

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ SALAH BOUBNIDER CONSTANTINE 03
FACULTE DE GENIE DES PROCEDES
DEPARTEMENT DE GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

N d'ordre :

Série :

Mémoire

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
EN GENIE DES PROCEDES
OPTION : GENIE DES PROCEDES DE L'ENVIRONNEMENT

*Contribution au développement de la
valorisation des déchets du BTP : une
démarche physico chimique
d'amélioration environnementale*

Présenté par :

Chettah Selsabil
Driouche Hamdi Zoubir
Brachia Chaima

Dirigé par :

Gherbi Naima
MCA

Année universitaire : **2023-2024**

Session : **Juillet**

Remerciement

Nous remercions Allah, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, qui nous a enseigné ce que nous ignorions, de nous avoir donné la santé et tout ce dont nous avons besoin pour réaliser le travail demandé et rédiger ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent à Madame Gherbi Naima, Maître de conférence à Université de Constantine 03 , notre directrice de mémoire, pour avoir accepté de nous encadrer.

Nous remercions vivement les membres du jury qui nous ont fait le grand honneur pour la lecture de ce mémoire et aussi d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à vous tous pour votre soutien inébranlable et votre guidance tout au long de cette année académique.

À vous, Mme Zerdazi Rania, chef de spécialité du département de génie de l'environnement, merci d'avoir créé un environnement propice à l'apprentissage et au développement. Votre leadership et votre vision ont été des sources d'inspiration constantes.

À Madame Achouri Ouafa, nous vous remercions pour votre dévouement et votre engagement à transmettre vos connaissances. Vous avez non seulement enrichi nos compétences académiques, mais vous nous avez également inculqué des valeurs de rigueur et de persévérance qui nous seront précieuses tout au long de notre carrière.

Nous tenons également à remercier toute l'équipe de l'Université 03 de Constantine et le staff de l'incubateur pour leur accompagnement et leurs précieux conseils.

Votre expertise et votre soutien ont été essentiels pour le développement de nos projets et notre croissance professionnelle.

Nous voudrions également exprimer notre reconnaissance et notre gratitude à l'équipe de GICA Granu EST, REDHA ET TOUFIK, sans oublier Tonton Yacine, ainsi qu'aux dirigeants de SNC BEXCAR BENBRAHIM. Merci pour votre collaboration et votre soutien. Votre contribution a été précieuse pour notre développement et notre succès.

Votre patience, votre disponibilité et votre passion pour l'enseignement, l'innovation et la collaboration ont grandement contribué à notre succès.

Dédicaces

Louange à Dieu seul

Ce modeste travail est dédié spécialement

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère Sabrina.

À l'homme, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect pour son amour et son dévouement : mon cher père Aissa.

A mon adorable petite sœur Meriem qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

Mes chers frères Mohamed Rabeh et Younes et mon fiancé Alaa Eddine qui n'ont pas cessé de me conseiller, d'encourager et de soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.

A tout les cousins, les voisins et les ami(e)s j' ai connu jusqu' à maintenant, fifi, dona, kouka, manou, ikram, aya, ghada, youssra, wissem, rayen, abla, noussa, nito, boubi, zineb...

Sans oublier mes binômes selsabil et hamdi zoubir pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Pour finir, à tous ceux que j' aime et qui m' aiment, je dédie ce mémoire.

Hommage & Dédicace

Je rends grâce à ALLAH le TOUT PUISSANT pour tous les bienfaits dont il m'a comblé

Au terme de ce travail, il m'est agréable de dédier ce travail qui n'aurait jamais vu la lumière sans leur contribution efficace, leur appui, leur soutien moral et leurs encouragements mes parents ABLOUCHA & PAPI et mes fidèles amies, ainsi mes chers grands parents.

Maman , Tu as toujours été mon plus grand soutien. Depuis le début de mes études, tu n'as cessé de m'encourager, de me reconforter dans les moments de doute et de me pousser à donner le meilleur de moi-même.

Ce mémoire, fruit de plusieurs années de travail acharné, je te le dédie. Car sans ton amour inconditionnel, ta patience et ta confiance en moi, je n'aurais jamais pu accomplir cette réalisation. Merci d'avoir toujours été là, d'avoir cru en moi et de m'avoir montré la voie. Tu es mon modèle, ma force et ma plus grande fierté. Je t'aime de tout mon cœur.

À la mémoire de mon ami SID ALI MAHI ainsi qu'à mes regrettés enseignants LINDA GHANEM ET MOHAMED CHERIF BOUCENNA, Alors que je m'apprête à clore ce mémoire, je ne peux m'empêcher de penser à vous trois, tous partis bien trop tôt

Bien que vous ne soyez plus physiquement à mes côtés, vos souvenirs et votre héritage vivent en moi. Je sais que vous seriez fiers de me voir achever ce projet, fruit de notre travail acharné et de nos rêves communs. Ce mémoire, je vous le dédie, à vous trois. Puisse-t-il être un humble témoignage de l'immense respect et de l'affection que je vous porte. Vous resterez à jamais gravés dans ma mémoire et dans mon cœur.

Reposez en paix, mes chers amis. ALLAH YARHMAKOM.

إلى شهداء فلسطين الأبرار الذين ضحوا بأرواحهم الزكية في سبيل الدفاع عن أرض الأجداد، أرفع لكم جميع "أسمى آيات التحية والتقدير.

تضحيتكم العظيمة، وشجاعتكم في مواجهة المحن، وإصراركم الراسخ على تقرير المصير، هي مصدر إلهام للإنسانية جمعاء.

إهداء إلى شهداء الثورة الجزائرية

اليوم، ونحن نحتفل بذكرى انتصاركم التاريخي، نجدد العهد بأن نظل أوفياء لدمائكم الزكية وأن نواصل مسيرتكم في سبيل بناء وطن عادل ومزدهر. إن

تضحياتكم لن تذهب سدى، بل ستظل مصدر إلهام الأجيال المستقبل في كفاحهم من أجل العدالة والمساواة.

Dédicaces

À l'aube de conclure ce chapitre significatif de ma vie académique, je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers chaque personne qui a enrichi ce voyage, de près ou de loin.

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu pour Sa guidance infaillible tout au long de mes études. Sa lumière m'a éclairé dans les moments de doute et de difficulté, me rappelant constamment que chaque défi était une opportunité de croissance.

À mes parents bien-aimés, Benmahamed Hassiba et Chettah Djamel, ainsi qu'à ma mamati Chettah Aicha et frères et sœurs, je vous adresse une gratitude infinie. Vous avez été mes piliers, mes mentors et mes fervents supporters depuis le tout début. Votre amour inconditionnel, vos encouragements constants et vos sacrifices sans mesure ont été la force motrice derrière chaque succès que j'ai pu accomplir. Votre foi en moi a été un précieux héritage que je chérirai pour toujours.

À mes amis qui ont été bien plus que des camarades d'étude : vous avez été mes protecteurs. Votre foi en mes capacités m'a donné la force d'aspirer à davantage et de persévérer même face à des défis apparemment insurmontables. Chaque parole d'encouragement, chaque acte de soutien, a été une bouée de sauvetage lors des moments difficiles. Votre amitié est un trésor que je chéris quotidiennement. Merci d'être mes partenaires de bonheur, de soutien et d'aventures. Vous êtes non seulement mes amis, mais ma famille choisie. Que notre amitié continue de croître et de rayonner, car avec vous, chaque instant devient précieux.

À mon trinôme , Ensemble, nous avons relevé le défi avec persévérance et ingéniosité. Nos moments partagés resteront gravés comme des chapitres précieux de notre parcours académique. Merci pour votre collaboration exceptionnelle, votre soutien indéfectible et notre réussite commune. Ce projet n'aurait pas été le même sans votre dévouement et votre esprit d'équipe. Que nos chemins se croisent à nouveau dans nos futures aventures professionnelles.

Ce projet de fin d'études est bien plus qu'un simple travail universitaire pour moi. Il symbolise la culmination d'années de travail acharné, de détermination et de foi. Chaque ligne écrite, chaque idée explorée, porte l'empreinte de chacun d'entre vous. C'est ensemble que nous avons tissé cette toile complexe de connaissances et d'expériences, et je ne saurais exprimer combien je suis honorée et reconnaissante de partager ce moment avec vous.

Selsabil

Tables des matières

Liste de figures	I
Liste des tableaux	II
Liste des abréviations	III
Introduction	1

Chapitre 1 : État de la gestion des déchets inertes DI

	Pages
1.1 Objectifs et démarche	2
1.2 Définitions des concepts	2
1.2.1 Définition déchets industriels	3
1.2.2 Classification des déchets industriels	3
1.3 La gestion des déchets	5
1.4 Composition des déchets du BTP : focus sur une filière de recyclage	6
1.5 Production des déchets inertes	6
1.6 Ressources en granulats naturel	7
1.6.1 Les usages des granulats naturels	8
1.6.2 Les différents natures de granulats nature	8
1.6.3 Nature des granulats d'origine minéralogique	8
1.7 Production des granulats dans le monde	10
1.8 Production des granulats en Algérie...	11
1.9 Matériaux biosourcés et naturels pour une construction durable	14

1.9.1 Contribution des matériaux de construction	14
---	-----------

Chapitre 2 : Matériaux de construction.

