI 42.5N avec 5 % et 10 % de mâchefers est conforme aux normes ( $> 40MPa$  à 28 jours).

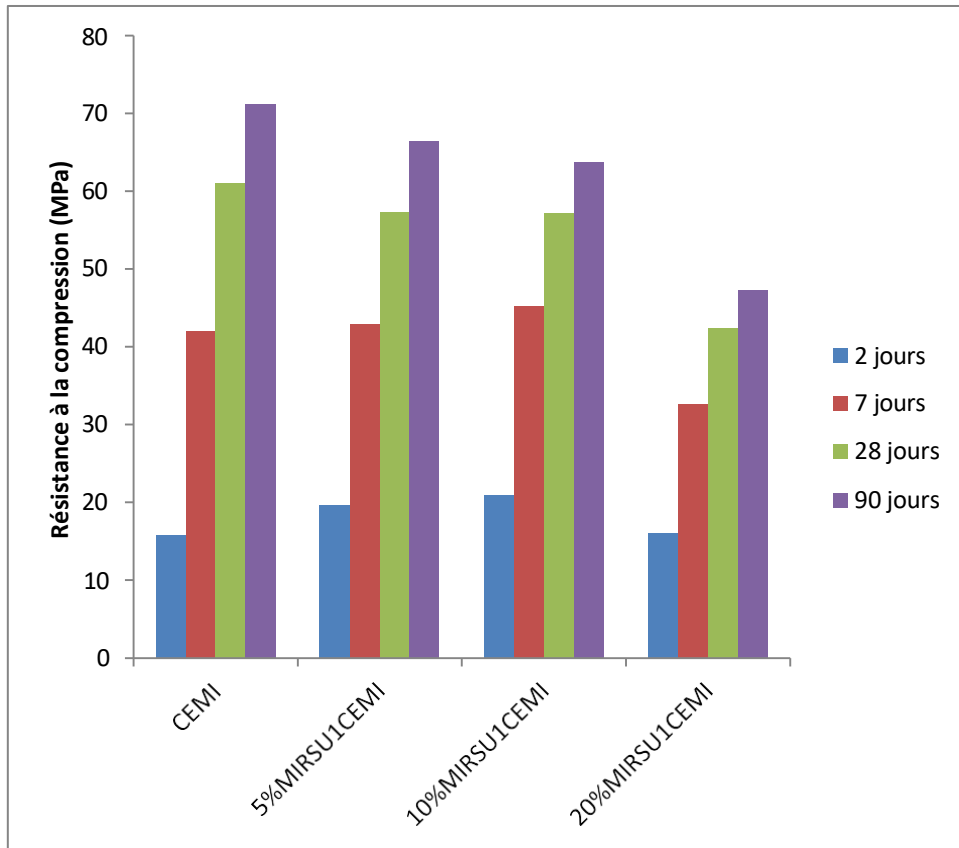


Figure III.6: Effet des MIRSU1 sur les résistances à compression des mortiers.

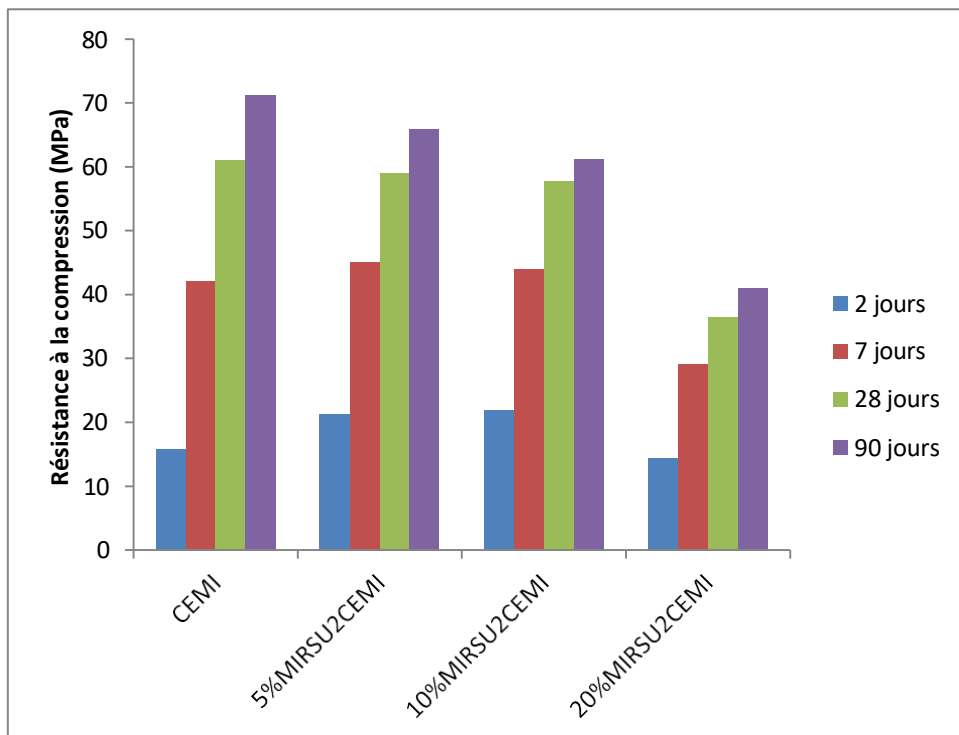


Figure III.7: Effet des MIRSU2 sur les résistances à compression des mortiers.

### III.7 Absorption capillaire

Les coefficients d'absorption capillaire des divers mortiers de ciment avec les MIRSU1 et les MIRSU2 ont également été mesurés à l'âge de 28 jours et sont illustrés dans les figures III.8 et III.9.

Pour les mortiers de ciment préparés avec les MIRSU1 (figure III.8), on constate que les coefficients d'absorption du mortier de ciment avec 10 % de MIRSU1 sont presque similaires avec ceux du mortier témoin dans l'intervalle du temps de 5 min à 8 h, après ils augmentent à une valeur de 2.62 kg/m<sup>2</sup> à 24 h. Les mortiers préparés avec 5 % et 20 % de MIRSU1 ont des coefficients d'absorptions supérieures à ceux des mortiers témoin, ils sont respectivement 2.50 kg/m<sup>2</sup> et 3.34 kg/m<sup>2</sup> à 24 h.

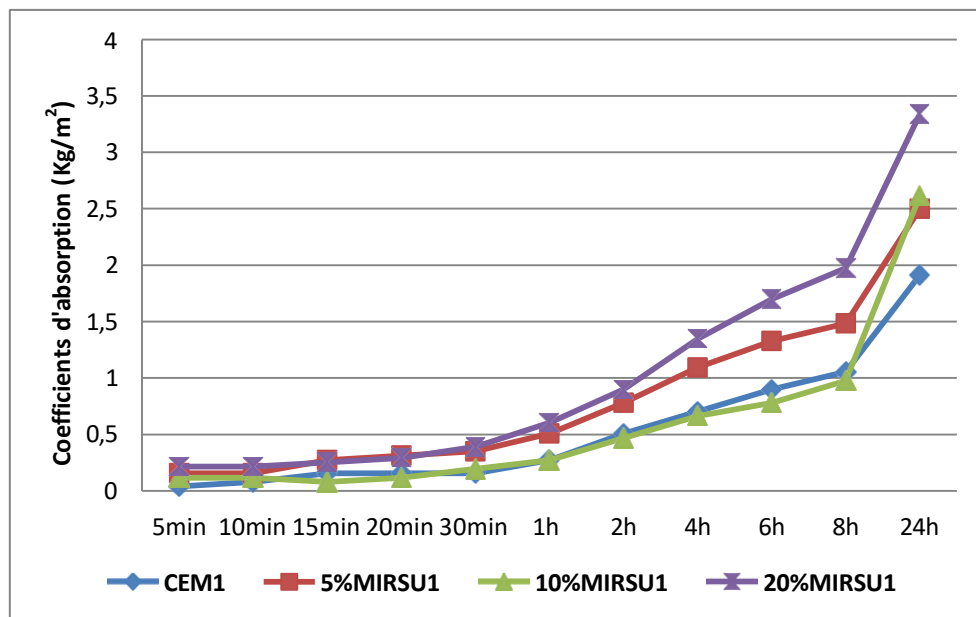


Figure III.8: Coefficients d'absorption capillaire du mélange Mortier-MIRSU1.

Pour les mortiers de ciment préparés avec les MIRSU2 (Figure III.9), on note que les coefficients d'absorption augmentent avec l'augmentation de pourcentage de l'ajout des mâchefers et avec le temps, les valeurs maximales sont enregistrés à 24h, ils sont de l'ordre de 1.91 kg/m<sup>2</sup>, 2.28 kg/m<sup>2</sup>, 2.58 kg/m<sup>2</sup>, et 2.81 kg/m<sup>2</sup> pour les mortiers de ciment préparés avec 0 %, 5 %, 10 %, 20 % de MIRSU2 respectivement. Cette augmentation est expliquée par la modification du volume et la taille des pores des ciments préparés avec les MIRSU2 [87].

D'après les résultats, les mortiers de ciment préparés avec 20 % des MIRSU1 ont un coefficient d'absorption supérieur à celui du mortier de ciment préparé avec 20 % de MIRSU2. Ces résultats se traduisent par la nature des MIRSU1 qui ont un caractère poreux supérieur par rapport aux MIRSU2.

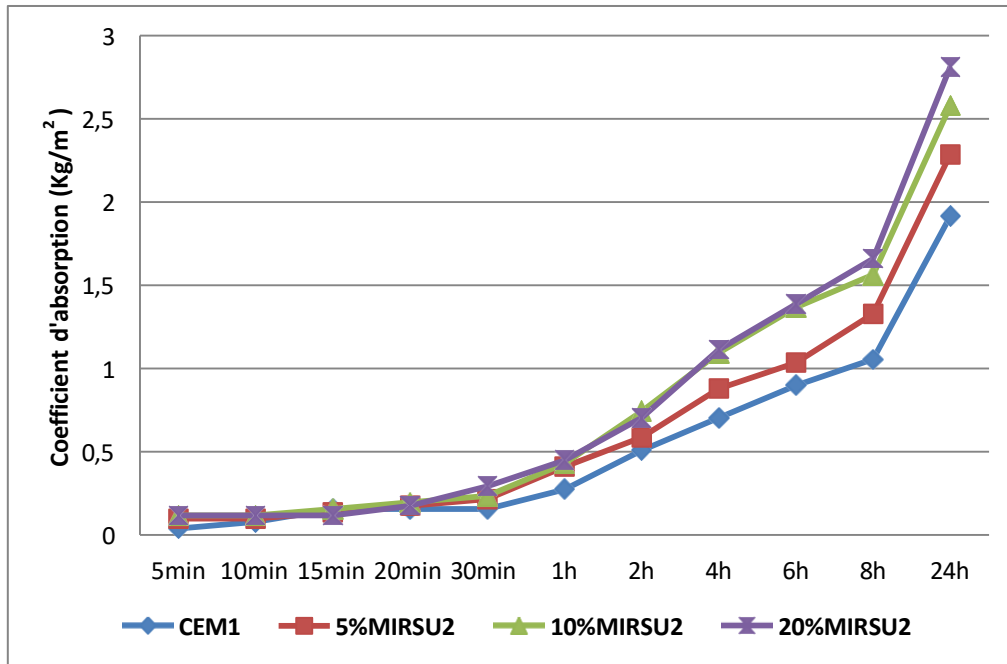


Figure III.9: Coefficient d'absorption capillaire du mélange Mortier-MIRSU2.

### III.9 Caractérisation chimiques du ciment CRS utilisé

#### III.9.1 Composition chimique des ciments préparés

Les résultats de la caractérisation chimique des ciments résistant au sulfate (CRS) préparés avec l'ajout de 5 % des deux types de mâchefers au clinker sont présentés dans le tableau III.3. Les résultats des analyses chimiques montrent que les ciments préparés avaient une composition chimique en SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, CaO<sub>1</sub> et PAF presque similaire en oxydes, ce qui montre la similarité de la composition chimique du ciment CRS et les deux types des mâchefers.

Tableau III.3: Composition chimiques des ciments CRS préparés.

	CRS témoin	CRS 5% MIRSU1	CRS 5% MIRSU2
SiO <sub>2</sub>	20.84	20.36	22.62
CaO	61.29	62.26	61.45
MgO	0.81	0.81	0.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.29	5.52	5.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.82	3.96	3.96
SO <sub>3</sub>	2.18	2.08	2.27
CaO <sub>1</sub>	0.35	0.35	0.35
PAF	3.68	3.53	2.29

### III.9.2 Surface spécifique Blaine des ciments CRS préparés

La surface spécifique Blaine (SSB) des ciments préparés avec 5 % MIRSU1 et 5 % MIRSU2 sont illustrés dans la figure III.10. La SSB des ciments est supérieure à 3000 cm<sup>2</sup>/g.

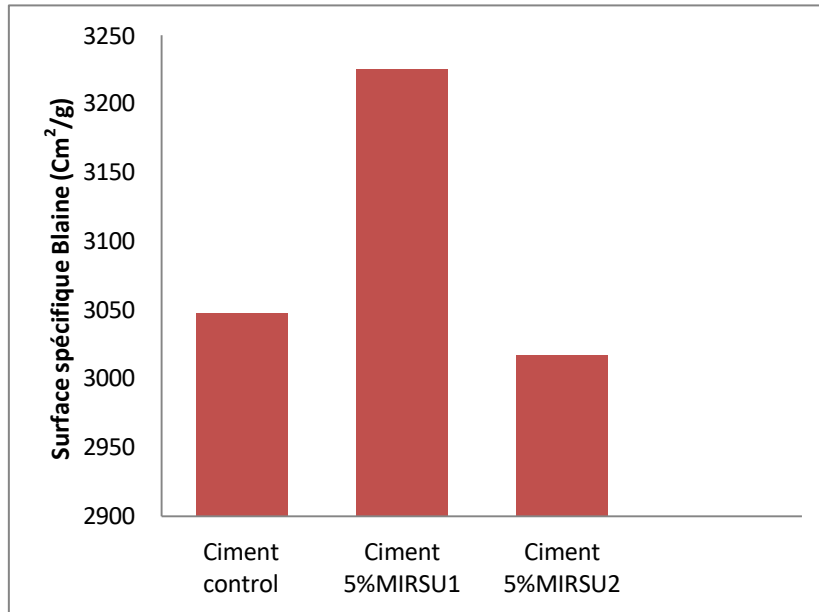


Figure III.10 : Surface spécifique Blaine des ciments CRS.

### III.10 Propriétés physiques des ciments préparés

La demande en eau pour la consistance normale, le temps de prise initial et l'expansion des pâtes de ciment CRS sont résumés dans le tableau III.4. Les résultats montrent que la substitution de 5 % de clinker RS par les MIRSU1 et les MIRSU2 diminue légèrement la demande en eau pour une consistance normale en comparaison avec celle du ciment contrôle. Le temps de prise initial du ciment avec 5 % MIRSU2 est légèrement plus rapide que celui de l'échantillon de contrôle. Par contre le temps de prise initial du ciment avec 5% MIRSU1 est plus long que ceux de l'échantillon de contrôle et ciment 5 % MIRSU2.

L'expansion est de 0 mm pour les pâtes du ciment contrôle, ciment 5 % MIRSU2, et 0,5 mm pour le ciment 5 % MIRSU1, donc elle est inférieure à 10 mm selon la norme EN 197-1.

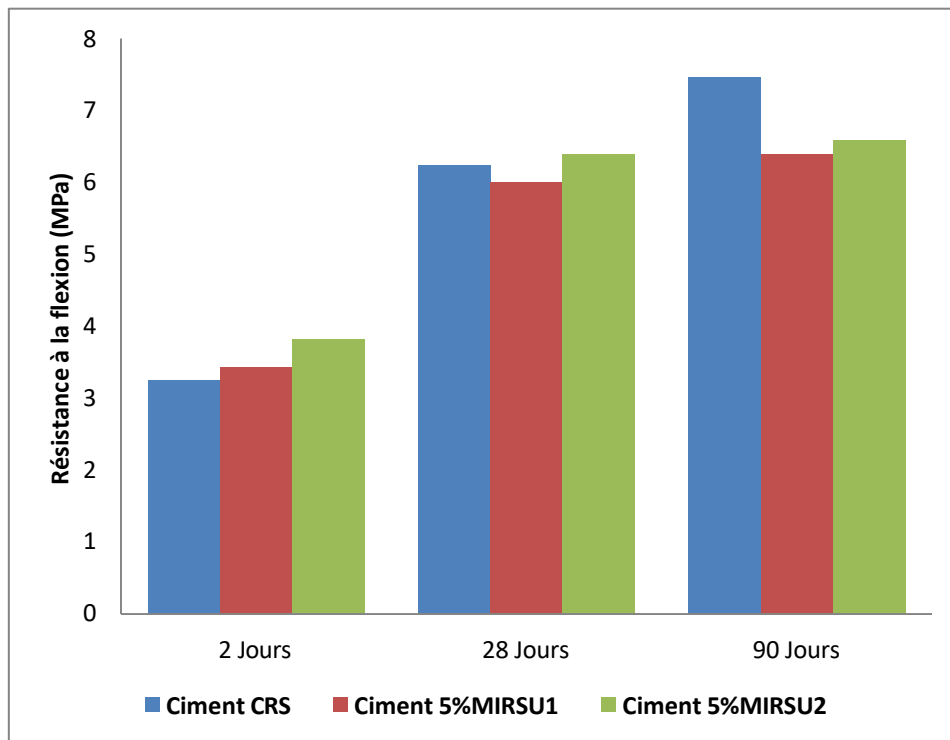
Tableau III.4: Propriétés physiques des pâtes de ciment CRS.

	Consistance (%)	Temps de prise initial (min)	Expansion (mm)
<i>Ciment CRS Control</i>	25.2	247	0.0
<i>Ciment 5%MIRSU1</i>	25	356	0.5
<i>Ciment 5%MIRSU2</i>	24	193	0.0

### III.11 Propriétés mécaniques des mortiers

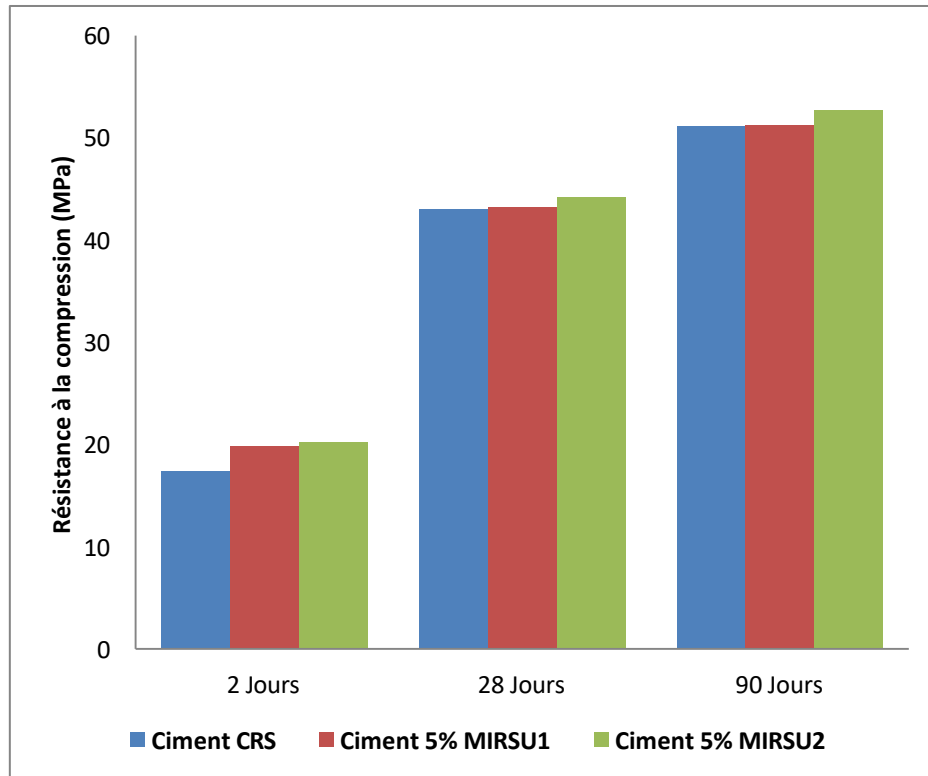
L'effet de l'incorporation des deux types des mâchefers sur les propriétés mécaniques des mortiers de ciments CRS préparés à 2 jours, 28 jours, et 90 jours est présenté dans les figures III.11 et III.12.

Les résultats montrent que les résistances à la flexion (Figure III.11) des mortiers de ciments avec 5 % de MIRSU1 et 5 % de MIRSU2 sont respectivement 3.43 MPa et 3.81 MPa en 2 jours, 6 MPa et 6.36 MPa en 28 jours ,6.39 MPa et 6.58 MPa à 90 jours. Ces résultats sont comparables à ceux du mortier de référence qui a des résistances à la flexion de 3, 25 MPa, 6, 24 MPa et 7, 45 MPa à 2 jours, 28 jours et 90 jours respectivement.



**Figure III.11:** Résistances à la flexion des mortiers de ciments CRS en 2 jours, 28 jours, et 90 jours.

Les résistances à la compression (Figure III.12) des mortiers de ciments avec 5 % de MIRSU1 et 5 % de MIRSU2 sont respectivement 19.82 MPa et 20.23 MPa en 2 jours, 43.20 MPa et 44.14 MPa en 28 jours ,51.16 MPa et 52.65 MPa en 90 jours. Ces résultats sont légèrement supérieurs à ceux du mortier de référence qui a des résistances à la compression de 17.34 MPa, 43.03 MPa et 51.06 MPa en 2 jours, 28 jours et 90 jours respectivement. Ces résultats sont comparables avec ceux des recherches antérieures [21].



**Figure III.12:** Résistances à la compression des mortiers de ciments CRS en 2 jours, 28 jours, et 90 jours.

### III.12 Impact de la valorisation des RSU et les mâchefers sur l'environnement

Dans la Wilaya de Chlef la mise en décharge des RSU dans les décharges sauvages et dans les centres d'enfouissement techniques est le seul traitement utilisé dans l'heure actuel. Ce mode de traitement est très néfaste pour l'environnement. Ce genre de traitement engendre les lixiviats qui peuvent contaminer les sols arables et les eaux souterraines dans le cas des décharges sauvages et/ou la pollution de l'atmosphère par les émissions des gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ , etc.), ainsi que les grandes superficies utilisés pour enfouir de colossales quantités de déchets. Ce mode de traitement peut minimiser les quantités des RSU, mais il engendre la pollution de l'environnement (Eau, air et sol).

D'autres méthodes de traitement peuvent être choisies, tels que la valorisation biologique de la fraction fermentescibles par compostage en amendements organiques et/ou méthanisation en digestâts et biogaz. Aussi, la valorisation énergétique de certaines catégories des résidus solides urbains par incinération dans le cas de la fabrication du ciment ou autres matériaux.

La quantité des RSU générés par la population de la commune de Chlef a été estimée à 68 620 tonnes/an, au cours de la présente étude, l'incinération d'une tonne des RSU a donné une quantité de 6 862 tonnes/an de mâchefers, et l'incinération d'une 500 kg de putrescibles, papiers, et cartons a donné une quantité de 7 548.2 tonnes/an de mâchefers.

La substitution de 5 % et 10 % du ciment d'un sac de 50 kg permet d'utiliser 2.5 kg et 5 kg des deux types de mâchefers (tableau III.5).

La valorisation de ces résidus dans la fabrication du ciment permet le traitement total des RSU et la réduction des prix de production du ciment.

**Tableau III.5** : Bilan global.

	<b>Quantité de mâchefers</b>
<i>10 % de MIRSU1 générés</i>	6862000 kg/an
<i>11 % de MIRSU2 générés</i>	7548200 kg/an
<i>5 % de MIRSU dans un sac du ciment de 50 kg</i>	2.5 kg
<i>10 % de MIRSU dans un sac du ciment de 50 kg</i>	5 kg

### **III.13 Clinkérisation**

#### **III.13.1 Caractérisation chimique des matières premières**

Les résultats de la caractérisation chimique des matières premières utilisés pour la fabrication du clinker sont récapitulés dans le tableau III.6. Les résultats montrent que le calcaire contient 51.58 % de CaO, donc il est la source de la chaux, par contre, l'argile qui est la source de la silice et alumine contient 63.28 % de SiO<sub>2</sub> et 17.20 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Le minerai de fer est une matière corrective pour le mélange cru, comporte à la fois des quantités importantes, 31.22 % de SiO<sub>2</sub> et 43.84 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. D'après les résultats de la caractérisation chimique des mâchefers, on remarque que ses composants sont similaires à ceux des matières premières. Les MIRSU1 contient des quantités importantes 38, 16 % de SiO<sub>2</sub> et 28.05 % de CaO. D'après ces résultats leur utilisation comme matière première secondaire pour la préparation du clinker réduit les taux des matières habituellement utilisés.

**Tableau III.6:** Composition chimique des matières premières.

	<b>Calcaire</b>	<b>Argile</b>	<b>Minerai de fer</b>	<b>MIRSU1</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	4.62	63.28	31,22	38.16
<b>CaO</b>	51.58	2.58	8,38	28.05
<b>MgO</b>	0.69	1.74	0,46	0.34
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.15	3.45	43,84	1.83
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.73	17.20	3,22	5.57
<b>PAF</b>	40.65	5.73	12,08	21.79

Le tableau III.7 présente les éléments trace métalliques contenus dans les matières utilisées pour la préparation du cru. Les résultats montrent qu'il y a une variation des quantités de métaux lourds (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sb, Ba, Pb) dans une matière à l'autre. Cette variation dépend de l'origine et de la composition de chaque matière.

**Tableau III.7:** Eléments trace métalliques contenus dans les matières premières.

<b>Eléments</b>	<b>Calcaire (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Argile (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Minerai de fer (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>MIRSU1 (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
<b>V</b>	19.56	126.31	48.30	27.74
<b>Cr</b>	23.47	138.58	346.62	642.47
<b>Co</b>	1.34	20.61	12.87	12.93
<b>Ni</b>	6.73	55.62	178.52	270.09
<b>Cu</b>	5.66	59.67	17.31	393.11
<b>Zn</b>	99.38	194.63	893.89	2 374.95
<b>As</b>	10.32	6.59	444.37	7.88
<b>Mo</b>	< 6	< 6	11.50	< 6
<b>Cd</b>	< 1	< 1	< 1	64.96
<b>Sb</b>	< 2	< 2	109.51	54.09
<b>Ba</b>	21.98	319.49	2 388.10	738.25
<b>Pb</b>	3.74	32.87	227.72	236.42

### III.13.2 Analyse chimique des crus préparés

Les résultats de calcul et l'analyse chimique des mélanges crus préparés sont illustrés dans le tableau III.8. L'analyse expérimentale montre que les crus préparés présentent une composition chimique en oxydes comparable avec celle obtenue par le calcul. Les modules cimentaires (LSF, SR, AF) sont proches de ceux du calcul.

Tableau III.8 : Composition chimique des crus préparés.