2.1 Introduction	16
2.2 Les liants utilise dans la construction	16
2.2.1 Le ciment	16
2.2.1.a Matières premières	17
2.2.1.b Les composants principaux	18
2.2.1.c Composants secondaires	19
2.2.1.d Classification des ciments en fonction de leur composition	21
2.2.2 Les cendres	21
2.2.2.a Les propriétés des cendres	22
2.2.2.b Utilisation des cendres	22
2.2.3 La poudre de verre	23
2.2.3.a Propriétés du verre	23
2.3 Les Adjuvants	26
2.3.1 Définition	26
2.3.2 Fonction principale et secondaire	26
2.3.3 Classification Selon la Norme NF EN 934	27
2.4 Les fibres végétales	28
2.4.1 Historique des fibres végétales	28
2.4.2 Feuilles de maïs	29
2.4.3 la coquille d'œuf	30
2.4.4 Absorption d'eau dans les fibres	31

Chapitre 3 : Etude expérimentale

3.1 Introduction	33
3.2 Matériaux utilisés	33
3.2.1 Ciment	34
3.2.2 Les coquilles d'oeufs	35
3.2.3 La poudre de verre	36
3.2.4 Les cendres	39

3.2.5 Les feuilles de maïs	39
3.3 Le procédé de valorisation des déchets BTP	41
3.3.2 Préparation de la poudre de déchet BTP	34
3.3.3 Formation de la pâte minérale	42
3.3.4 Façonnage	45
3.4 Méthodes de caractérisation	46
3.4.1 Diffraction des rayons X (DRX)	46
3.4.1.a Principe de la méthode	47
3.4.2 Microscopie électronique à balayage (MEB)	48
3.4.2.a Principe de la méthode	48

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4.1 Introduction	52
4.2 Caractérisation par DRX de la poudre de déchet inerte	52
4.2.1 Analyse de la Première phase de poudre DI	54
4.2.2 Tracé de la première phase de la poudre DI	54
4.2.3 Analyse de la deuxième phase de la poudre de DI	55
4.2.4 Tracé de la deuxième phase de poudre de DI	56
4.2.5 Analyse de la troisième phase la poudre de DI	57
4.2.6 Tracé de la troisième phase de poudre de DI	57
4.2.7 Taille de particules cristallines de la poudre DI	59
4.3 Caractérisation par DRX de la poudre de Coquille d'oeufs	60
4.3.1 Tracé de la phase de poudre de CD	61
4.4 Caractérisation par DRX de la poudre de bois	63
4.4.1 Analyse de la première phase de PB	63
4.4.2 Tracé de la première phase de PB	64
4.4.3 Analyse de la deuxième phase de PB	65
4.4.4 Tracé de la deuxième phase de PB	66

La liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1: Flux des déchets inertes en Algérie	6
Figure 1.2: Évolution des quantités de déchets inertes produites en millions de tonnes par an	7
Figure 1.3 : Consommation de granulats pour quelques ouvrages types	8
Figure 1.4 : Production mondiale des granulats en 2008	9
Figure 1.5: Evolution de la production des agrégats période 2000–2009 (Bilan des activités minières)	12
Figure 1.6: Production des agrégats (M3) : année 2009, 10 wilayas les plus productrices. (Bilan des activités minières, 2008)	12
Figure 1.7 : Les impacts de l'extraction du sable sur l'environnement	13
Figure 1.8 : Phases d'analyse de cycle de vie des bâtiments	14
...	14
Figure 1.9 : Propriétés caractéristiques d'un éco matériau	15

Chapitre 2

Figure 2.1 : Adjuvants liquides de gauche à droite : agent anti-lessivage, réducteur de retrait, réducteur d'eau, agent moussant, inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air

26

Figure 2.2 : Différentes formes de fibres végétales	29
Figure 2.3 : Feuilles de maïs séché	30
Figure 2.4 La coquille d'œuf	30

Chapitre 3

Figure 3.1 : Différents matériaux utilisés	33
Figure 3.2 : Ciment Portland	34
Figure 3.3 : Les coquilles d'œufs	35
Figure 3.4 : Moulin à café	35
Figure 3.5 : Le tamisage des coquilles d'œufs	36

Figure 3.6 : La poudre de coquilles d'œufs

36

Figure 3.7 : La poudre de verre	37
Figure 3.8 : Broyeur High-Speed Multifunction Grinder	38
Figure 3.9 : Schéma de la préparation de la poudre de verre	38
Figure 3.10 : Les feuilles de maïs	39
Figure 3.11 : Feuilles de maïs séchés	40
Figure 3.12 : Collecte des déchets inertes	41
Figure 3.13 : Poudre de bois	42
Figure 3.14 : Poudre de DI	42
Figure 3. 15 : Poudre de verre	42
Figure 3.16 : Effet de l'eau ajouté sur la résistance	45
Figure 3.17 : Granulats obtenus	47
Figure 3.18 : Diffractomètre de RX	48
Figure 3.19 : Principe de la loi de Bragg	48
Figure 3.20 : Microscopie électronique à balayage : interaction entre les électrons et l'échantillon	
51	

Chapitre 4

Figure 4.1 : Spectre DRX de la poudre DI	53
Figure 4.2 : Tracé de la première phase de la poudre DI	55
Figure 4.3 : Trace de la deuxième phase de la poudre DI	56
Figure 4.4 : Tracé de la troisième phase de la poudre DI	58
Figure 4.5 : Calcul de la taille cristalline des phases identifiées dans la poudre DI	59
Figure 4.6 : Spectre DRX de la poudre CD	61
Figure 4.7 : Tracé de la phase de la poudre CD	62
Figure 4.8 : Spectre DRX de la poudre du bois PB	63
Figure 4.9 :Tracé de la première phase de poudre de bois	64
Figure 4.10 : Spectre DRX de la deuxième phase de PB	65
Figure 4.11 : Tracé de la deuxième phase de PB	66

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Différents types de ciment avec leurs compositions correspondantes	21
Tableau 2.2 : Teneur en carbone et âge de formation	22
Tableau 2.3 : Pourcentage de composants en verre	25
Tableau 2.4 : les types de verre et ses principales utilisations	25

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Composition chimique moyenne du ciment CEM II/A-L 4205 N utilisé	34
Tableau 3.2 : Propriétés physiques du ciment utilisé	34

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Composition chimique de la première phase de la poudre DI	55
Tableau 4.2 : Composition chimique de la deuxième phase de la poudre DI	56
Tableau 4.3 : Composition chimique de la troisième phase de la poudre DI	58
Tableau 4.4 : Tableau récapitulatif des résultats expérimentaux pour de la taille des grains des trois 03 phases	60
Tableau 4.5 : Composition chimique de la première phase de la poudre CD	62
Tableau 4.6 : Composition chimique de la première phase de la poudre PB	64
Figure 4.7 : Composition chimique de la première phase de la poudre PB	66

Liste des abréviations

AND :	Agence nationale des déchets.
BTP :	Bâtiments et travaux publics.
CET :	Centre d'Enfouissement Technique.
DCD:	Les déchets de construction et de démolition.
DI :	Déchets Inertes.
DM :	Déchets ménagers.
DMA :	Déchets ménagers et Assimilés.
DSD :	Déchets spéciaux Dangereux.
GES :	Gaz à Effet de Serre.
DND :	Déchets non dangereux.
DAE :	Déchets d'activités économiques.
ACV :	L'analyse du cycle de vie.
CEM:	Ciment.
DRX :	La Diffraction des Rayons X
Pd :	Le poids des fibres séchées à l'air.
Vf :	Le volume des fibres.
Ph :	Poids des fibres immergés dans l'eau.
Wf :	La capacité d'absorption d'eau.
CAO :	Conception assistée par ordinateur.
PB :	Poudre de bois.
JCPDS:	Joint committee on Powder diffraction standards.

Introduction général

L'optimisation de la gestion des déchets dans le secteur du BTP, à la fois d'un point de vue environnemental et économique, s'avère un défi crucial. Les différents aspects de cette problématique, mettant en lumière l'importance, les avantages et les défis de la valorisation des déchets du BTP.

Le projet VALERC-DZ est une initiative innovante visant à valoriser les déchets non recyclables en les transformant en matériaux de construction durables. Développé par une équipe d'experts, ce projet repose sur une approche écologique et circulaire pour répondre à la problématique croissante des déchets ultimes.