	CRU (2 % MIRSU1)		CRU (4 % MIRSU1)		CRU (6 % MIRSU1)		CRU (8 % MIRSU1)	
	Calcul	Analyse	Calcul	Analyse	Calcul	Analyse	Calcul	Analyse
<b>SiO<sub>2</sub></b>	14.45	13.61	14.50	13.84	14.69	14	14.67	13.82
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.34	3.41	3.25	3.28	3.22	3.40	3.11	2.92
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2.01	2.67	2.12	2.57	2.03	2.89	2.13	2.89
<b>CaO</b>	43.21	42.39	43.20	42.76	43.18	42.63	43.22	42.39
<b>MgO</b>	0.84	0.6	0.82	0.15	0.8	0.46	0.78	0.46
<b>PAF</b>	34.669	35.24	34.626	35.37	34.563	35.03	34.561	34.95
<b>LSF</b>	94.51	95.6	94.3	94.74	93.35	93.59	93.7	95
<b>SM</b>	2.70	2.24	2.7	2.36	2.8	2.23	2.8	2.38
<b>AM</b>	1.66	1.28	1.53	1.25	1.59	1.18	1.46	1.01

### III.13.3 Analyse chimique du clinker

La composition chimique des clinkers préparés en oxydes (% SiO<sub>2</sub>, % CaO, % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) est tabulée dans le tableau III.9. Les pourcentages en oxydes des échantillons de clinkers préparés sont similaires, car les modules cimentiers des mélanges crus sont plus proches à ceux de calcule. D'après les résultats l'ajout des mâchefers affecte légèrement la composition chimique du clinker, avec une teneur de 21 % en SiO<sub>2</sub>, 65 % en CaO, 5 % en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 4 % en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ces teneurs en oxydes sont comparables à celles du clinker industriel.

Tableau III.9: Composition chimique des clinkers préparés.

	Clinker Industriel	Clinker (2 % MIRSU1)	Clinker (4 % MIRSU1)	Clinker (6 % MIRSU1)	Clinker (8 % MIRSU1)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	21.62	21.02	21.42	21.56	21.26
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.20	5.27	5.08	5.23	4.48
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.72	4.13	3.98	4.45	4.45
<b>CaO</b>	66.41	65.46	66.16	65.83	65.17
<b>MgO</b>	0.73	0.92	0.23	0.71	0.7
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.17	0.16	0.20	0.13	0.12
<b>Chaux libre</b>	0.37	1.4	1.05	1.05	1.4

(CaO)					
-------	--	--	--	--	--

### III.13.4 Composition minéralogique des clinkers obtenus

Les proportions de l'alite ( $C_3S$ ), de la bélite ( $C_2S$ ), de l'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) et de la ferrite ( $C_4AF$ ) des clinkers ont été déterminées à l'aide du calcul de Bogues (Tableau III.11).

La teneur en  $C_3S$  des clinkers avec 2 %, 4 %, 6 % et 8 % des mâchefers varie de 60 à 64 %. La teneur en  $C_3S$  augmente relativement dans les clinkers avec 4 % et 8 % des mâchefers par rapport à celle du clinker de référence (63 %). La diminution de la teneur en  $C_3S$  dans le clinker avec 6 % des mâchefers est due à l'influence des conditions de cuisson sur la formation du clinker.

Les clinkers préparés avec 2 %, 4 %, 6 % et 8 % de mâchefers ont des teneurs en  $C_2S$  variées de 12 à 16 %. Ces valeurs indiquent que la décomposition du  $C_3S$  en  $C_2S$  peut se produire ou que la formation de  $C_3S$  à partir du  $C_2S$  peut être supprimée [16]. Les proportions de  $C_3A$  et de  $C_4AF$  sont proches dans tous les clinkers préparés.

**Tableau III.11:** Composition minéralogique des clinkers.

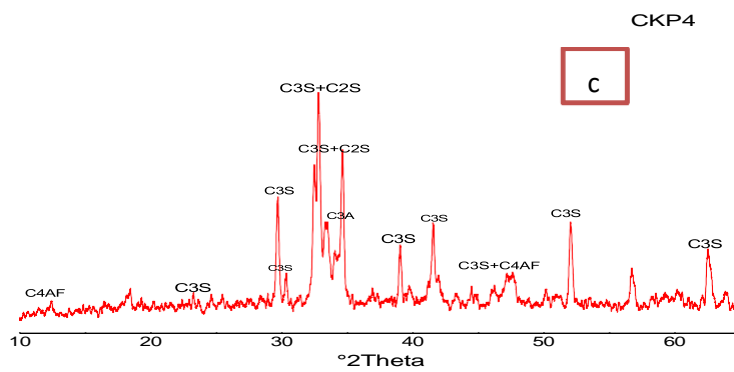
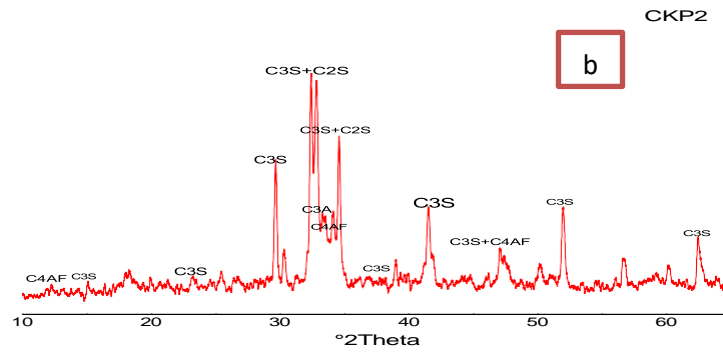
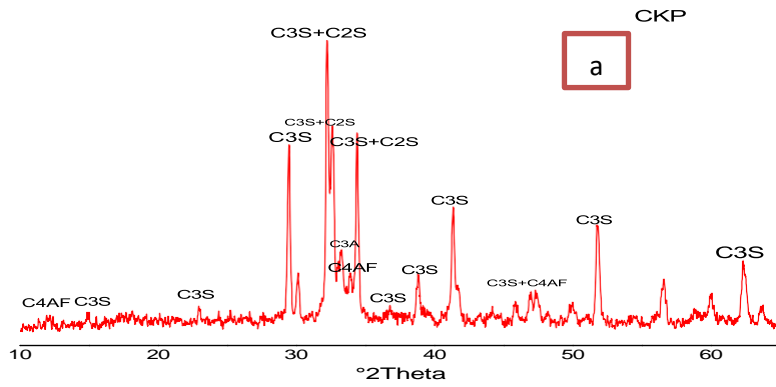
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
CK industriel	63	14.48	7.49	11.31
CK 2 %	62.64	13.04	6.98	12.56
CK 4 %	63.94	13.20	6.73	12.10
CK 6 %	59.85	16.69	6.33	13.53
CK 8 %	64.48	12.33	4.34	13.53

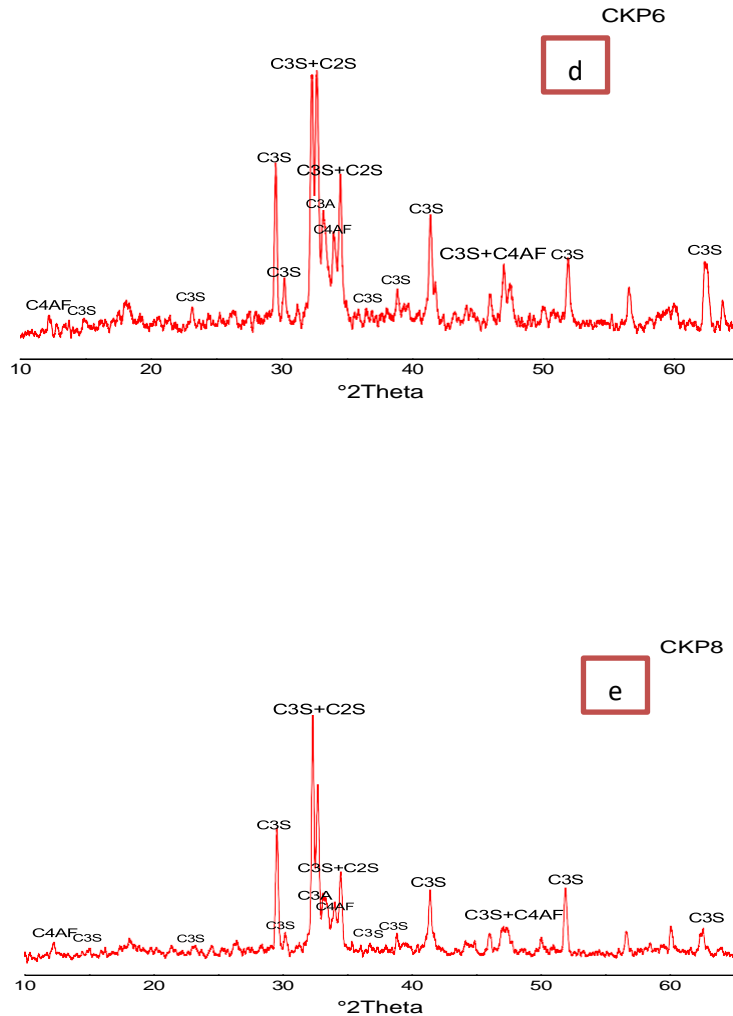
### II.13.5 Analyse structurale des clinkers par DRX

Les résultats de caractérisation minéralogique des clinkers préparés sont présentés par les spectres illustrés dans les figures III.13 a. b. c. d. e. Les principales phases minéralogiques détectées sont  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ , et  $C_4AF$  [16], [108], [153].

D'après les résultats obtenus, les clinkers préparés avec 2 %, 4 %, 6 %, et 8 % de mâchefers ont des phases minéralogiques comparables avec ceux du clinker industriel.

Ces résultats confirment que les conditions de clinkérisation au niveau de laboratoire sont respectées afin de rapprocher le procédé de fabrication industriel du clinker.





Figures III.13: DRX des clinkers préparés. a.CKP, b.CKP2, c.CKP4, d.CKP6, e.CKP8

### III.14 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats des caractéristiques physiques et mécaniques des ciments préparés en utilisant les deux types des mâchefers comme ajout cimentaire, ainsi que les résultats de la caractérisation chimique des crus et clinkers préparés en utilisant les mâchefers comme matière première secondaire, les résultats minéralogiques des clinkers ont été présentés et discutés aussi. Les principales conclusions sont résumées ci-dessous :

Les résultats des caractéristiques physiques des pâtes des ciments montrent que l'ajout progressif des deux types des mâchefers (5 %, 10 %, 20 %) augmente la demande en eau pour les ciments préparés avec les MIRSU1 par rapport au ciment témoin, cette augmentation de la demande en eau est plus grande pour les ciments préparés avec les MIRSU2.

La substitution de 5 %, 10 %, 20 % du ciment par les deux types des mâchefers a une influence sur le temps de prise initial du ciment, tandis qu'il y a une augmentation progressive du temps de prise des ciments préparés avec les MIRSU1 et une réduction du temps de prise des ciments préparés avec les MIRSU2 en comparaison avec du ciment de référence.

L'expansion de tous les ciments mélangés avec MIRSU1 et MIRSU2 était inférieure à la valeur limite 10 mm.

Les résultats des propriétés mécaniques (résistances à la flexion) des mortiers de ciments préparés avec les deux types des mâchefers (5 %, 10 %, 20 %) à court âge (2 jours et 7 jours) et long âge (28 jours et 90 jours) sont comparables avec ceux du ciment témoin, tandis que les résistances à la compression des mortiers ont augmenté au jeune âge (2 jours et 7 jours) lorsque le ciment est remplacé par 5 % et 10 % des deux mâchefers. Les résistances à la compression au long âge ont diminué progressivement avec l'augmentation des teneurs des deux mâchefers ; la perte a été significative à un taux de substitution de 20 %.

Les résultats de la caractérisation chimique des mélanges crus préparés avec 2 %, 4 %, 6 %, 8 % de MIRSU1 montrent que les crus renferment une composition chimique en oxydes (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) comparable avec celle obtenue par le calcul.

Les résultats de caractérisation chimique et minéralogique montrent que les clinkers obtenus contiennent des oxydes (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), des phases minéralogiques alites (C<sub>3</sub>S) et bélites (C<sub>2</sub>S) avec une légère différence dans leurs quantités en comparaison avec le clinker industriel. La teneur de la chaux libre pour tous les clinkers préparés est inférieure à 2 % la valeur limite recommandée dans toutes les cimenteries.

## **CONCLUSION GENERALE**

## **Conclusion générale**

Cette étude se focalise sur plusieurs objectifs majeurs. Tout d'abord, elle a étudié la faisabilité de l'incinération des résidus solides urbains (RSU) à Chlef et a également évalué comment la composition des RSU avant incinération influence les propriétés des mâchefers générés. Dans un deuxième temps, elle a examiné le recyclage des mâchefers comme matériaux cimentaires additionnels ainsi que leur utilisation en tant que matières secondaires correctives dans le processus de production du ciment.

La partie bibliographique est une étape essentielle pour approfondir la compréhension de la composition des résidus solides urbains (RSU) et de leurs filières de traitement, en particulier dans les pays en développement, et plus spécifiquement en Algérie. Dans cette partie, des informations ont également été fournies sur la valorisation par incinération des résidus solides urbains, en utilisant les mâchefers générés comme ajout dans le processus de fabrication du ciment.

Le travail de recherche de cette thèse est divisé en trois parties. La première partie est la caractérisation physico-chimique des RSU par saisons pendant deux années, cette étape a été réalisée au niveau de la station expérimentale agronomique de l'Université de Chlef et les analyses physico-chimiques des déchets ont été effectuées aux laboratoires de Technologie et Génie Civile, Université Hassiba Benbouali de Chlef.

La seconde partie concerne l'incinération de grandes quantités de résidus solides urbains (RSU) ainsi que de déchets organiques dans un incinérateur industriel appartenant à la société Green Sky, qui est spécialisée dans ce domaine. Les caractéristiques physiques et chimiques des mâchefers générés de l'incinération ont été déterminées en utilisant divers équipements de caractérisation. L'analyse des éléments trace métalliques a été réalisée au niveau du laboratoire E2LIM, Université de Limoges, France.

La troisième partie porte sur l'utilisation des mâchefers en tant que substitut du ciment portland ordinaire et du clinker résistant au sulfate (CRS). Les caractéristiques physico-mécaniques des ciments préparés ont été mesurées au laboratoire de contrôle de qualité/cimenterie de Chlef. La substitution des mâchefers en tant que matières secondaires correctives pour la préparation du clinker a été aussi étudiée.

Les résultats de la caractérisation physique par taille montrent que les RSU des zones d'étude de la commune de Chlef (Centre-ville, Ouled Mohammed, Hay ESalam, Hay ElHoria, Chorfa, Mouafkia, Bradai, Chegga) sont majoritairement de taille moyenne ( $\emptyset > 20$  mm et  $\emptyset < 100$  mm).

Les résultats de la caractérisation en catégorie des RSU de la commune de Chlef indiquent que la majorité des RSU sont constituées de putrescibles au cours des quatre saisons de deux années consécutives (2018-2019 et 2019-2020). Le pourcentage des déchets putrescibles est d'environ 59.68%. Les autres catégories comme les textiles sanitaires, les plastiques, les papiers-cartons, les textiles et autres (composite, CNC, verre, métaux, INC, déchets ménagers spéciaux, et matière fine) ont des pourcentages de 14.18 %, 10.68 %, 5.13%, 3.10 % et 7.24 % respectivement. Les caractéristiques chimiques de certaines catégories des RSU (putrescibles, papiers, cartons et déchets fins) montrent que les taux d'humidité moyenne des déchets sont de l'ordre de 82 % pour les putrescibles, 43 % pour les papiers, 46 % pour les cartons et 42 % pour les fines. La matière organique est de l'ordre 80 % pour les putrescibles, 81 % pour les papiers, 78 % pour les cartons et 49 % pour les fines.

L'incinération d'une tonne de RSU génère 10 % de mâchefers, par contre l'incinération de 500 kg de fermentescibles (putrescibles, papiers et cartons) donne 11 % de mâchefers. Deux types de mâchefers sont produits lors de cette incinération : mâchefers de type 1 (MIRSU1) et mâchefers de type 2 (MIRSU2). Les résultats de la caractérisation chimique et minéralogique montrent que les deux types de mâchefers contiennent les composants suivants :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , tandis que leurs principales phases minérales étaient le quartz, la clinoenstatite, l'alite, la calcite, l'halite, le gypse, la portlandite, l'aluminate tricalcique, la magnétite et la brownmillerite. Les résultats ont montré que les taux de métaux lourds dans les mâchefers d'incinération des déchets urbains de type 2 (MIRSU2) ont diminué par rapport aux mâchefers d'incinération des déchets urbains type 1 (MIRSU1). Ce qui explique que les catégories de déchets incinérés ont influencé la composition chimique des mâchefers.

Le remplacement du ciment portland par les deux mâchefers a entraîné une forte augmentation de la demande en eau pour le ciment mélangé avec les MIRSU2 et une légère augmentation de la demande en eau pour le ciment mélangé avec les MIRSU1, en comparaison avec le ciment témoin. La substitution partielle du ciment portland par les MIRSU1 a augmenté le temps de prise initial ; cependant, l'incorporation des MIRSU2 a réduit le temps de prise initial, comparé à celui du ciment témoin. L'expansion des ciments préparés avec les MIRSU1 et les MIRSU2, était inférieure à la valeur limite qui est de 10 mm. Les résultats des propriétés mécaniques tels que, les résistances à la compression du mortier de ciment à un âge précoce ont augmenté lorsque le ciment a été remplacé par 5 % en poids et 10 % en poids des deux types de mâchefers. Par contre, les résistances à la compression à un âge tardif ont diminué progressivement avec l'augmentation des teneurs des deux mâchefers; la perte a été significative avec un taux de remplacement de 20 % en poids. D'après les

résultats obtenus, les substitutions maximales des mâchefers dans le ciment portland ordinaire devraient être contrôlées à 5 % en poids et à 10 % en poids.

La substitution de 5 % en poids de clinker résistant au sulfate (CRS) par les MIRSU1 et les MIRSU2, diminue légèrement la demande en eau pour une consistance normale en comparaison avec celle du ciment témoin. Le temps de prise initial du ciment avec 5 % de MIRSU2 est légèrement plus rapide que celui du ciment témoin. Par contre, le temps de prise initial du ciment avec 5 % de MIRSU1 est plus long que celui du ciment témoin. L'expansion est de 0 mm pour les pâtes du ciment témoin et du ciment préparé avec 5 % de MIRSU2. Elle est de 0,5 mm pour le ciment préparé avec 5 % de MIRSU1. Ces résultats montrent que dans les deux cas l'expansion est inférieure à 10 mm selon la norme NE 197-1 (Norme Européen).

Les résultats des résistances à la flexion et à la compression des mortiers du ciment CRS préparé avec 5 % de MIRSU1 et du ciment CRS préparé avec 5 % de MIRSU2 sont comparables à ceux du mortier témoin.

Les résultats des caractérisations chimiques et minéralogiques des clinkers préparés avec 2%, 4%, 6%, et 8% des MIRSU1 montrent qu'ils contiennent des oxydes ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), et des phases minéralogiques alites ( $\text{C}_3\text{S}$ ) et des bélites ( $\text{C}_2\text{S}$ ) avec une légère différence dans leurs quantités en comparaison avec le clinker industriel.

Selon les résultats de cette recherche, il est essentiel de souligner l'importance d'opter pour un tri sélectif à la source des déchets solides urbains afin d'éviter les grandes quantités d'éléments traces métalliques. Pour améliorer les caractéristiques des mâchefers, il est essentiel d'optimiser les conditions de l'incinération. De plus, l'analyse des effets de l'ajout de mâchefers sur les propriétés du ciment à long terme, ainsi que l'analyse des propriétés physico-mécaniques des ciments préparés avec les clinkers.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## **Références Bibliographiques**

- [1] F. Alobaid *et al.*, “Dynamic simulation of a municipal solid waste incinerator,” *Energy*, vol. 149, p. 230–249, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.170.
- [2] Agence nationale des déchets, “Rapport sur l’état de la gestion des déchets en algérie,” p. 150, 2020.
- [3] N. Tahraoui Douma, “Valorisation par compostage des résidus solides urbains de la commune de Chlef, Algérie,” Thèse de Doctorat. Université de Limoges, France, p. 244, 2013. Available: <http://epublications.unilim.fr/theses/2013/tahraoui-douma-naima/tahraoui-douma-naima.pdf>
- [4] N. Saikia, S. Kato, and T. Kojima, “Production of cement clinkers from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash,” *Waste Manag.*, vol. 27, n<sup>o</sup>. 9, p. 1178–1189, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.06.004.
- [5] C. H. K. Lam, A. W. M. Ip, J. P. Barford, and G. Mckay, “Use of Incineration MSW Ash : A Review,” *Sustainability*, vol. 2, n<sup>o</sup>. 7, p. 1943–1968, 2010, doi: 10.3390/su2071943.
- [6] A. Nithiya, A. Saffarzadeh, and T. Shimaoka, “Hydrogen gas generation from metal aluminum-water interaction in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash,” *Waste Manag.*, vol. 73, p. 342–350, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.06.030.
- [7] A. U. Rehman, S. M. Lee, and J. H. Kim, “Use of municipal solid waste incineration ash in 3D printable concrete,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 142, p. 219–228, 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.06.018.
- [8] D. Xuan, P. Tang, and C. S. Poon, “Limitations and quality upgrading techniques for utilization of MSW incineration bottom ash in engineering applications – A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 190, p. 1091–1102, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.174.
- [9] J. E. Aubert, B. Husson, and N. Sarramone, “Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Part 1: Processing and characterization of MSWI fly ash,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 136, n<sup>o</sup>. 3, p. 624–631, 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.12.041.
- [10] R. Forteza, M. Far, C. Seguí, and V. Cerdá, “Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base,” *Waste Manag.*, vol. 24, n<sup>o</sup>. 9, p. 899–909, 2004, doi: 10.1016/j.wasman.2004.07.004.
- [11] Y. Lu *et al.*, “Physical and chemical properties, pretreatment, and recycling of municipal solid waste incineration fly ash and bottom ash for highway engineering: A literature review,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, p. 17, 2020, doi: 10.1155/2020/8886134.
- [12] C. Ferreira, A. Ribeiro, and L. Ottosen, “Possible applications for municipal solid waste fly

ash,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 96, n°. 2–3, p. 201–216, 2003, doi: 10.1016/S0304-3894(02)00201-7.

[13] Y. M. Li, X. Q. Wu, L. J. Wang, R. Q. Li, T. Y. Huang, and X. Q. Wen, “Comparative study on utilization of different types of municipal solid waste incineration bottom ash for clinker sintering,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 22, p. 1828–1843, 2020, doi: 10.1007/s10163-020-01067-6.

[14] A. Mafalda Matos and J. Sousa-Coutinho, “Municipal solid waste incineration bottom ash recycling in concrete: Preliminary approach with Oporto wastes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 323, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126548.

[15] K. A. Clavier, J. M. Paris, C. C. Ferraro, E. T. Bueno, C. M. Tibbetts, and T. G. Townsend, “Washed waste incineration bottom ash as a raw ingredient in cement production: Implications for lab-scale clinker behavior,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 169, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105513.

[16] C. H. K. Lam, J. P. Barford, and G. McKay, “Utilization of municipal solid waste incineration ash in Portland cement clinker,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 13, p. 607–615, 2011, doi: 10.1007/s10098-011-0367-z.

[17] E. Loginova, K. Schollbach, M. Proskurnin, and H. J. H. Brouwers, “Mechanical performance and microstructural properties of cement mortars containing MSWI BA as a minor additional constituent,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01701.

[18] X. G. Li, Y. Lv, B. G. Ma, Q. Bin Chen, X. B. Yin, and S. W. Jian, “Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement,” *J. Clean. Prod.*, vol. 32, p. 96–100, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.038.

[19] Z. Yang, R. Ji, L. Liu, X. Wang, and Z. Zhang, “Recycling of municipal solid waste incineration by-product for cement composites preparation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 162, p. 794–801, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.081.

[20] EN 197-1, “Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.” 2000.

[21] E. Loginova, K. Schollbach, M. Proskurnin, and H. J. H. Brouwers, “Municipal solid waste incineration bottom ash fines: Transformation into a minor additional constituent for cements,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 166, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105354.

[22] P. Tang, W. Chen, D. Xuan, Y. Zuo, and C. S. Poon, “Investigation of cementitious properties of different constituents in municipal solid waste incineration bottom ash as supplementary cementitious materials,” *J. Clean. Prod.*, vol. 258, 2020, doi:

10.1016/j.jclepro.2020.120675.

[23] J. K. Magnuson, K. D. Weiksnar, A. D. Patel, K. A. Clavier, C. C. Ferraro, and T. G. Townsend, "Processing municipal solid waste incineration bottom ash for integration into cement product manufacture," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 198, 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107139.

[24] B. Brahim, "Gestion des résidus solides urbains: Application du protocole de la haute-vienne à la Wilaya d'Oran, Algérie : Approches conceptuelles et méthodologique," Thèse de doctorat. Université d'Oran Mohamed Boudiaf, p. 271, 2014.

[25] F. Charnay, "Compostage des déchets urbains dans les Pays en Développement : élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost," Thèse de doctorat. Université de Limoges, p. 277, 2005.

[26] K. Miezah, K. Obiri-Danso, Z. Kádár, B. Fei-Baffoe, and M. Y. Mensah, "Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste management in Ghana," *Waste Manag.*, vol. 46, p. 15–27, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.09.009.

[27] K. Zoroufchi Benis *et al.*, "Municipal solid waste characterization and household waste behaviors in a megacity in the northwest of Iran," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, n<sup>o</sup>. 8, p. 4863–4872, 2019, doi: 10.1007/s13762-018-1902-9.

[28] L. Castrillón, Y. Fernández-Nava, A. González, and E. Marañón, "A case study of the characteristics of municipal solid waste in Asturias (Spain): Influence of season and source," *Waste Manag. Res.*, vol. 31, n<sup>o</sup>. 4, p. 428–431, 2013, doi: 10.1177/0734242X12465463.

[29] K. E. Koledzi, G. Baba, G. Feuillade, et G. Matejka "Caractérisation physique des déchets urbains à Lomé dans la perspective du compostage décentralisé dans les quartiers," Colloque Eau, Déchets et Développement Durable, 28 – 31 mars 2010, Alexandrie, Egypte, 2010.

[30] M. Mountadar, A. Makan et E.M. Kabil "Gestion et traitement des déchets solides domestiques au Maroc : Analyse multicritères et application à la ville d'Azemmour", 2009.

[31] A. Meriem, "Optimisation de la gestion des déchets ménagers dans quelques villes de l'Ouest algérien," Thèse de doctorat. Université de Mostaganem, p. 122, 2017.

[32] N. Guermoud and A. Addou, "Étude et caractérisation des déchets ménagers de la ville de Mostaganem (Ouest-Algérie)," *Environnement, Ingénierie & Développement*, vol. N<sup>o</sup>66-mar, 2014, doi: 10.4267/dechets-sciences-techniques.2554.