L'objectif principal du projet est de détourner ces refus de tri des filières d'élimination traditionnelles, telles que l'enfouissement ou l'incinération, qui génèrent des impacts environnementaux importants. Au lieu de cela, le procédé séquestre le CO₂ contenu dans ces déchets et les transforme en granulats minéraux réutilisables dans la construction, en remplacement des granulats naturels avec un taux de substitution du granulats à hauteur de 10% maximum de la masse de gravillon et pour un usage non structural et non armé qui ne demande pas de résistance, tel le béton de propreté, le béton de trancher, le béton de pose de bordure et le béton de remplissage non armé.

Cette solution innovante permet ainsi de donner une seconde vie à des déchets qui étaient jusqu'alors considérés comme des rebuts, tout en réduisant l'empreinte carbone du secteur de la construction. VALERC-DZ s'inscrit donc dans une démarche d'économie circulaire visant à développer des modèles plus durables et respectueux de l'environnement.

Les principales étapes du projet consistent à collecter, trier et traiter ces déchets non recyclables pour les transformer en matériaux de construction de haute qualité. Nos équipes de recherche et développement travaillent également à l'amélioration continue du procédé afin d'en optimiser les performances environnementales et économiques.

Après cette introduction qui présente l'objectif de cette étude, notre travail est organisé de la façon suivante :

- Le premier chapitre réunit toutes les définitions et classifications des déchets industriels et présente également l'état de la gestion des déchets inertes.

- Le deuxième chapitre est une étude bibliographique sur la composition du ciment et les différents adjuvants
- Le chapitre trois décrit la procédure expérimentale, collecte des déchets, matériels utilisés et les différentes méthodes de caractérisation des adjuvants préparés.
- Le quatrième chapitre regroupe tous les résultats de caractérisation obtenus

Nous terminons par une conclusion englobant les principaux résultats et les perspectives préconisées.

Chapitre 1

État de la gestion des déchets inertes DI

Chapitre 1

Etat de la gestion des déchets inertes DI

1.1 Objectifs et démarche

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous intéressons au sujet d' une solution industrielle et écologique pour traiter les déchets non recyclables, tels que le plâtre, les plastiques, le bois et les isolants, généralement appelés "refus de tri". Jusqu'à présent, deux méthodes courantes étaient utilisées pour gérer ces déchets : l'enfouissement et l'incinération, toutes deux étant sources de pollution et d'émissions importantes de gaz à effet de serre. L'objectif est de contribuer à une nouvelle politique de déchets fondée sur des connaissances théoriques. Nous souhaitons apporter un éclairage et une aide aux décideurs politiques et aux responsables locaux sur le choix de politique de déchets notamment en matière de financement de services, d'analyse des coûts, de mode d'élimination, des mécanismes d'incitation aux politiques de prévention. Effectuer une analyse future des quantités va nous permettre de maîtriser les coûts, de prévoir un mode d'élimination efficace, de promouvoir des politiques de recyclage et de réutilisation. La plupart des rapports effectués dans ce domaine sont des rapports issus des bureaux d'études qui présentent en particulier des états des lieux ou un axe spécifique , Pour répondre de manière plus respectueuse de l'environnement à ce défi, CHS a développé une nouvelle approche de traitement des déchets qui capture le dioxyde de carbone plutôt que de le libérer dans l'atmosphère. Cette méthode transforme également les déchets en granulats minéraux réutilisables dans la construction, lesquels peuvent être utilisés de la même manière que les granulats provenant de carrières pour la construction de routes et de béton non armé .

Cette idée a été inspirée par l'analyse des rapports de l'Agence Nationale des Déchets et des enjeux éco-industriels dans notre pays et la situation critique que connaît l'Algérie dans la gestion de ce service a motivé notre choix. En termes d'impact potentiel, cette approche pourrait réduire l'empreinte carbone du pays de 3% dans toutes les industries. Ainsi, ce processus représente une opportunité significative pour favoriser la décarbonation et contribuer à un environnement plus durable.

1.2 Définitions des concepts

Les déchets au sens de la réglementation algérienne comprennent trois grandes catégories :

- Les déchets ménagers et assimilés DMA .

- Les déchets spéciaux (industriels, agricoles, soins, services,...)
- Les déchets inertes DI .

La définition des différents types des déchets et des modes de traitement pouvant varier d'un pays à l'autre, il est nécessaire de définir précisément les termes que nous utiliserons par la suite

Les déchets sont des résidus issus de processus de production, de transformation ou d'utilisation, incluant tout objet ou substance considéré comme inutile, dangereux ou encombrant. Ils sont générés par diverses procédures et peuvent être solides, liquides ou gazeux. En général, les déchets sont des éléments en fin de vie ou des sous-produits jugés indésirables, et leur élimination appropriée est cruciale pour préserver l'environnement et la santé publique ¹.

1.2.1 Définition déchets industriels

Les déchets d'activités économiques (DAE), anciennement connus sous le nom de déchets industriels, sont générés par divers secteurs tels que l'industrie, le bâtiment et les travaux publics (BTP), le secteur tertiaire, l'agriculture, etc.

Dans le cadre de la responsabilité élargie du producteur, celui-ci est chargé de gérer ses déchets depuis leur production jusqu'à leur élimination ou leur valorisation finale ¹.

1.2.2 Classification des déchets industriels

Les déchets solides urbains sont définis par l'article 2 du décret n° 84-378 du 15 décembre 1984 fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement des déchets solides urbains qui sont les déchets domestiques et qui sont assimilables par la nature et le volume. Il s'agit notamment : des ordures ménagères industrielles ou collectives, des produits résultant du nettoyage tels que balayage, curage des égouts, des déchets encombrants, objets volumineux, ferrailles, gravats, décombres, carcasses automobiles, des déchets anatomiques ou infectieux provenant des hôpitaux, chimiques ou autres de soins, des déchets et issues d'abattoirs, des déchets commerciaux, emballages et autres résidus générés par les activités commerciales ¹.

Déchets ménagers et assimilés : ce sont tous les déchets issus des ménages, des activités industrielles, commerciales, artisanales, et autres, qui sont assimilables aux

déchets ménagers par leur nature et leur composition, tels que, déchets de cuisine, emballages

Déchets encombrants : ce sont tous les déchets issus des ménages qui ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés en raison de leur caractère volumineux. Nous pouvons citer ici, les meubles, les pneus, l'électroménager ¹.

Déchets spéciaux : ce sont les déchets qui ne sont pas assimilés aux déchets ménagers, et qui nécessitent un mode spécifique de traitement en raison de leur nature et de leur composition. L'origine de ces déchets est l'activité industrielle, agricole, les soins, les services et toutes autres activités, qui ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés. Il existe un cas particulier des déchets spéciaux, qui sont susceptibles de nuire à la santé publique et à l'environnement via leurs constituants ou par leurs matières nocives, on parle ici de déchets spéciaux dangereux ¹.

Déchets d'activité de soins : ce sont des déchets spéciaux issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire ¹.

Déchets inertes DI: Les déchets inertes sont principalement composés de matériaux minéraux issus du secteur du bâtiment et des travaux publics, comme le béton, les briques, les tuiles, les céramiques, les pierres naturelles et le verre. Par définition, ces déchets ne subissent pas de modifications physiques, chimiques ou biologiques importantes. Ils ne brûlent pas, ne se décomposent pas et ne provoquent aucune autre réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas les matériaux avec lesquels ils entrent en contact, de manière à nuire à l'environnement ou à la santé humaine ². Ainsi, les déchets inertes se caractérisent par leur stabilité et leur inertie, ce qui facilite leur gestion et leur valorisation. Ils représentent la majorité des déchets du secteur du BTP, soit environ 72% des volumes ².

Après avoir donné un aperçu sur les définitions des différents types des déchets en Algérie, en se basant sur la réglementation en vigueur, nous précisons ensuite les définitions des modes de traitement existant en Algérie ou prévus dans le programme national de gestion des déchets municipaux :

1.3 La gestion des déchets

La gestion des déchets comprend diverses opérations, telles que la collecte, le tri, le transport, le stockage, la valorisation et l'élimination des déchets, ainsi que le contrôle de ces activités.

En Algérie, plusieurs étapes distinctes caractérisent ce processus :

- La collecte des déchets consiste à ramasser et/ou regrouper les déchets en vue de les transporter vers un site de traitement.
- Le tri des déchets implique la séparation des différents types de déchets en fonction de leur nature, par exemple le papier, le plastique, etc.
- La valorisation des déchets comprend leur réutilisation, leur recyclage ou leur compostage. Le recyclage vise à valoriser des produits usagés ou des déchets, tandis que le compostage est un processus biologique où les déchets organiques sont transformés en compost par des microorganismes.
- L'élimination des déchets englobe les différentes méthodes de traitement thermique, physico-chimique et biologique, ainsi que le stockage en décharge ou en enfouissement. Elle comprend également des pratiques telles que l'immersion des déchets dans le milieu aquatique ou leur enfouissement en sous-sol. L'incinération, par exemple, réduit considérablement le volume des déchets combustibles. Les résidus de cette opération sont ensuite éliminés dans des centres d'enfouissement technique.
- L'enfouissement technique concerne les déchets considérés comme ultimes, c'est-à-dire ceux qui ne peuvent plus être traités de manière économiquement viable ou techniquement réalisable. Les déchets admis dans les centres d'enfouissement technique sont principalement solides et minéraux, avec un potentiel polluant généralement constitué de métaux lourds peu mobiles. Ces déchets sont caractérisés par leur faible réactivité, leur évolution limitée et leur faible solubilité³.

1.4 Composition des déchets du BTP : focus sur une filière de recyclage

Les déchets du BTP se composent majoritairement des déchets inertes, soit environ 72%, les déchets non inertes non dangereux constituent environ 28% des déchets du BTP. Il peut s'agir d'emballages, de bois, de plastiques, de métaux, de produits mélangés issus de chantiers de réhabilitation, etc. Bien que pouvant se modifier, ces déchets ne présentent pas de risque particulier. Enfin, les déchets dangereux représentent environ 5% des déchets du BTP. Ils contiennent des substances dangereuses pour l'environnement ou la santé, comme les peintures, le bois traité aux métaux lourds ou l'amiante friable. Leur transport, stockage et élimination nécessitent des précautions spécifiques ².

Les principaux exutoires des déchets du BTP sont les plateformes de regroupement, les carrières, les plateformes de recyclage et les installations de stockage. Certaines installations ne gèrent qu'une seule activité, mais dans de nombreux cas, certaines activités coexistent sur le même site.

Chaque année, des quantités importantes de déchets inertes sont générées essentiellement par les ménages, secteur du Bâtiment et Travaux Publics (BTP), et autres industries métallurgiques (figure 1).

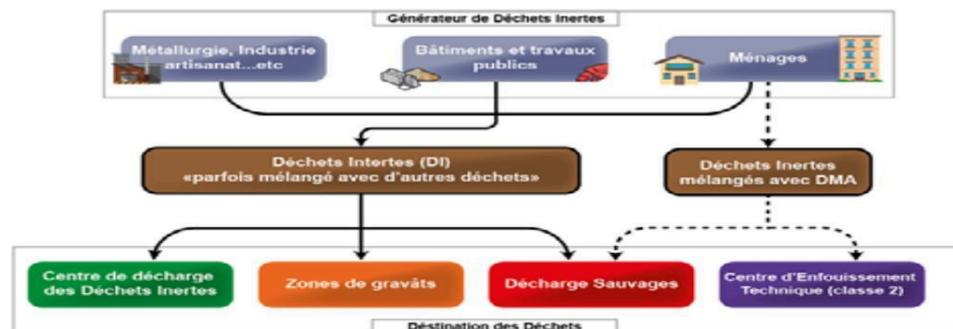


Figure 1.1 : Flux des déchets inertes en Algérie ³(Source AND année 2020)

1.5 Production des déchets inertes

L'expansion démographique et le besoin de nouveaux logements entraînent une augmentation du nombre de chantiers du BTP, ce qui conduit à une augmentation continue des quantités de déchets inertes générées. Les déchets inertes, principalement issus du secteur du BTP (construction et démolition), représentaient environ 11 millions de tonnes en 2016. Les entreprises du BTP sont de grandes productrices de déchets inertes, notamment le béton, les

briques, les tuiles, les bétons revêtus de colles, les plâtres, le verre, le bitume, les terres et les cailloux, ainsi que les matériaux d'isolation et les revêtements de sol ³. La production annuelle de déchets inertes est estimée à plus de 13 millions de tonnes en 2020.

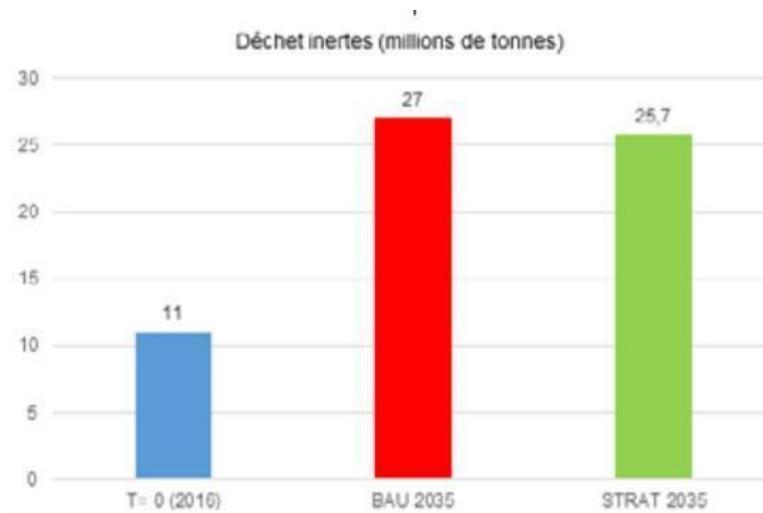


Figure 1.2 : Évolution des quantités de déchets inertes produites ³.

1.6 Ressources en granulats naturels

Les matériaux naturels ont joué un rôle essentiel dans l'histoire de la construction, depuis les premiers abris en cavernes jusqu'aux structures architecturales emblématiques. Les bâtisseurs ont progressivement évolué des matériaux rudimentaires comme les branchages et la terre vers des matériaux plus durables tels que les pierres dures pour ériger des édifices plus imposants. Les pyramides, temples, châteaux et maisons illustrent le remarquable savoir-faire et la créativité des générations passées dans la construction de leur habitat et l'aménagement de leur environnement.

Les matériaux naturels, tels que le bois, l'argile, la paille, le chanvre, la terre crue, et même le liège et le mycélium, continuent d'être des choix privilégiés pour la construction écologique et durable. Leur utilisation offre des avantages écologiques, économiques et esthétiques, tout en contribuant à la réduction de l'empreinte environnementale de l'industrie de la construction. Ces matériaux offrent des propriétés uniques, comme une bonne isolation thermique, une régulation de l'humidité, une capacité de recyclage, et une esthétique naturelle qui favorise le bien-être des occupants ⁴.

1.6.1 Les usages des granulats naturels

Les granulats, souvent associés à des matériaux simples, sont en réalité des produits industriels soigneusement conçus, avec des caractéristiques réglementées dans de nombreux pays. Ils sont considérés comme des produits industriels standardisés en raison des exigences spécifiques liées à leurs diverses utilisations. Ainsi, les granulats ne sont pas de simples matériaux rudimentaires, mais des éléments essentiels de nombreux processus de construction, soumis à des normes strictes en termes de qualité et de performances pour assurer leur efficacité dans une variété d'applications. D'après les informations fournies dans les sources, les granulats ne sont pas de simples matériaux rudimentaires, mais des produits industriels élaborés avec soin, dont les caractéristiques sont codifiées dans de nombreux pays. En effet, les granulats doivent répondre à des exigences spécifiques en fonction de leur utilisation. Alors que pour les remblais, presque tous les types de matériaux sols ou roches peuvent être utilisés à condition d'une mise en œuvre adaptée, les granulats destinés à des usages plus techniques comme les sous-couches routières, les bétons, les ouvrages de structure, les ponts, les ballasts de voies ferrées ou les couches de roulement autoroutières, doivent satisfaire à un niveau d'exigence minimum, voire très strict, en termes de qualité et de performances. Ainsi, les granulats ne sont pas de simples matériaux bruts, mais des produits industriels élaborés avec soin pour répondre aux normes et réglementations en vigueur, en fonction de leurs applications spécifiques dans le domaine de la construction ⁴.

1.6.2 Les différents natures de granulats naturels

Les différents natures de granulats naturels : Les granulats, fragments de roches de taille réduite (0 à 125 mm), sont indispensables pour la construction d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment, constituant la matière première essentielle pour l'industrie du bâtiment et des travaux publics. Qu'ils proviennent de roches éruptives, calcaires, alluvionnaires ou du recyclage, les granulats font l'objet d'un traitement spécifique, depuis leur extraction des roches jusqu'à leur commercialisation, adaptée à leur utilisation prévue ⁵.

1.6.3 Nature des granulats d'origine minéralogique

- Granulats issus de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires
- Granulats issus de roches métamorphiques comme le quartz et les quartzites
- Granulats issus de roches éruptives comme les basaltes, les granites et les porphyres

Granulats roulés :

- Granulats dont la forme a été acquise par l'érosion, provenant de torrents, rivières et fleuves

Granulats issus de roches alluvionnaires :

- Sables et gravillons transportés par des cours d'eau anciens ou récents, de forme arrondie.