[33] A. Sakri, "Substitution of fossil energy in the cement industry with alternative fuels from waste in Algeria," PhD Thesis. University of Saad Dahlab Blida 1, p. 121, 2022.

[34] Agence nationale des déchets, "Caractérisation des déchets ménagers et assimilés campagne nationale 2018 / 2019," p. 31, 2019.

[35] F. A. Osra, H. K. Ozcan, J. S. Alzahrani, and M. S. Alsoufi, "Municipal Solid Waste

- Characterization and Landfill Gas Generation in Kakkia Landfill , Makkah,” *Sustainability*, vol. 1462, p. 13, 2021.
- [36] A. Singhal, A. K. Gupta, B. Dubey, and M. Makrand, “Seasonal characterization of municipal solid waste for selecting feasible waste treatment technology for Guwahati city , India,” *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 72, n°. 2, p. 147–160, 2022, doi: 10.1080/10962247.2021.1980450.
- [37] M. Abdallah, M. Arab, A. Shabib, R. El, S. Shakinaz, and E. Sheltawy, “Characterization and sustainable management strategies of municipal solid waste in Egypt,” *Clean Technol. Environ. Policy*, 2020, doi: 10.1007/s10098-020-01877-0.
- [38] I. A. Al-Khatib, M. Monou, A. S. F. Abu Zahra, H. Q. Shaheen, and D. Kassinos, “Solid waste characterization, quantification and management practices in developing countries. A case study: Nablus district - Palestine,” *J. Environ. Manage.*, vol. 91, n°. 5, p. 1131–1138, 2010, doi: 10.1016/j.jenvman.2010.01.003.
- [39] R. A.- Jarallah and E. Aleisa, “A Baseline Study for Municipal Solid Waste Characterization for the State of Kuwait,” *Waste Manag.*, vol. 34, n°. 5, p. 952–960.
- [40] B. Abylkhani *et al.*, “Detailed Municipal Solid Waste Composition Analysis for Nur-Sultan City , Kazakhstan with Implications for Sustainable Waste Management in Central Asia,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, p. 24406–24418, 2021.
- [41] A. Ben Othman, “Qualitative and quantitative characterization of municipal waste in Tunisia : a case study of metropolitan,” vol. 15, p. 852–866, 2021, doi: 10.1002/bbb.2207.
- [42] P. Wavrer, C. Guillemain, O. Cedex, and F. E-mail, “Theory of Sampling (TOS) applied to characterisation of Municipal Solid Waste (MSW)—a case study from France,” n°. 8, p. 3–11, 2018, doi: 10.1255/tosf.101.
- [43] S. Ben Ammar, “Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix des 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, p. 327, 2006.
- [44] S. T. Pham Phu, T. Fujiwara, N. Akasaki, D. C. Le, H. M. Giang, and P. van Dinh, “Analyzing the characterization of municipal solid waste in Da Nang City, Vietnam,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 83, p. 241–246, 2021, doi: 10.3303/CET2183041.
- [45] ADEME, “Campagne de caractérisation des déchets ménagers et assimilés de la Guadeloupe,” p. 40, 2012.
- [46] T. Chantou, “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, p. 290, 2012.

[47] K. E. Koledzi, “Valorisation des déchets solides urbains dans les quartiers de Lomé(Togo):Approche méthodologique pour une production durable de compost,” Thèse de doctorat. Université de Limoges, p. 255, 2015.

[48] A. Aydi, M. Zairi ; A. Kallel, H.Ben Dhia “Caractérisation de la décharge contrôlée de Jebel Chakir-Tunis (Tunisie),” *Tech. - Sci. - Methodes* , n°. 5, p. 101-111, 2009, doi: 10.1051/tsm/200905101.

[49] K. E. Koledzi, G. Baba, S. Tcheguëni, K. N. Segbeaya, and M. Koriko, “Fate of some heavy metals in the composting of the urban solid waste produced in Lomé , Togo,” *J. Environ. Chem. Ecotoxicol.*, vol. 5, n°. 7, p. 196–201, 2013, doi: 10.5897/JECE2013.0287.

[50] F. Z. Derias., “Etude des caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des composts de la ville d’Oran,” Thèse de doctorat. Université d’Oran 2, p. 161, 2022.

[51] K. K. Rambure, “Vers de nouvelles matrices minérales pour l’immobilisation et la valorisation des déchets ultimes de l’incinération des déchets ménagers,” Thèse de doctorat. Université Paris Est, p. 357, 2014.

[52] L. E. N. Hung, “Contribution à la modélisation du comportement mécanique d’un matériau hétérophasé rematérialisé issu d’un mâchefer d’incinération d’ordures ménagères : Valorisation en Génie Civil,” Thèse de doctorat. Université d’Artois, p. 233, 2011.

[53] R. Albrecht, G. Terrom, and C. Perissol, “Co-compostage de boues de station d’épuration et de déchets verts : Nouvelle méthodologie du suivi des transformations de la matière organique,” Thèse de doctorat. Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, p. 189, 2007, Available: <http://www.imep-cnrs.com/theses/These - Remy ALBRECHT.pdf>

[54] C. Francou, “Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d’indicateurs pertinents,” Thèse de doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon, p. 289, 2003.

[55] R. Moletta and W. Verstraete, “La méthanisation dans la problématique énergétique et environnementale,” *Chapitre 1*, p. 7.

[56] S. Kaibouchi, “Mâchefers d’ Incinération d’ Ordures Ménagères : contribution à l’ étude des mécanismes de stabilisation par carbonatation et influence de la collecte sélective,” Thèse de doctorat. L’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, p. 287, 2004.

[57] F.Ait.Ahsene, “Etude des composés toxiques issus de l’incinération des médicaments périmés et des dasri,” Thèse de doctorat. Université de Boumerdes, p. 163, 2016.

[58] Environnement et aménagement du territoire (interieur.gov.dz). Site consulté le 25/05/2025.

[59] Z.Youcai, “Pollution Control and Resource Recovery Municipal Solid Wastes

Incineration: Bottom Ash and Fly Ash,” book, p.952, elsevier 2017.

[60] Y. Menard, “Modélisation de l’incinération sur grille d’ordures ménagères et approche thermodynamique du comportement des métaux lourds,” Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, p. 250, 2008.

[61] E. Rendek, “Influence des procédés de la filière traitement thermique sur les caractéristiques et les évolutions bio-physico-chimiques des Mâchefers d’Incinération d’Ordures Ménagères (MIOM),” Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, p. 211, 2006.

[62] T. Rogaume, “Caractérisation expérimentale et modélisation de l’émission de polluants lors de l’incinération des déchets ménagers,” Thèse de doctorat. Université de Poitiers, p. 211, 2001.

[63] J. R. Minane, “Contribution à l’élaboration de sables de mâchefers améliorés en vue d’une valorisation dans la formulation de matériaux cimentaires,” Thèse de doctorat. Université de Lille 1, p. 239, 2017.

[64] D. Xuan, P. Tang, and C. S. Poon, “Limitations and quality upgrading techniques for utilization of MSW incineration bottom ash in engineering applications – A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 190. p. 1091–1102, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.174.

[65] J. E. Aubert, B. Husson, and N. Sarramone, “Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Part 1: Processing and characterization of MSWI fly ash,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 136, n°. 3, p. 624–631, 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.12.041.

[66] V. Caprai, “Treatment and Valorization of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash.Applications in cement-based materials,” PhD Thesis. Eindhoven University of Technology,the Netherlands, p. 222, 2019.

[67] J. M. Chimenos, M. Segarra, M. A. Fernandez, and F. Espiell, “Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 64, p. 211–222, 1999.

[68] P. Tang, “Municipal solid waste incineration ( MSWI ) bottom ash - from waste to value Characterization , treatments and application,” PhD Thesis. Eindhoven University of Technology,the Netherlands, p. 210, 2017.

[69] V. Caprai, F. Gauvin, K. Schollbach, and H. J. H. Brouwers, “MSWI bottom ash as binder replacement in wood cement composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 196, p. 672–680, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.153.

[70] V. Caprai, K. Schollbach, and H. J. H. Brouwers, “Influence of hydrothermal treatment on the mechanical and environmental performances of mortars including MSWI bottom ash,” *Waste Manag.*, vol. 78, p. 639–648, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.06.030.

- [71] M. F. Obis, “Vers une nouvelle solution d’épuration de biogaz par des mâchefers d’incinération de déchets non dangereux : développement et mise en œuvre d’un procédé d’adsorption d’H<sub>2</sub>S,” Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, p.272, 2017.
- [72] N. H. Le, A. Razakamanantsoa, M. L. Nguyen, V. T. Phan, P. L. Dao, and D. H. Nguyen, “Evaluation of physicochemical and hydromechanical properties of MSWI bottom ash for road construction,” *Waste Manag.*, vol. 80, p. 168–174, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.09.007.
- [73] À. Maldonado-Alameda, J. Giro-Paloma, A. Alfocea-Roig, J. Formosa, and J. M. Chimenos, “Municipal solid waste incineration bottom ash as sole precursor in the alkali-activated binder formulation,” *Appl. Sci.*, vol. 10, n<sup>o</sup>. 12, p. 4129, 2020, doi: 10.3390/APP10124129.
- [74] M. L. Gonzalez, D. Blanc, and C. de Brauer, “Multi-Analytical Approach and Geochemical Modeling for Mineral Trace Element Speciation in MSWI Bottom-Ash,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, n<sup>o</sup>. 3, p. 547–560, 2019, doi: 10.1007/s12649-017-0075-y.
- [75] A. P. Bayuseno and W. W. Schmahl, “Understanding the chemical and mineralogical properties of the inorganic portion of MSWI bottom ash,” *Waste Manag.*, vol. 30, n<sup>o</sup>. 8–9, p. 1509–1520, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.010.
- [76] S. Bethanis, C. R. Cheeseman, and C. J. Sollars, “Properties and microstructure of sintered incinerator bottom ash,” *Ceram. Int.*, vol. 28, n<sup>o</sup>. 8, p. 881–886, 2002, doi: 10.1016/S0272-8842(02)00068-8.
- [77] J. Kim, B. H. Nam, B. A. Al Muhit, K. M. Tasneem, and J. An, “Effect of chemical treatment of MSWI bottom ash for its use in concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 67, n<sup>o</sup>. 4, p. 179–186, 2015, doi: 10.1680/macr.14.00170.
- [78] J. An, J. Kim, and B. H. Nam, “Investigation on impacts of municipal solid waste incineration bottom ash on cement hydration,” *ACI Mater. J.*, vol. 114, n<sup>o</sup>. 5, p. 701–711, 2017, doi: 10.14359/51689712.
- [79] Z. Chen and E. H. Yang, “Early age hydration of blended cement with different size fractions of municipal solid waste incineration bottom ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, p. 880–890, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.063.
- [80] E. Loginova, D. S. Volkov, P. M. F. van de Wouw, M. V. A. Florea, and H. J. H. Brouwers, “Detailed characterization of particle size fractions of municipal solid waste incineration bottom ash,” *J. Clean. Prod.*, vol. 207, n<sup>o</sup>. 2019, p. 866–874, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.022.
- [81] J. Xiang, J. Qiu, Z. Li, J. Chen, and Y. Song, “Eco-friendly treatment for MSWI bottom ash applied to supplementary cementing: Mechanical properties and heavy metal leaching

- concentration evaluation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 327, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127012.
- [82] X. Gao, B. Yuan, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers, “Characterization and application of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash and waste granite powder in alkali activated slag,” *J. Clean. Prod.*, vol. 164, p. 410–419, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.218.
- [83] B. Chen, M. Brito van Zijl, A. Keulen, and G. Ye, “Thermal Treatment on MSWI Bottom Ash for the Utilisation in Alkali Activated Materials,” *KnE Eng.*, vol. 2020, p. 25–35, 2020, doi: 10.18502/keg.v5i4.6792.
- [84] R. Forteza, M. Far, C. Seguí, and V. Cerdá, “Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base,” *Waste Manag.*, vol. 24, n<sup>o</sup>. 9, p. 899–909, 2004, doi: 10.1016/j.wasman.2004.07.004.
- [85] A. M. Joseph, R. Snellings, P. Van Den Heede, and S. Matthys, “The Use of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Various Building Materials: A Belgian Point of View,” *Materials (Basel)*, vol. 141, n<sup>o</sup>. 11, p. 30, 2018, doi: 10.3390/ma11010141.
- [86] D. Shi *et al.*, “Effect of Source-Classified Collection of Municipal Solid Waste on Heavy Metals and Pozzolanic Properties of Incineration Residues,” *Int. J. Environ. Res.*, vol. 12, no. 5, p. 661–670, 2018, doi: 10.1007/s41742-018-0122-y.
- [87] N. Savadogo, “Élaboration et caractérisation d’un écociment à base de poudre de mâchefer de charbon,” Thèse de doctorat. Université Bretagne Loire, p. 188, 2017.
- [88] A. Maldonado-Alameda, J. Mañosa, J. Miro-Escola, A. C. Quintero-Payan, and J. M. Chimenos, “Fluidised-bed incineration bottom ash as the sole precursor of alkali-activated binders: A comparison with bottom ash from grate incinerators,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 364, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130001.
- [89] Y. Lu *et al.*, “Physical and chemical properties, pretreatment, and recycling of municipal solid waste incineration fly ash and bottom ash for highway engineering: A literature review,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, p. 17, 2020, doi: 10.1155/2020/8886134.
- [90] V. Caprai, F. Gauvin, K. Schollbach, and H. J. H. Brouwers, “MSWI bottom ash as binder replacement in wood cement composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 196, p. 672–680, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.153.
- [91] “Qualité et devenir des mâchefers d’incinération de déchets non dangereux. Etat des lieux et perspectives,” *Rapp. Final*, p. 134, 2015.
- [92] C. Ferreira, A. Ribeiro, and L. Ottosen, “Possible applications for municipal solid waste fly ash,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 96, n<sup>o</sup>. 2–3, p. 201–216, 2003, doi: 10.1016/S0304-3894(02)00201-7.