Granulats d'extraction marine :

- Granulats récupérés dans le fond des mers et des océans, de forme arrondie.

Granulats légers :

- Ponce, pouzzolane, argile ou schiste expansés, laitier expansé, de masse volumique faible.

Granulats lourds :

- Barytine, magnétite, limonite, pyrite de fer, déchets ferreux, de densité élevée

Granulats recyclés :

issus du recyclage de déchets de construction et de démolition

La diversité géologique des gisements permet d'obtenir une grande variété de granulats naturels, aux caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques différentes, adaptés à de nombreuses applications dans le bâtiment et les travaux publics .

1.7 Production des granulats dans le monde

Le granulat est largement reconnu comme le matériau le plus utilisé à l'échelle mondiale, avec les points suivants :

- Il occupe une place prépondérante dans la consommation des ressources minérales, juste après l'eau.
- Chaque année, plus de 350 millions de tonnes de granulats sont utilisées, principalement pour les routes et le béton prêt à l'emploi.
- Dans la construction, un logement nécessite en moyenne entre 100 et 300 tonnes de béton, avec près de deux tonnes de granulats par mètre cube de béton.
- Dans les travaux publics, la construction routière absorbe 80% des granulats produits, avec environ 30 000 tonnes nécessaires pour 1 km de route.
- Les granulats sont également essentiels pour les pistes d'atterrissage, les voies ferrées, les infrastructures collectives (écoles, hôpitaux) et les ouvrages de génie civil (barrages, viaducs, ponts).

Ainsi, le granulat représente au moins 80% du volume des ouvrages de génie civil, jouant un rôle crucial dans l'aménagement de l'environnement et le développement économique et culturel ⁵.



Figure 1.3 : Consommation de granulats pour quelques ouvrages types ⁵.

Les pays membres de l'OCDE utilisent en moyenne entre 5 et 8 tonnes de granulats par habitant et par an, tandis que les pays en développement ou en transition ont une consommation d'environ 1 à 2 tonnes par habitant et par an. Ces chiffres mettent en lumière les besoins en granulats encore à combler pour répondre aux demandes en équipements, infrastructures et constructions dans certains pays. La demande mondiale de granulats était

d'environ 24,9 milliards de tonnes en 2008 et a atteint près de 28,7 milliards de tonnes en 2013, ce qui en fait la ressource la plus utilisée après l'eau ⁵.

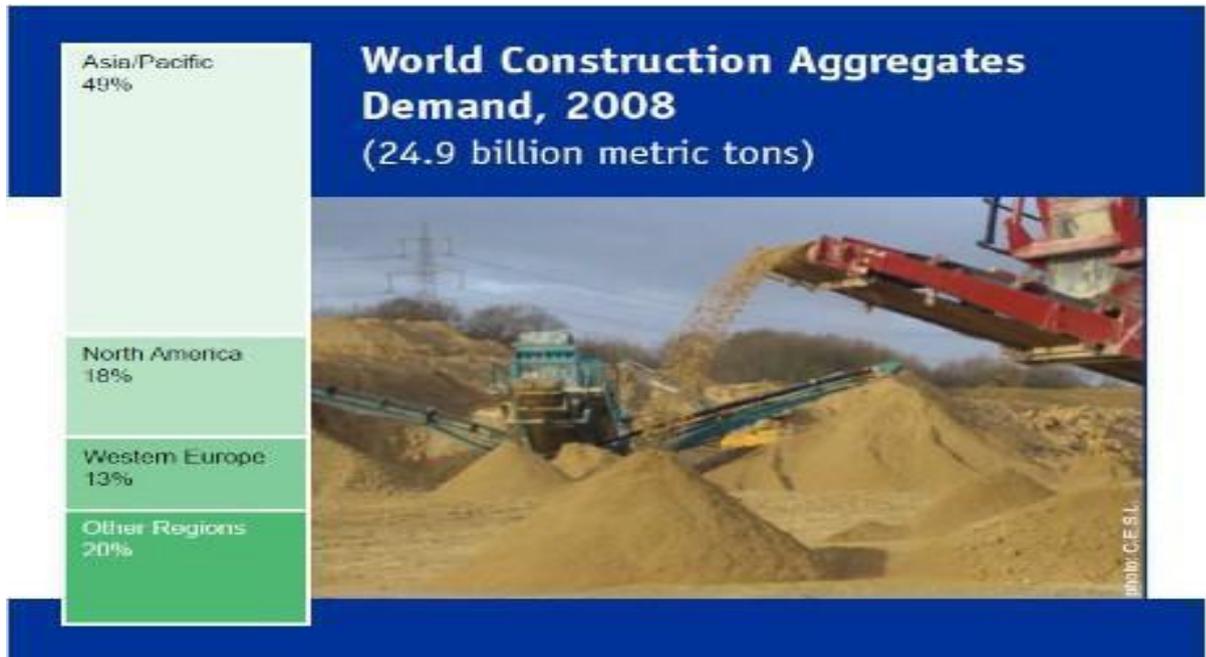


Figure 1.4 : Production mondiale des granulats en 2008 ⁵.

La recherche de ressources pour faire face à la demande croissante en granulats et l'exploitation de ces ressources sans porter préjudice à l'environnement posent de plus en plus de problèmes notamment dans les régions actives en matière de construction. La problématique des granulats dépend des considérations socio-économiques, organisationnelles, techniques, environnementales, juridiques et fiscales, ce qui revêt un caractère politique nécessitant l'élaboration d'une stratégie appropriée. Cette stratégie doit s'inscrire dans le cadre du développement durable et intégrer la recherche et la validation de solutions alternatives les plus appropriées ⁵.

1.8 Production des granulats en Algérie

La production nationale des agrégats en Algérie a connu une croissance soutenue depuis l'année 2000, passant de 4,14 millions de m³ à 55,3 millions de m³ en 2009, soit une multiplication par plus de 13. En 2009, huit wilayas du nord du pays (Bordj Bou Arreridj, Sétif, Mascara, Boumerdès, Constantine, Mila, Sidi Bel Abbès et Aïn Defla) ont dépassé les 3

millions de m³ chacune, représentant un total de 30,6 millions de m³, soit plus de la moitié (55,3%) de la production nationale (Figure 5)(Figure 6) ⁵.

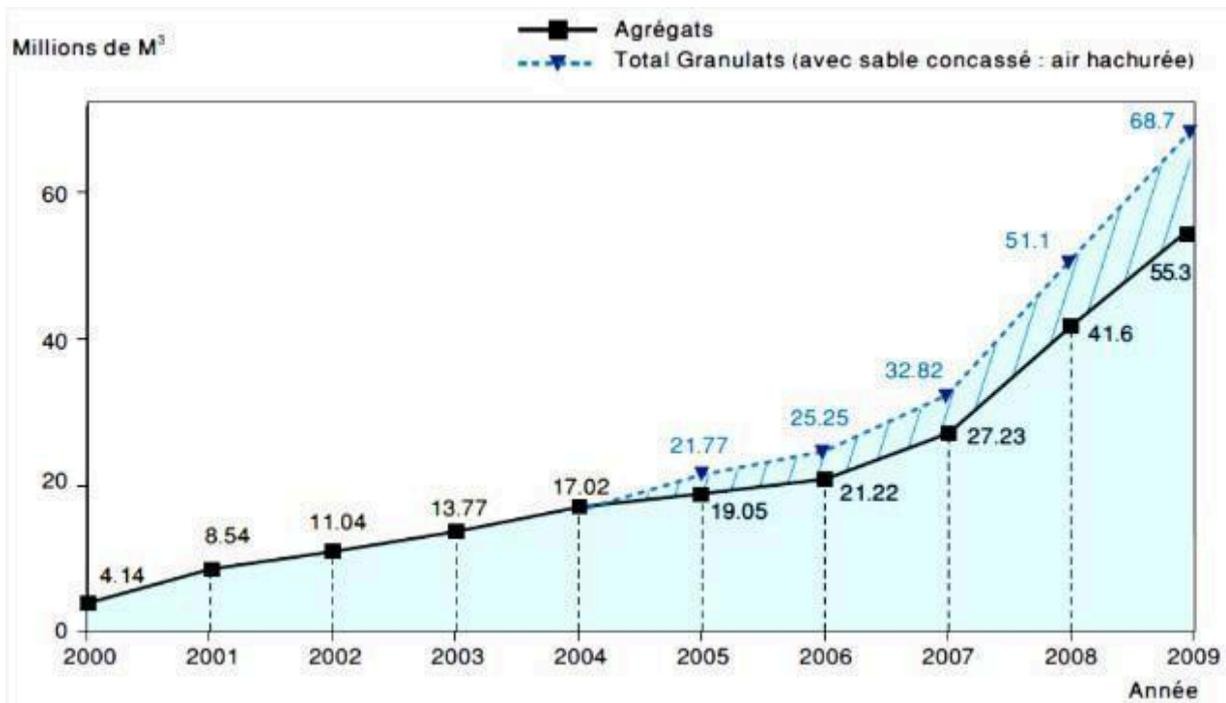


Figure 1.5: Evolution de la production des agrégats période 2000–2009 (Bilan des activités minières) ⁵.

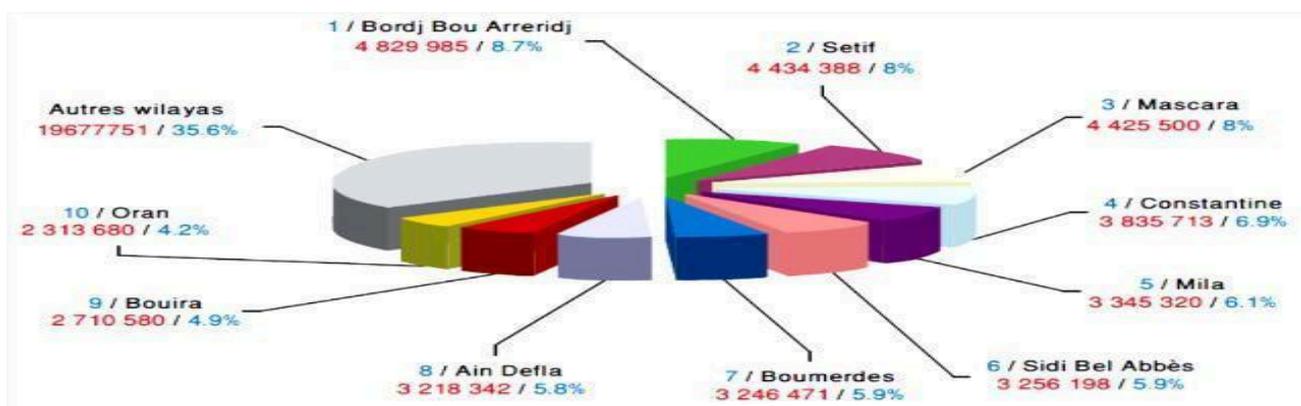


Figure 1.6 : Production des agrégats (M3) : année 2009, 10 wilayas les plus productrices. (Bilan des activités minières, 2008) ⁵.

La demande croissante en granulats à béton ou pour autres usages dans de nombreuses régions du monde a conduit à la recherche de matériaux de substitution. Les sables de concassage sont souvent considérés comme une alternative viable, mais il est essentiel qu'ils répondent aux critères de qualité spécifiques à cet usage et soient disponibles en quantités suffisantes à des prix compétitifs. Cependant, les sables issus des carrières sont souvent considérés comme des "déchets" par les utilisateurs en raison de leur teneur élevée en particules fines, parfois argileuses, bien que les spécifications d'utilisation permettent leur utilisation dans de nombreux cas.



Figure 1.7 : Les impacts de l'extraction du sable sur l'environnement ⁵.

1.9 Matériaux biosourcés et naturels pour une construction durable

Les matériaux biosourcés sont désormais des solutions incontournables pour répondre aux défis de la transition énergétique, en réduisant l'énergie grise, en optimisant les fonctionnalités et en diminuant les nuisances. Ils trouvent des applications dans de nombreux domaines, tels que le bâtiment, les infrastructures et l'automobile. Cependant, ces matériaux présentent une grande diversité et une variabilité importante même pour un même produit. Il est donc essentiel de quantifier et qualifier leurs performances pour les faire connaître aux utilisateurs potentiels et identifier les matériaux les plus adaptés à chaque application ⁶.

1.9.1 Contribution des matériaux de construction

Dans le domaine de la construction, l'analyse du cycle de vie des bâtiments s'appuie généralement sur des déclarations environnementales pour évaluer l'impact des matériaux utilisés. Parmi ceux-ci, on trouve l'acier, le bois et le verre, mais le béton est de loin le plus employé en raison de sa résistance à la compression et de son coût abordable. Cependant, l'empreinte écologique du béton pose un problème majeur, car sa production repose sur le ciment, un matériau très polluant. En effet, la fabrication d'une tonne de ciment émet environ 400 kg de CO₂.

Pour répondre à ces préoccupations environnementales, il est essentiel de choisir judicieusement les matériaux afin de minimiser leur impact sur l'environnement tout en assurant un milieu intérieur confortable. Ce choix doit tenir compte de plusieurs critères : (i) l'économie énergétique et financière, (ii) l'esthétique et (iii) l'impact environnemental ⁷.



Figure 1.8 : Phases d'analyse de cycle de vie des bâtiments ⁷.

La thématique des matériaux et de l'écologie conduit à discuter des écomatériaux. Ces matériaux, essentiels à la construction écologique, répondent aux critères techniques habituels

requis pour les matériaux de construction, tels que le confort et la sécurité sanitaire, tout en respectant des critères environnementaux stricts. Le matériau de construction a-t-il un impact sur la santé des habitants ? Diverses études ont montré que la qualité de l'air intérieur peut être affectée par des substances nocives émises par certains matériaux de construction. En revanche, les écomatériaux sont souvent plus sains et durables, n'ayant pas d'impact négatif sur la santé des occupants tout au long de leur durée de vie ⁷ (Figure 1.9) .

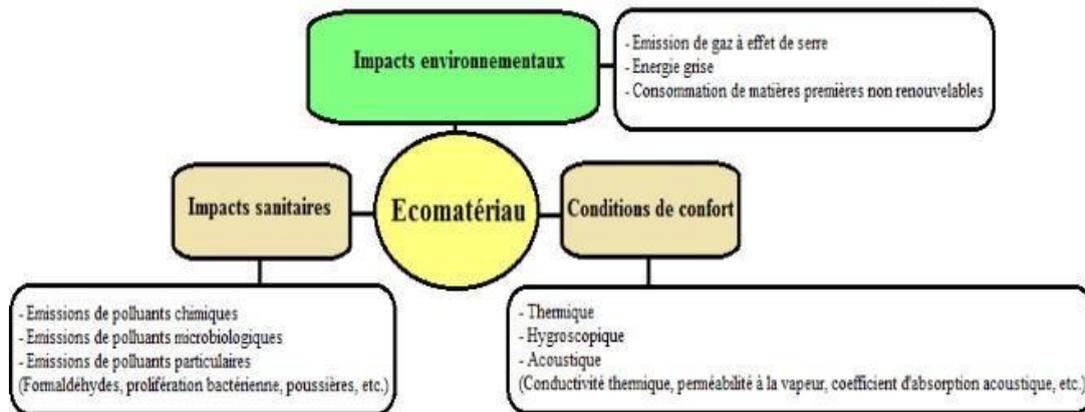


Figure 1.9 : Propriétés caractéristiques d'un éco matériau ⁷ .

Chapitre 2

Matériaux de construction

Chapitre 2

Matériaux de construction

2.1 Introduction

Dans le vaste domaine de la construction, le choix des matériaux de liaison revêt une importance capitale, non seulement pour assurer la solidité et la durabilité des structures, mais également pour réduire l'empreinte environnementale de l'industrie du bâtiment. Parmi les matériaux les plus étudiés et utilisés figurent les liants tels que la poudre de verre, la cendre volante et le ciment, ainsi que les adjuvants et les fibres végétales issues de sources naturelles comme les feuilles de maïs et les coquilles d'œuf. Ces matériaux offrent une diversité d'avantages, allant de leurs propriétés mécaniques améliorées à leur contribution à une construction plus écologique et durable.

2.2 Les liants utilisés dans la construction

2.2.1 Le ciment

Le ciment est un matériau qui lie ensemble des agrégats solides en durcissant à partir d'un état plastique. Il forme une pâte plastique lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, laquelle se solidifie progressivement en développant une rigidité et une résistance à la compression grâce à une réaction chimique avec l'eau, appelée hydratation. Les ciments hydrauliques maintiennent leur résistance même lorsqu'ils sont immergés dans l'eau après avoir pris. La norme européenne EN 197-1 établit les composants des ciments, les types courants, les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico-chimiques, ainsi que les critères de conformité et les fréquences d'essais. Cette norme spécifie cinq types de ciments couramment utilisés, avec un accent particulier sur le type I (CEM I), connu sous le nom de ciment Portland. Selon cette norme, le ciment Portland est principalement composé d'un noyau constitué de 94 à 95 % de clinker Portland et d'environ 5 à 6 % de gypse, nécessaire pour atteindre la teneur en SO_3 requise ¹.

2.2.1.a Matières premières

Les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment Portland sont extraites de roches naturelles telles que le calcaire, la marne et l'argile, qui sont des sources primaires des éléments chimiques essentiels comme le calcium (Ca), le silicium (Si), l'aluminium (Al) et le fer (Fe). Ces éléments sont indispensables à la formation des silicates et aluminates constituant le clinker, élément central du ciment.