### *Références Bibliographiques*

- [93] D. Bansal, G. V. Ramana, and M. Datta, “Sustainable utilization of incineration bottom ash in pavement construction: Environmental impacts and life cycle assessment,” *Sci. Total Environ.*, vol. 931, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172890.
- [94] C. J. Lynn, G. S. Ghataora, and R. K. Dhir OBE, “Municipal incinerated bottom ash (MIBA) characteristics and potential for use in road pavements,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 10, n<sup>o</sup>. 2, p. 185–201, 2017, doi: 10.1016/j.ijprt.2016.12.003.
- [95] F. Andreola, L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti, and T. Manfredini, “The possibility to recycle solid residues of the municipal waste incineration into a ceramic tile body,” *J. Mater. Sci.*, vol. 36, p. 4869–4873, 2001, doi: 10.1023/A:1011823901409.
- [96] E. H. Dagnew, “Alternative resource of incineration bottom ash for ceramic tile production,” *Int. J. Ceram. Eng. Sci.*, vol. 4, n<sup>o</sup>. 4, p. 281–285, 2022, doi: 10.1002/ces2.10136.
- [97] P. M. Giordano, A. D. Behel, J. E. Lawrence, J. M. Soileau, and B. N. Bradford, “Mobility in Soil and Plant Availability of Metals Derived from Incinerated Municipal Refuse,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 17, n<sup>o</sup>. 4, p. 193–198, 1983, doi: 10.1021/es00110a003.
- [98] X. Dou *et al.*, “Review of MSWI bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, p. 24–38, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.044.
- [99] V. K. Gupta, I. Ali, V. K. Saini, T. Van Gerven, B. Der Van Bruggen, and C. Vandecasteele, “Removal of dyes from wastewater using bottom ash,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 44, n<sup>o</sup>. 10, p. 3655–3664, 2005, doi: 10.1021/ie0500220.
- [100] M. Fontseré Obis, P. Germain, H. Bouzahzah, A. Richioud, and H. Benbelkacem, “The effect of the origin of MSWI bottom ash on the H<sub>2</sub>S elimination from landfill biogas,” *Waste Manag.*, vol. 70, p. 158–169, 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.09.014.
- [101] J. Yao, Q. Kong, H. Zhu, Z. Zhang, Y. Long, and D. Shen, “Adsorption of ammonia on municipal solid waste incinerator bottom ash under the landfill circumstance,” *Korean Chem. Eng. Res.*, vol. 53, n<sup>o</sup>. 4, p. 503–508, 2015, doi: 10.9713/kcer.2015.53.4.503.
- [102] J. Kleib, G. Aouad, N. E. Abriak, and M. Benzerzour, “Production of Portland cement clinker from French Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00629.
- [103] A. Mary Joseph, “Processed Bottom Ash Based Sustainable Binders for Concrete Aneeta,” PhD Thesis. Ghent University, p. 368, 2021.
- [104] N. M. Alderete, A. M. Joseph, P. Van den Heede, S. Matthys, and N. De Belie, “Effective and sustainable use of municipal solid waste incineration bottom ash in concrete regarding strength and durability,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 167, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105356.

### *Références Bibliographiques*

- [105] A. Mary Joseph, R. Snellings, P. Nielsen, S. Matthys, and N. De Belie, “Pre-treatment and utilisation of municipal solid waste incineration bottom ashes towards a circular economy,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120485.
- [106] S. Dahmani, “Contribution à la production d’un ciment pétrolier à base de poudre de sable de dunes et d’autres minéraux,” Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah-Ouargla, p. 158, 2018.
- [107] H. Krou, “Recyclage du ciment dans le ciment : incorporation des déchets de construction et de démolition dans le cru cimentier,” Thèse de doctorat. Université de Lorraine, p. 319, 2021.
- [108] M. Renaut, “Calcination des déchets industriels : synthèse de ciment et stabilisation / solidification des résidus de combustion,” Thèse de doctorat. Université d’Artois, p. 183, 2017.
- [109] H. F. W. Taylor, “Cement chemistry,” p. 469, 1997, doi: 10.1016/B0-72-164077-X/50025-5.
- [110] D. C. Chu, “Valorisation des sédiments de dragage dans l’industrie cimentaire,” Thèse de doctorat. Université de Lille, p. 240, 2021.
- [111] K. A. Clavier, C. C. Ferraro, and T. G. Townsend, “Pilot-scale cement production using treated waste incineration bottom ash: physical and environmental performance,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 175, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105862.
- [112] B. R.H., “La chimie du ciment.” Eyrolles, Paris, p. 586, 1952.
- [113] D. Benchiheub, “Contribution a l’étude de la compréhension des phénomènes et mécanismes d’action des effets des additions sur le comportement des matrices cimentaires,” Thèse de doctorat. Université de Skikda, p. 170, 2019.
- [114] S. Sabri, “Elaboration et détermination des propriétés d’un nouveau ciment composé à base de pouzzolanes artificielles,” Mémoire de magister. Université d’Oran Mohamed Boudiaf, p. 101, 2010.
- [115] G.Nigri, “Nouvelle élaboration d’un liant hydraulique,” Thèse de doctorat. Université de Guelma, p. 164, 2018.
- [116] N. Adam, *Propriétés des bétons*. Edition Eyrolles, 2000.
- [117] L. Abdelaziz, “Effet des ajouts minéraux actifs et inertes sur les propriétés physiques, mécaniques et chimiques du mortier,” Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah-Ouargla, p. 207, 2019.
- [118] P. D. Tennis and H. M. Jennings, “Model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, n<sup>o</sup>. 6, p. 855–863, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00257-X.
- [119] F.Guenanou, “Durabilité des mortiers contenant la perlite vis - à - vis de la corrosion des

- armatures .,,” Thèse de doctorat. Université d’Oran Mohamed Boudiaf,p.145, 2019.
- [120] H. Li, H. Chu, Q. Wang, and J. Tang, “Feasibility of producing eco-friendly self-compacting mortar with municipal solid waste incineration bottom ash : A preliminary study,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02309.
- [121] M. Hernandez and B. Maria, “Leaching behaviour, mechanical and durability properties of mortar containing municipal incineration bottom ash.,” PhD Thesis, Sheffield Hallam University, p. 305, 2003.
- [122] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Chlef>. Site consulté le 25/05/2025.
- [123] Bureau d’hygiène de Chlef au niveau de l’APC, 2018.
- [124] MODECOM, (1993). « Méthode de caractérisation des ordures ménagères ». ADEME (Angers). Déchets ménagers et assimilés.
- [125] NF EN 196-6.Méthodes d’essai des ciments - Détermination de la finesse.Décembre 2018.
- [126] NF P15-435.Méthodes d’essais des ciments - Détermination de la masse volumique. Octobre 2021.
- [127] A. O. Ahmed, A. C. Etonihu, and N. O. Nweze, “Analysis of Chemical Compositions of Portland Cement and Limestone from Four Geopolitical Zones of Nigeria,” *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 10, p. 113–126, 2022, doi: 10.4236/jmmce.2022.102009.
- [128] F. Frémion, “Dynamique des flux sédimentaires et des éléments métalliques en lien avec l’exploitation courante et exceptionnelle d’un barrage hydroélectrique,” Thèse de doctorat.Université de Limoges, p.338, 2016.
- [129] EN 196-2.Method of testing cement-Part2:Chemical analysis of cement. 2013.
- [130] EN 12457-4.Characterisation of waste. Leaching. Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm (without or with size reduction). 2002.
- [131] S. Nouri, N. Ammar, and T. H. Boumediene, “Etude du comportement non drainé d’un sable renforcé par des nappes plastiques,” *Colloq. Int. Modélisation des Matériaux Struct*, p. 9, 2014.
- [132] EN 196-3.Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness. 2005.
- [133] EN 196-1.Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. 2005.
- [134] EN 1015-3.Méthodes d’essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses). Octobre 1999.
- [135] T. Boubekour, “Polycopié de Matériaux de Construction,” *Licens. Génie Civ.*, Centre Universitaire de Tissemsilt, p. 50, 2017.

### *Références Bibliographiques*

- [136] EN 1015-18. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 18 : détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier durci. Mai 2003.
- [137] S. Bouregaya, "Synthèse d'un ciment alitique à moindre impact environnemental à partir de vase de barrage et utilisant le sulfate de zinc comme minéralisateur," *Thèse de Doctorat.*, Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf USTO-ORAN-Université de Toulouse ,p. 145, 2019.
- [138] Schéma directeur de gestion des déchets solides urbains de la commune de Chlef , " Etude schéma directeur de gestion des déchets ménagers et assimilés de la commune de Chlef", 2021.
- [139] M. Yan *et al.*, "Influence of multi-temperature primary air on the characteristics of MSW combustion in a moving grate incinerator," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, n°. 6, 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.106690.
- [140] M. Nikravan, A. A. Ramezani pour, and R. Maknoon, "Study on physiochemical properties and leaching behavior of residual ash fractions from a municipal solid waste incinerator (MSWI) plant," *J. Environ. Manage.*, vol. 260, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.110042.
- [141] N. Saikia, G. Mertens, K. Van Balen, J. Elsen, T. Van Gerven, and C. Vandecasteele, "Pre-treatment of municipal solid waste incineration ( MSWI ) bottom ash for utilisation in cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, p. 76–85, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.185.
- [142] J. An, J. Kim, and B. H. Nam, "Investigation on Impacts of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Investigation on Impacts of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash on Cement Hydration," *ACI Mater. J.*, vol. 114, n°. 5, p. 701–711, 2017, doi: 10.14359/51689712.
- [143] E. Smidt, *The Application of FT-IR Spectroscopy in Waste Management, Fourier Transforms - New Analytical Approaches and FTIR Strategies*, Prof. Goran Nikolic (Ed.), ISBN: 978-953-307-232-6, InTech, 2011. Available from: <http://www.intechopen.com/books/fourier-transforms>. Available :<https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- [144] E. Smidt, K. Meissl, J. Tintner, and F. Ottner, "Interferences of carbonate quantification in municipal solid waste incinerator bottom ash: Evaluation of different methods," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 8, n°. 3, p. 217–222, 2010, doi: 10.1007/s10311-009-0209-y.
- [145] E. Smidt, K. Meissl, M. Schwanninger, and P. Lechner, "Classification of waste materials using Fourier transform infrared spectroscopy and soft independent modeling of class analogy," *Waste Manag.*, vol. 28, n°. 10, p. 1699–1710, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.08.003.
- [146] Y. Han, H. Wang, Y. Xu, Y. Cao, P. Gao, and R. Liu, "Effect of additives on properties

### *Références Bibliographiques*

- and microstructure of lightweight aggregates produced from MSWI bottom ash sludge (MSWI-BAS),” *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 71, n<sup>o</sup>. 8, p. 1013–1024, 2021, doi: 10.1080/10962247.2021.1918288.
- [147] P. G. Virginie Tihay, “Pyrolysis gases released during the thermal decomposition of three Mediterranean species,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 88, n<sup>o</sup>. 2, p. 168–174, 2010, doi: 10.1016/j.jaap.2010.04.002.
- [148] M. Allawzi, M. Al-harabsheh, and H. Allaboun, “Characterization and Leachability Propensity of Bottom Ash from Medical Waste Incineration,” *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 229, n<sup>o</sup>. 5, p. 153, 2018, doi: 10.1007/s11270-018-3810-5.
- [149] A. Akkarapongtrakul, P. Julphunthong, and T. Nochaiya, “Setting time and microstructure of Portland cement-bottom ash–sugarcane bagasse ash pastes,” *Monatshefte fur Chemie*, vol. 148, n<sup>o</sup>. 7, p. 1355–1362, 2017, doi: 10.1007/s00706-017-1953-5.
- [150] T. Gutsalenko, A. Bourdot, A. Darquennes, T. Wattez, L. Frouin, and M. Chaouche, “Impact of trace metals Zn , Cu , Cd and Ni on the reactivity of OPC and GGBS-based hydraulic binders at early age for sediment stabilization,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 346, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128406.
- [151] M. Niu, G. Li, Y. Wang, Q. Li, L. Han, and Z. Song, “Comparative study of immobilization and mechanical properties of sulfoaluminate cement and ordinary Portland cement with different heavy metals,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 193, p. 332–343, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.206.
- [152] Y. Cheng and X. Huang, “Application of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash into Engineered Cementitious Composites,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 15, n<sup>o</sup>. 5, p. 1106–1117, 2022, doi: 10.1007/s42947-021-00075-5.
- [153] H. S. R. Al Dhamri, “Oil-Based Mud Cuttings as Additional Raw Material in Clinker and Cement Production,” PhD Thesis. University of Leeds, p. 212, 2019. Available: <http://etheses.whiterose.ac.uk/27067/>
- [154] AFNOR. Classification des déchets selon la commission de normalisation AFNOR/X30 O, le 12 juin 2007.
- [155] F. T. Manheim, “Testing of Cement – Part 1,” *DSDP Initial Rep. vol XXIII part 3, chap 26*, p. 887–907, 1974.

# **ANNEXES**

**Annexe 01 :**

Liste des catégories et sous-catégories des RSU avec des exemples (AFNOR, 12 juin 2007) [154].

<b>Catégories</b>	<b>Sous-catégories</b>	<b>Exemples</b>
<b>1. Déchets putrescibles</b>	Déchets alimentaires (reste de cuisine)	Pain rassis, pain moisi, déchets alimentaires, sachets de thé pleins Fruits, légumes, fromage, graisse végétale ou animale, poisson, charcuterie, gâteaux, chocolat, herbes aromatiques, restes de viande et de poisson, marc de café et filtres, noyaux, épluchures, têtes de crevettes
	Produits alimentaires non consommés (sous emballage)	Yaourts pleins fermés, sachets de produits congelés non ouverts, barquettes d'aliments non ouvertes
	Autres putrescibles	Cadavres d'animaux (oies entières, chats, rats...), excréments, croquettes et aliments pour animaux, peaux de lapin
	Déchets de jardin	Gazon coupé, herbes, fleurs, brindilles, branches, taille de haies, feuilles, résidus de jardin, résidus de potager, terre, glands, marrons
<b>2. Papiers</b>	Emballages papiers	Sacs ou sachets en papier, papier d'emballage, papier d'emballages spéciaux (viande, poisson, fromage, beurre) Papier de sucre, sachets à sandwiches
	Journaux, magazines et revues	Journaux locaux et nationaux, annuaires téléphoniques, brochures avec ou sans papier glacé, Magazines, journaux des collectivités, documents publiés par un service public (mairie, conseil général, conseil régional, état,

		ministère...)
	Imprimés publicitaires	Publicités, courrier publicitaire, publicités sur papier glacé Journaux gratuits (petites annonces), brochures présentant des promotions (grandes surfaces, grandes chaînes de magasins), catalogues touristiques, Catalogues de produits ou de vente par correspondance, tracts
	Papiers bureautiques	Papier d'ordinateur, photocopies, factures, listings Papier imprimé ou papier blanc de bureau, enveloppes, enveloppes à fenêtre, papier à lettre, papier autocopiant
	Autres papiers	agendas, affiches, livres reliés, livres brochés, papier canson, papier bristol, tickets d'autobus, papier peint, photos, cahiers à spirales, cahiers, papiers cadeaux
<b>3. Cartons</b>	Emballages cartons plats	Paquets de céréales, poudres à laver, boîtes d'œufs, de pâtes, de mouchoirs en papier (avec ou sans opercule en plastique), boîtes de lait en poudre, de jouets, cartons de crème glacée, de yaourts, pack de bières, Carton à pizza, emballages de biscuit (même s'il reste du plastique à l'intérieur), paquet de cigarettes vide, rouleaux de papier toilette, autres rouleaux, boîte de médicaments vide
	Emballages cartons ondulés	Cartons ondulés, cartons de déménagement
	Autres cartons	Cartes d'anniversaire/ Noël... dossiers, chemises en carton, cartes postales, calendriers, classeur hors

		d'usage
<b>4. Composites</b>	Composites ELA	ELA : emballages de liquides alimentaires ou briques alimentaires: lait UHT, jus de fruit, soupes, sauces, crème
	Autres Emballages composites	Emballages composés de plusieurs matériaux différents non séparables (papiers, cartons, plastiques, aluminium) : emballages café, emballages de saumon, emballage de beurre (avec aluminium)
	Petits Appareils Electroménagers (PAM)	Tout ou partie d'un appareil ayant fonctionné avec une prise électrique, une pile ou un accumulateur Sèche-cheveux, fer à repasser, radio, téléphone portable, rasoir électrique, circuit imprimé, calculatrice, souris, cafetière, bouilloire, four, robot ménager, ordinateur, montre, télévision, magnétoscope, caméra, jouet électrique, appareil photo... Prise avec transformateur seule
<b>5. Textiles</b>	Textiles	Sacs de fruits et légumes (pommes de terre, oignons...) Textiles fibres naturelles et synthétiques : vêtements, chiffons en fibres naturelles (coton, laine, lin...) et en textiles synthétiques (bas, collants, toiles, sacs de sport ou de voyage en tissu), torchons, mouchoirs en tissu, serviettes, pelotes de laine, brin, ficelle, corde, rideau, couverture
<b>6. Textiles sanitaires</b>	Textiles sanitaires fraction hygiénique	Couches culottes, serviettes hygiéniques, cotons, lingettes,

	Textiles sanitaires fraction papiers souillés	Mouchoirs en papier, papiers absorbants à usage ménager essuie-tout, serviettes en papier, nappes en papier
<b>7. Plastiques</b>	Films polyoléfines (PE et PP)	Sacs de supermarché, sacs poubelles, sacs en plastiques, film d'emballage alimentaire, sacs d'engrais, de compost, de tourbe, sacs de congélation, sacs contenus dans les paquets de céréales Papier de bouquet de fleurs, film plastique d'un pack de bouteilles d'eau, films agricoles, films entourant les palettes et les gros appareils électroménagers lors de leur livraison, films recouvrant les boîtes de CD, film étirable, Filet pour fruits et légumes
	Bouteilles et flacons en PET	Code 1 (ou PET) : Bouteilles d'eau plate ou gazeuse, de boissons sucrées gazeuses, de jus de fruits, de vinaigre, de produits nettoyants, bouteilles d'huile vides bouteilles de lait frais pasteurisé
	Bouteilles et flacons en Polyoléfines	Code 2 (ou HDPE), 4 (ou LDPE), 5 (ou PP) : Bouteilles de lait, de produits de lessives
	Autres emballages plastiques	Boîtes à œufs, barquettes alimentaires, calage électroménager Blister (emballage en plastique moulé, souvent associé à un carton, ex : emballage de pile, brosse à dent, stylo, rasoir, pellicule photos, ampoules...) Alvéoles, pots de produits laitiers et de margarine, pots de yaourt vides, boîte de crème glacée, couvercles (uniquement pour les

		emballages alimentaires), tubes de dentifrices (ou système à pompe) Recharge d'adoucissant vide (berlingots), barquette de viande en mousse polystyrène, boîte de pellicules photos, les brosses à mascara faisant partie du couvercle du récipient Bouchons seuls Bouteilles et flacons en PVC, code 3 (ou PVC) : Bouteilles d'eau plate ou gazeuse, de vinaigre, de produits nettoyants, de produits de droguerie, bouteilles de certaines marques de vin bon marché, bouteilles d'huile vides
	Autres plastiques	Tuyaux, doubles décimètres, couvercles de WC, thermos, brosses à dents, tubes, pichets, gobelets, boîtes plastiques hermétiques, boutons, ustensiles ménagers (fonctionnant sans prise électrique, pile ou accumulateur), pots de fleur, lunettes de soleil Stylos usagés, cintres, pistolets à eau, cerclage en plastique de bières, cassette VHS, CD, DVD, disquette, rasoir en plastique (type « bic »), coton tige, gaine de pompe, stick désodorisant, volant de badminton, pièces automobiles, prise électrique (simple, multiprise, avec ou sans rallonge), fibre de verre Jouets
<b>8. Combustibles non Classés (CNC)</b>	Emballages en bois	Cageots, cagettes, boîtes à fromage, palettes, barquettes de fruits
	Autres combustibles	Bois (planches), cuir (chaussures, sacs, ceintures), caoutchouc, préservatifs, cigarettes, tapis, fourrures,

		bandes élastiques, peluches, sacs d'aspirateur (avec le contenu), crayons, gommes, pneus, tétines, abat-jour, balles de tennis Bouteille d'huile pleine, cadre en bois, chutes de moquette, bougie, rollers, oreiller, couette, duvet, charbon de bois, litière pour animaux non minérales (type copeaux), filtre à air, balai rouleau de papier collant, liège
<b>9. Verre</b>	Emballages en verre incolore	Bouteilles, flacons et bocaux en verre : (conserves, confitures, vins et spiritueux, ketchup, vinaigre, limonade, mayonnaise, petits oignons, pâté, café, cornichons, thé en poudre, petits pots de bébé, jus de fruits, épices, parfums)
	Emballages en verre de couleur	Bouteilles, flacons et bocaux en verre, bière, cidre, vin, eau minérale
	Autres verres	Verres plats, miroirs, vaisselle en pyrex ou opaline Verres à boire en verre ou en cristal, petits bouts de verre, ampoule classique
<b>10. Métaux</b>	Emballages métaux ferreux	Boîtes de boissons (bière, cola, etc.), boîtes d'aliments pour animaux, boîtes de conserves (légumes, fruits, viande, poisson), couvercle, boîtes à biscuits Aérosols en métal ferreux n'ayant pas contenu de produit chimique toxique (ex : brumisateur, bombe de crème chantilly, déodorant, mousse à raser...)
	Emballages aluminium	Boîtes de boissons (bière, cola, etc.), boîtes de conserve,, barquettes, aérosols en aluminium n'ayant pas

		contenu de produit chimique toxique, tubes de dentifrice
	Autres métaux ferreux	Clés, écrous, boulons, clous, couverts, antivols, serre-joints, trombones, épingles de sûreté, outils, pièces automobiles, ustensiles ménagers, parapluie Boule de pétanque, lames de cutter, de rasoir
	Autres métaux	Profilés, couverts, vaisselle, ustensiles de cuisine, gourde, pièces de vélo, serre-joints, objets moulés (robinetterie, casseroles, fils de cuivre, etc.), tuyauterie, pièces automobiles, chutes de fil électrique, rallonges (sans multiprises), capsules de lait ou de yaourt, paquets craquants, aluminium ménager : feuille d'aluminium
<b>11. Incombustible non classés (INC)</b>	Emballages incombustibles	pots de yaourt en argile, pots de moutarde en grès, barquette en terre
	Autres incombustibles	Matériaux inertes non classés dans les autres catégories (gravats, pierres, poteries, coquillages,), céramiques, carreaux, faïence ou porcelaine, briques, pots de fleur en terre, plâtre, Objets en pierre, coquilles d'œufs, d'huîtres, de moules, pattes de crabes et langoustines, os, litière minérale des animaux, fusibles
<b>12. Déchets ménagers spéciaux</b>	Produits chimiques	Emballages souillés : bouteilles d'encre, vernis à ongles, colles ; Emballages souillés et contenant : dissolvant, acides forts, white spirit, toluène, trichloréthylène, ammoniac; Emballages souillés de bains

		<p>photographiques, clichés radiographiques et photographiques ;          Emballages souillés par des fongicides, herbicides, insecticides (y compris les aérosols)...          Huile de moteur, pot de peinture vide ou plein, négatifs photographiques          Cartouche d'encre, toneur de photocopieurs</p>
	Tubes au néon, lampes basse consommation	Tubes au néon, lampes basse consommation
	Piles et accumulateurs	<p>Batteries de voiture, piles boutons, piles alcalines, piles salines,...</p> <p>Piles rechargeables, accumulateur de téléphone portable</p>
	Autres déchets ménagers spéciaux	Seringues, médicaments (produit avec son emballage), filtre à huile, déchets des activités de soins,...
<b>13. Eléments fins</b>	Eléments fins entre 8 et 20 mm	Tous déchets entre 8 et 20 mm

**Annexe 02:****Procédure d'essai de la masse volumique [155]**

Peser le pycnomètre vide avec bouchon -  $m_1$

Remplir le pycnomètre avec le liquide de mesure. Replacer le bouchon avec précaution, en laissant l'excès de liquide s'échapper par le trou du bouchon.

Assurez-vous qu'il n'y a pas de bulles. Sécher l'extérieur et peser -  $m_4$

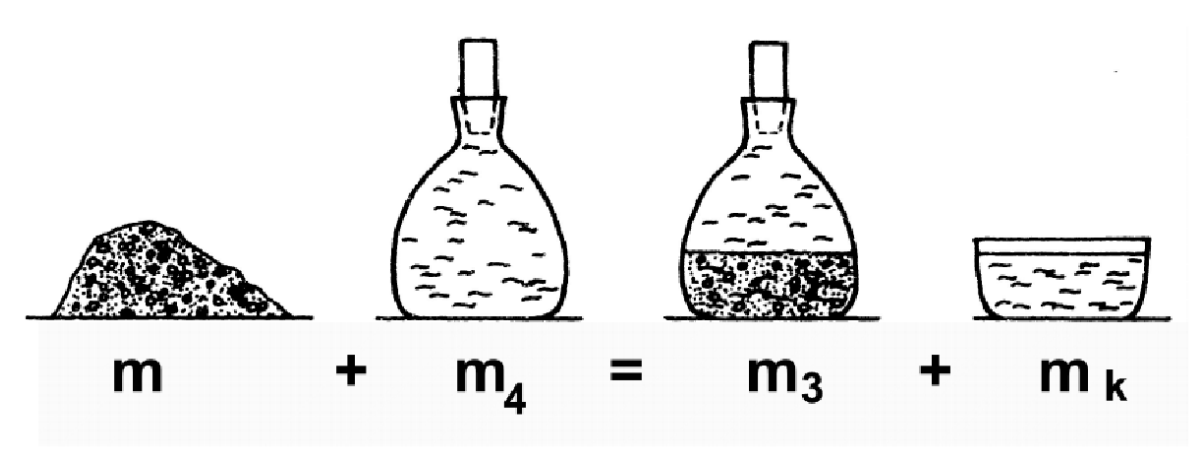
Remplir le pycnomètre sec et vide d'environ 1/3 de l'échantillon. Fermez-le et pesez à nouveau -  $m_2$

Ajouter le liquide de mesure à l'échantillon. Remplir le pycnomètre à environ 2/3. Mélanger avec précaution et faire bouillir le pycnomètre pendant 2 heures. Après refroidissement, Remplir à nouveau avec le liquide, fermer le pycnomètre et peser -  $m_3$

Calculer la masse de l'échantillon à partir de la formule :  $m = m_2 - m_1$

Compter la densité à partir de la formule de base.

où  $m_k$  est la masse de liquide dont le volume a été poussé par le volume de matière solide



**Annexe 03 :**

**Protocoles d'analyse chimique des matériaux utilisés dans la cimenterie de Chlef**

**1. Analyse chimique des matériaux par fusion alcaline**

Les analyses chimiques ont été effectuées dans le laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie d'Oued-Sly (ECDE), située à Chlef.