Pour obtenir la composition idéale, un mélange contenant généralement environ 80 % de calcaire et 20 % d'argiles est utilisé, complété par des ajustements tels que l'ajout de minerai de fer pour le Fe_2O_3 , de bauxite pour l' Al_2O_3 et de sable pour le SiO_2 . Ces ajouts visent à atteindre les proportions souhaitées.

Afin de garantir une qualité constante des ciments produits, il est impératif de prélever, doser et mélanger avec précision les matières premières, assurant ainsi une composition uniforme. Cependant, cette composition peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité des gisements exploités ¹.

- **Le calcaire** : Le calcaire (CaCO_3) est formé par le processus d'extraction du calcium (Ca) des roches primitives, suivi de sa combinaison avec le dioxyde de carbone de l'air (CO_2). Il se dépose ensuite dans les océans. Lorsqu'il atteint la surface à la suite de phénomènes tectoniques, le calcaire se fragmente, se dissout et parfois se dépose sous différentes formes en raison des forces naturelles. Pour l'humanité, le calcaire a toujours été une ressource polyvalente : il a servi d'abris dans les grottes, a été utilisé comme matériau de construction, y compris pour la production de chaux et de ciments, et a surtout été une source d'inspiration artistique, notamment pour l'art pariétal, la sculpture, la lithographie et les décors en marbre. Les civilisations associées au calcaire diffèrent de celles liées au granite ou à la latérite ².
- **L'argile** : Après le calcaire, l'argile est considérée comme la deuxième matière première la plus cruciale dans la production du ciment Portland. Les argiles se classent en divers groupes minéraux distincts.
 - Groupe des Kaolins ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

- Groupe de montmorillonites ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$).
- Groupe des argiles contenant des alcalins ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$).
- L'illite . $[\text{K}_2\text{O}, \text{H}_2\text{O}]_3 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$
- Le chlorite. $10[\text{Mg}, \text{Fe}] \text{O} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

La silice libre, souvent sous forme de quartz, peut également jouer un rôle majeur . Les alcalis proviennent en partie des cations échangeables dans les argiles, mais principalement des micas et des feldspaths présents. D'autres composants mineurs courants incluent la calcite, la pyrite de fer, le gypse et la matière organique.

La densité de l'argile varie généralement de 2 à 2,2. L'hydroxyde de fer est souvent un composant secondaire de l'argile, contribuant à sa coloration. L'argile pure est généralement blanche ¹ .

- **La marne** : La marne contient du calcaire, de la silice, des substances argileuses et de l'oxyde de fer dans sa composition. Sa teinte varie du jaune au gris noir selon les proportions relatives de ces composés carbonatés et argileux ³ .

2.2.1.b Les composants principaux

Ce sont les éléments essentiels (Ca, Si, Al, Fe) qui participent à la formation des principales phases minérales du clinker ³ .

- **La silice** : La silice, forme naturelle du dioxyde de silicium (SiO_2), est une substance extrêmement polymorphe, présentant plusieurs variétés telles que le quartz, la tridymite, la cristobalite, la silice vitreuse et la silice à haute densité obtenue sous pression naturelle. On trouve dans la nature trois variétés cristallisées : le quartz, la tridymite et la cristobalite, ainsi que la silice vitreuse (fulgurite) ¹ .
- **L'alumine** : L'alumine, également connue sous le nom d'oxyde d'aluminium avec la formule Al_2O_3 , est l'un des oxydes métalliques les plus présents dans la croûte terrestre après la silice. Elle se trouve généralement sous forme hydratée dans un minerai naturel appelé la bauxite. Il existe plusieurs variantes d'alumine, avec des degrés d'hydratation variables.
 - La bayerite, polymorphe de la gibbsite, de structure monoclinique, hydroxyde de

- Composition α -Al(OH)₃ La boehmite de structure orthorhombique, hydroxyde de composition γ -AlOOH
- Le corindon de structure hexagonale, oxyde de formule α -Al₂O₃.

Lors de la déshydratation, des phases métastables se forment, caractérisées par une cristallinité réduite et une structure presque cubique, souvent désignées par différentes lettres de l'alphabet grec telles que ε , γ , δ , θ . Cependant, au-dessus de 1 000 °C, toutes ces phases se transforment en oxyde α -Al₂O₃, également connu sous le nom de corindon³.

- **L'oxyde de fer** : Trois variantes de ces entités se distinguent par la différence dans la quantité d'oxygène liée aux atomes de fer.
 - le protoxyde fer (FeO) , est métastable à la température ordinaire ; au-dessous de 570°C il se décompose suivant la réaction $4 \text{FeO} \longrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_4 + \text{Fe}$
 - Le sesquioxyde de fer (Fe₂O₃) se présente sous deux structures distinctes : une forme rhomboédrique stable et une forme cubique instable à température ambiante, qui se transforme rapidement en sesquioxyde rhomboédrique aux alentours de 400 °C.
 - l'oxyde magnétique ou oxyde salin de fer , Fe₃O₄ (Fe₂O₃.FeO) , est l'oxyde le plus stable résultant de la combinaison des deux autres ; c'est la magnétite naturelle (Lafuma, 1962)³.
- **La chaux** : La chaux, aussi appelée oxyde de calcium (CaO), est produite par la décomposition thermique du calcaire, une roche abondante en carbonate de calcium (CaCO₃), à une température d'environ 900 °C. Cette réaction se déroule comme suit : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ¹.

2.2.1.c Composants secondaires

Ces composants sont soumis à des limites fixées par les normes en vigueur ou par des données expérimentales¹.

- **L'oxyde de Magnésium (MgO)** : environ 2 % de magnésie se trouve liée aux principales phases du clinker et est présente sous forme de périclase. Le périclase réagit lentement avec l'eau pour former de l'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)₂)³.

- **Les Alcalis (Le K_2O et le Na_2O)** : Lors de la fabrication du ciment, les matières premières, y compris les argiles et les marnes, sont mélangées. Pendant la cuisson dans les fours rotatifs, une partie des alcalis s'évapore dans la zone de clinkérisation, entraînant une circulation d'alcalins, comme décrit par Kedjour en 2003 ³ .
- **Le soufre** : Dans le processus de fabrication du ciment, le soufre est présent à l'état combiné dans tous les mélanges de matières premières, par exemple sous forme de sulfure de fer (FeS_2), ainsi que dans les combustibles utilisés. Au sein de la zone de cuisson, le soufre se convertit en dioxyde de soufre (SO_2) gazeux, qui, en réagissant avec les alcalis volatilés et l'oxygène, forme des vapeurs de sulfates de métaux alcalins. Ces sulfates se condensent dans la zone de préchauffage et retournent dans la zone de cuisson. Tout excès de SO_2 dans la zone de préchauffage réagit avec le carbonate de calcium ($CaCO_3$) pour former du sulfate de calcium ($CaSO_4$). Dans la zone de cuisson, le $CaSO_4$ se décompose, augmentant ainsi la concentration de SO_2 dans les gaz de circulation, selon les observations de Lafuma en 1962 ³ .
- **Les chlorures (Cl)** : Les mélanges de matières premières contiennent généralement entre 0,01 et 0,1 % de chlorures (Cl), parfois même jusqu'à 0,3 % dans des cas exceptionnels. Dans les fours, les chlorures réagissent avec les alcalis pour former des chlorures de métaux alcalins, qui sont transportés par les gaz et se déposent dans la zone de préchauffage avant de retourner dans la zone de cuisson. Cette circulation continue entre les deux zones peut entraîner l'arrêt du four. Les chlorures peuvent causer la corrosion de l'acier, ce qui représente un risque pour les armatures du béton, comme l'explique Kedjour en 2003 ¹ .
- **Les phosphorus (P_2O_5)** : Dans la plupart des matières premières utilisées pour le cru, la concentration en phosphore est très basse, généralement inférieure à 0,25 % de P_2O_5 . Cependant, une teneur dépassant 0,5 % en P_2O_5 peut entraîner une diminution de la résistance initiale du ciment, comme le souligne Kedjour en 2003 ³ .

2.2.1.d Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments sont catégorisés en cinq (5) types principaux selon les normes NF P-301 et ENV 197-1 (EN 197-1 ; 2000). Ils sont désignés par l'abréviation CEM suivie d'un chiffre romain de I à V dans le système de notation européen. Les proportions (en masse) des divers constituants sont spécifiées dans le tableau ci-dessous ⁴.

Tableau 2.1 : Différents types de ciment avec leurs compositions correspondants ⁵.