La méthode d'attaque par fusion alcaline est spécifiquement employée pour les échantillons non cuites (matières premières) selon le protocole opératoire suivant :

Il convient de sécher, de réduire en poudre fine (inférieure à 100  $\mu\text{m}$ ) et d'homogénéiser les échantillons à analyser.

Il convient de peser avec précision 0,5 g de l'échantillon sur un verre de montre, en tenant compte d'une précision de 0,0001 g (soit m).

Transférer l'échantillon dans un creuset en platine propre et préalablement calciné.

Incorporer environ 0,5 g de carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et homogénéiser soigneusement à l'aide d'une baguette en verre.

Pour prévenir les éclaboussures de matière pendant la fusion, il est recommandé de saupoudrer le mélange avec environ 0,5 g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Il convient de préchauffer le creuset sur une plaque chauffante.

Le creuset doit être placé dans un four à moufles préchauffé à une température de 1000°C et laissé à cette température pendant une durée d'une heure.

Il est recommandé d'agiter le contenu du creuset toutes les 5 minutes.

Retirez le creuset et plongez-le immédiatement dans une capsule en porcelaine remplie d'eau distillée froide pour dissocier le matériau collé aux parois du creuset.

Incorporer 5 millilitres d'acide chlorhydrique à concentration 1:1.

Transférer le contenu du creuset dans une capsule en porcelaine propre après avoir rincé le creuset à plusieurs reprises avec de l'eau distillée chaude.

Recouvrir la capsule avec un couvercle en verre et la placer sur un bain de sable jusqu'à ce que l'évaporation soit complète et que l'aspect gélatineux soit obtenu.

La capsule doit être placée dans une étuve de séchage à une température de 100°C pendant une durée de 3 heures.

Prélever et introduire délicatement 5 ml d'acide chlorhydrique concentré (2 N).

Placer la capsule sur un lit de sable pendant une période de 10 minutes.

La solution doit être filtrée à travers un filtre moyen sans cendres (bande jaune) et le filtrat doit être recueilli dans une fiole de 500 ml.

Pour éliminer les chlorures, il est recommandé de laver le précipité 10 à 12 fois avec de l'eau distillée bouillante.

Le filtrat doit être laissé à refroidir jusqu'à ce qu'il atteigne la température ambiante, puis le volume doit être ajusté en ajoutant de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

### **1.1 Détermination de la teneur en silice (SiO<sub>2</sub>)**

Placer le filtre et son contenu dans un creuset en porcelaine ou en alumine propre, préalablement calciné et dont la masse a été mesurée (m1).

Pour assurer une combustion totale du filtre, il convient de positionner le creuset à l'entrée du four à mouffles.

Mettre le récipient dans le four à une température de 1000 ± 50°C et le laisser pendant une durée d'une heure.

Retirer le produit et le laisser refroidir dans un dessiccateur jusqu'à ce qu'il atteigne la température ambiante.

Mesurer la masse m2.

Déterminer le pourcentage massique de la silice selon l'équation suivante :

$$\% \text{ SiO}_2 = \frac{(m_2 - m_1)}{m} * 100$$

### **1.2 Détermination de la teneur en oxyde de calcium (CaO)**

Prélever 50 ml du filtrat de silice à l'aide d'une pipette.

Transférer dans un bécher de 600 ml et compléter avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre environ 200 ml.

Ensuite, il convient d'ajouter :

Une quantité de 20 ml d'une solution de triéthanolamine (TEA).

Pour ajuster le pH de la solution à 13, 10 ml d'une solution de KOH de concentration 2N ont été ajoutés.

Entre 0,2 et 0,3 grammes de l'indicateur Calcon sont nécessaires pour observer l'apparition d'une coloration violette.

Le titrage a été réalisé en utilisant une solution d'EDTA (sel disodique de l'éthylène diamine tétra acétique) de concentration 0,03 M, jusqu'à l'obtention d'un virage bleu clair.

Il convient de prendre en note le volume d'EDTA ajouté, désigné par V1.

Il convient de calculer le pourcentage massique de CaO selon l'équation suivante :

$$\% \text{ CaO} = \frac{[0,03 * 56,08 * 500 * T(\text{EDTA}) * V1 * 100]}{[1000 * 50 * m1]}$$

Avec :

T(EDTA) : Titre de l'EDTA (en g de CaO / ml d'EDTA),

m1 : masse de l'échantillon d'analyse.

### **1.2 Détermination de la teneur en oxyde de magnésium (MgO)**

Transférer 50 ml du filtrat de silice dans un bécher de 600 ml en utilisant une pipette.

La solution doit être diluée avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre un volume de 200 ml.

Il convient d'ajouter :

- 20 millilitres d'une solution de triéthanolamine à une concentration de 1 : 4.

- 10 millilitres d'une solution tampon de pH 10.

Il convient d'ajouter entre 0,2 g et 0,3 g de l'indicateur de pourpre de phtaléine jusqu'à ce qu'une teinte violette apparaisse.

Le titrage doit être effectué en ajoutant la solution d'EDTA 0,03 M progressivement jusqu'à l'obtention d'un virage au rose pâle.

Mesurer le volume d'EDTA ajouté en le notant comme V2.

Le pourcentage massique de MgO est déterminé selon l'équation suivante :

$$\% \text{MgO} = \frac{[0,03 \cdot 40,311 \cdot 500 \cdot T(\text{EDTA}) \cdot (V1 - V2) \cdot 100]}{[1000 \cdot 50 \cdot m1]}$$

### **1.4 Détermination de la teneur en oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

Prélever 50 ml de la solution provenant du filtrat de la silice.

Transférer dans un bécher d'une contenance de 600 ml et diluer avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre un volume de 150 à 200 ml.

Il convient d'ajouter :

Quelques gouttes de bromophénol (2 à 3 ml) sont nécessaires.

Ajouter de l'ammoniac (NH<sub>4</sub>OH) en proportion 1:10 jusqu'à l'obtention d'une coloration bleue, en versant goutte à goutte.

- Vingt-cinq millilitres d'acide chlorhydrique à une concentration de 0,1 N.

- 25 millilitres d'une solution tampon de pH 1,4 (indiquée par un virage au jaune clair).

Entre 0,2 et 0,3 g d'acide salicylique ont été utilisés, ce qui a entraîné une coloration violette.

Il convient de chauffer la solution à une température d'environ 50°C, sans excéder cette valeur.

Le titrage doit être effectué en utilisant une solution d'EDTA de concentration 0,03 M jusqu'à ce que la couleur vire au jaune pâle.

Mesurer le volume d'EDTA ajouté, noté  $V_{EDTA}$ .

Procéder au calcul du pourcentage massique de  $Fe_2O_3$  selon l'équation suivante.

$$\%Fe_2O_3 = \frac{[0,03*159,692*500*\Gamma(EDTA)*V(EDTA)*100]}{[2*1000*50*m1]}$$

### 1.5 Détermination de la teneur en oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ )

La solution contenant  $Fe_2O_3$  doit être laissée à refroidir, puis une solution d'acétate d'ammonium ( $CH_3COONH_4$ ) doit être ajoutée goutte à goutte jusqu'à ce qu'un virage bleu clair soit observé.

Une quantité de 05 ml d'acide acétique a été ajoutée, ce qui a entraîné un changement de couleur de la solution en vert clair.

Ajouter 20 à 25 gouttes de l'indicateur PAN jusqu'à ce que la solution prenne une coloration rouge pomme.

Ajouter 3 à 4 gouttes d'une solution de complexonate de cuivre.

Porter à ébullition jusqu'à ce que la solution prenne une coloration violette, puis maintenir à légère ébullition.

Le titrage a été réalisé en utilisant une solution d'EDTA de concentration 0,03 M jusqu'à ce que le virage de la solution passe du jaune au jaune pâle.

Il convient de prendre en note le volume d'EDTA ajouté, désigné par  $V_{EDTA}$ .

Procéder au calcul du pourcentage massique de l'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) selon l'équation suivante.

$$\%Al_2O_3 = \frac{[0,03*101,961*500*\Gamma(EDTA)*V(EDTA)*100]}{[2*1000*50*m1]}$$

**Annexe 04 :**

**Calculs des mélanges crus**

RAW MEAL CALCULATION													
Raw Ma	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Cl	LOI	Total	Raw Material	
Limesto	4,62	0,73	1,15	51,58	0,69					40,65	99,42	81,74	
Clay	63,28	17,2	3,45	2,58	1,74					5,73	93,98	15,08	
Iron	31,22	3,22	43,84	8,38	0,46					12,08	99,2	1,18	
Bottom	38,16	5,57	1,83	28,05	0,34					21,79	95,74	2,00	LSF SR AR
Raw Me	14,45	3,34	2,01	43,21	0,84					34,669	98,52	100	94,51 2,7 1,66

Bogue's Equations			
C3S	C2S	C3A	C4AF
0	0	0	0

SR	COEFFICIENTS
2,70	a 1
	b 1
AR	c 1
1,66	d 1
	e 100
LSF	f 1,179
94,51	g -11,473
	h 62,854

MATRIX DETERMINANTS
DW -3E+09
Dx -5E+08
Dy -4E+07
Dz -6E+07
D -3E+07

RAW MATERIALS %
100 94,51 2,7 1,66

RAW MEAL CALCULATION													
Raw Ma	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Cl	LOI	Total	Raw Material	
Limesto	4,62	0,73	1,15	51,58	0,69					40,65	99,42	80,84	
Clay	63,28	17,2	3,45	2,58	1,74					5,73	93,98	13,89	
Iron	31,22	3,22	43,84	8,38	0,46					12,08	99,2	1,47	
Bottom	38,16	5,57	1,83	28,05	0,34					21,79	95,74	4,00	LSF SR AR
Raw Me	14,50	3,25	2,12	43,20	0,82					34,626	98,51	100	94,3 2,7 1,53

Bogue's Equations			
C3S	C2S	C3A	C4AF
0	0	0	0

SR	COEFFICIENTS
2,70	a 1
	b 1
AR	c 1
1,53	d 1
	e 100
LSF	f 1,0295
94,30	g -11,9215
	h 62,854

MATRIX DETERMINANTS
DW -2E+09
Dx -4E+08
Dy -4E+07
Dz -1E+08
D -3E+07

RAW MATERIALS %
100 94,3 2,7 1,53

RAW MEAL CALCULATION													
Raw Ma	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Cl	LOI	Total	Raw Material	
Limesto	4,62	0,73	1,15	51,58	0,69					40,65	99,42	79,58	
Clay	63,28	17,2	3,45	2,58	1,74					5,73	93,98	13,17	
Iron	31,22	3,22	43,84	8,38	0,46					12,08	99,2	1,25	
Bottom	38,16	5,57	1,83	28,05	0,34					21,79	95,74	6,00	LSF SR AR
Raw Me	14,69	3,22	2,03	43,18	0,80					34,563	98,48	100	93,35 2,8 1,59

Bogue's Equations			
C3S	C2S	C3A	C4AF
0	0	0	0

SR	COEFFICIENTS
2,80	a 1
	b 1
AR	c 1
1,59	d 1
	e 100
LSF	f 1,0985
93,35	g -11,7145
	h 66,4856

MATRIX DETERMINANTS
DW -2E+09
Dx -4E+08
Dy -4E+07
Dz -2E+08
D -3E+07

RAW MATERIALS %
100 93,35 2,8 1,59

RAW MEAL CALCULATION														
Raw Ma	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	Cl	LOI	Total	Raw Material		
Limesto	4,62	0,73	1,15	51,58	0,69					40,65	99,42	78,61		
Clay	63,28	17,2	3,45	2,58	1,74					5,73	93,98	11,87		
Iron	31,22	3,22	43,84	8,38	0,46					12,08	99,2	1,53		
Bottom	38,16	5,57	1,83	28,05	0,34					21,79	95,74	8,00		
Raw Me	14,67	3,11	2,13	43,22	0,78					34,561	98,48	100		
												LSF	SR	AR
												93,7	2,8	1,46

Bogue's Equations			
C3S	C2S	C3A	C4AF
0	0	0	0

SR	COEFFICIENTS
2,80	a 1
	b 1
AR	c 1
1,46	d 1
	e 100
LSF	f 0,949
93,70	g -12,163
	h 60,7864
	i -2,8982

MATRIX DETERMINANTS
DW -2E+09
Dx -4E+08
Dy -5E+07
Dz -2E+08
D -3E+07

RAW MATERIALS %
W 78,606
X 11,865

**Annexe 05 :**

**Résultats des SSB et des résistances mécaniques du ciment préparés avec le clinker portland et les mâchefers type I.**

**Surfaces spécifiques Blaine(SSB)**

	Ciment témoin	Ciment 5%MIRSU1	Ciment 10%MIRSU1	Ciment 15%MIRSU1	Ciment 20%MIRSU1
SSB (cm <sup>2</sup> /g)	3421	3078	3475	3554	3757

**Résistance mécaniques**

	2 jours		7 jours		28 jours	
	Flexion	Compression	Flexion	Compression	Flexion	Compression
0%	4.87	23.89	6.42	48.25	7.36	59.53
5%	3.22	23.58	6.68	42.72	7.12	52.41
10%	3.71	23.42	6.05	37.37	6.45	43.64
15%	4.54	20.87	5.60	33.48	5.77	37.64
20%	4.12	20.02	5.18	29.65	5.77	34.90

**Photos : Table de tri utilisé, les résidus solides urbains**