Ciment % en masse	Notation	K	S	D	Z	Cendres volantes		T	L	C.S
						V	W			
						Portland	CPA-CEM I			
Portland compose	CPJ-CEM II/A	80-94	6-20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21-35							
De haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0-5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0-5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0-5
Pouzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10-35			-	-	-	0-5
	CPZ-CEM IV/B	45-64	-	36-55			-	-	-	0-5
Au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	0-5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	0-5

2.2.2 Les cendres

Les cendres volantes sont des fines poudres principalement composées de particules vitreuses, généralement sphériques, résultant de la combustion du charbon pulvérisé, avec ou sans addition de combustibles supplémentaires. Elles possèdent des propriétés pouzzolaniques et sont principalement constituées de SiO_2 et d' Al_2O_3 , avec au moins 25 % de la masse composée de SiO_2 réactif. Les cendres volantes qui répondent à la norme NF EN 450 sont classées comme des additions de type II selon la norme EN 206-1, et peuvent être utilisées en remplacement du ciment conformément aux directives et conditions de cette norme ⁶.

2.2.2.a Les propriétés des cendres

Les caractéristiques des cendres volantes sont également influencées par le type de charbon utilisé comme combustible, qui se décline principalement en quatre types (voir Tab, les cendres volantes proviennent principalement de la combustion de houille (charbon bitumineux et subbitumineux). En effet, l'antracite et le lignite ne sont plus couramment utilisés dans les centrales thermiques, l'antracite étant trop coûteux et le lignite de qualité inférieure. La composition de la houille comprend généralement entre 72 et 90 % de carbone, avec d'autres éléments principaux tels que l'oxygène (environ 10 %) et l'hydrogène (environ 5 %). Ces éléments se trouvent principalement sous forme d'eau dite de constitution, représentant moins de 10 %, ainsi que sous forme de matière volatile (gaz adsorbés et piégés pendant la formation du charbon), tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et des traces de soufre et d'azote. La houille contient également une fraction de minéraux provenant des roches sédimentaires formées en même temps que la matière organique, ce qui explique la présence d'éléments majeurs tels que Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, P, F, Cl, ainsi que d'éléments mineurs comme Ba, Sb, Mo, Se, As, Hg, Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, Cr, présents à des concentrations de l'ordre du mg/kg⁷.

Tableau 2.2 : Teneur en carbone et âge de formation.

Type de charbon	Age approximatif (années)
Lignite	60 000 000
Charbon subbitumineux	100 000 000
Charbon bitumineux	300 000 000
Antracite	350 000 000

2.2.2.b Utilisation des cendres

Les cendres volantes sont largement employées dans diverses applications, tant seules que mélangées à d'autres composants. Elles peuvent être intégrées à la formulation de ciments, de liants hydrauliques routiers et de bétons. De plus, elles sont utilisées dans de nombreux produits brevetés à des fins variées, telles que le remblayage de tranchées avec des produits autocompactants, le remplissage de cavités et la fabrication de produits autonivelants⁷.

2.2.3 La poudre de verre

La poudre de verre blanche est un additif alimentaire alternatif qui résulte du broyage des morceaux de verre teinté. Grâce à sa concentration élevée en silice amorphe SiO_2 , elle présente des propriétés pouzzolaniques lorsqu'elle réagit avec la chaux, favorisant la formation d'autres hydrates⁸.

2.2.3.a Propriétés du verre

Les principales propriétés physiques du verre sont citées ci-dessous⁹ :

- **Transparence** : Le verre est connu pour sa transparence, mais il peut également présenter des niveaux d'opacité ou d'opalescence variables.
- **Dureté** : Les matériaux capables de rayer le verre ont une dureté supérieure à 6,5 sur l'échelle de Mohs (comme le quartz, le corindon ou le diamant). Le verre de Bohême est considéré comme le plus dur, tandis que le cristal est plus tendre. Sur l'échelle de Mohs, les différents types de verre se situent entre 4,5 et 7.
- **Densité** : La densité du verre varie en fonction de ses composants, mais elle est généralement d'environ 2,5. Cela signifie qu'un mètre cube de verre pèse environ deux tonnes et demie, ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg.
- **Résistance et élasticité** : La résistance du verre à la rupture dépend de sa flexibilité et de sa capacité à résister aux chocs. En revanche, sa résistance à la compression est significative : il faut une pression d'environ 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.
- **Imperméabilité** : Le verre présente une grande imperméabilité, mais il peut rester poreux à certains liquides tels que le kérosène, ce qui entraîne une légère évaporation, souvent décrite comme une transpiration du verre⁹.

Les principales propriétés thermiques du verre sont⁹ :

- **Dilatation** : Le verre est un isolant thermique efficace en raison de sa faible conductivité thermique. Cependant, il est sensible aux brusques changements de température, ce qui peut entraîner des ruptures car ses différentes parties se réchauffent à des rythmes différents. Son coefficient de dilatation est bas, ce qui le

rend idéal pour des applications telles que l'isolation thermique, comme dans la laine de verre. Il présente des coefficients de dilatation similaires à certains métaux, ce qui permet des soudures verre-métal. Ce coefficient varie en fonction de sa composition.

- **Conductivité** : Le verre est un mauvais conducteur de chaleur, environ 500 fois moins conducteur que le cuivre, ce qui en fait un isolant électrique efficace. Son isolation acoustique est également bonne, en fonction de l'épaisseur du matériau. Cependant, sa conductivité électrique augmente à des températures élevées, à partir d'environ 250°C.
- **Inflammabilité** : Le verre est ininflammable et incombustible.

Les pourcentages de composition de verre et les types de verres avec ses principales utilisations sont classés dans les **tableaux 2.3** et **2.4** respectivement. Tandis que les principales propriétés chimiques sont les suivants :

- **Action de l'eau** : L'eau agit sur les silicates du verre, provoquant leur décomposition et formant un dépôt en surface qui peut rendre le verre progressivement opaque, réduisant ainsi sa transparence.
- **Action de l'air** : Les silicates alcalins du verre réagissent avec le dioxyde de carbone contenu dans l'air, formant un dépôt blanchâtre à la surface du verre.
- **Action de la lumière** : Certains types de verre peuvent changer de couleur ou devenir décolorés lorsqu'ils sont exposés aux ultraviolets.
- **Action des acides** : Les acides peuvent décomposer la silice du verre. Par exemple, l'acide fluorhydrique peut graver profondément le verre plaqué, le dissolvant partiellement⁹.

Tableau 2.3 : Pourcentage de composants en verre .

	particuliers	proportion
1	Dioxyde de silicium (SiO ₂)	66.56%
2	Oxyde d' aluminium (Al ₂ O ₃)	01.02%
3	Oxyde de potassium (K ₂ O)	01.06%
4	Oxyde de calcium (CaO)	11.50%
5	L' oxyde de magnésium (MgO)	03.02 %
6	Oxyde de sodium (Na ₂ O)	12.32%
7	Trioxyde de bore (B ₂ O ₃)	02.45%

Tableau 2.4 : les types de verre et ses principales utilisations .

Type de verre	Principaux produits
Verre Sodocalcique	Bouteille Vaisselle Verre plat
Verre à base du plomb	Vaisselle en cristal les écrans de télévision et les équipement à écran de visualisation
Verre en borosilicate	fibers de verre isolation en laine plats pour les fours
Verre technique par exemple : Aluminosilicate , Alkali barium	Scientifique Optique

2.3 Les Adjuvants

2.3.1 Définition

L'adjuvant désigne tout ingrédient ajouté au mélange à l'exception du ciment, des granulats et de l'eau. Il s'agit généralement de polymères de synthèse ayant un poids moléculaire relativement élevé, situé entre 20 000 et 30 000 .

Les adjuvants pour béton sont des substances chimiques qui se dissolvent dans l'eau et agissent principalement sur :

- Les solubilités
- Les taux de dissolution
- L'hydratation des différents composants d'un liant hydraulique ¹⁰ .



Figure 2.1 : Adjuvants liquides de gauche à droite : agent anti-lessivage, réducteur de retrait, réducteur d'eau, agent moussant, inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air ¹¹ .

2.3.2 Fonction principale et secondaire

Chaque adjuvant est défini par sa fonction principale, qui correspond aux changements majeurs qu'il induit dans les caractéristiques des bétons, mortiers ou coulis, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Cette efficacité peut varier en fonction de la quantité utilisée et des composants du mélange, notamment le ciment, le sable et les fines.

Les performances des adjuvants, ainsi que les plages de dosage recommandées pour répondre aux exigences standards, sont spécifiées dans les documents techniques fournis par les fabricants. L'évaluation de la performance d'un adjuvant se fait en fonction de sa capacité à remplir sa fonction principale sans causer d'effets secondaires indésirables.

En plus de leur fonction principale, les adjuvants peuvent souvent avoir une ou plusieurs fonctions secondaires, qui peuvent être indépendantes de la première. Par exemple, certains plastifiants peuvent aussi accélérer le durcissement.

En combinant différents adjuvants, on peut obtenir des effets cumulatifs recherchés. Toutefois, l'effet de chaque adjuvant dépend de sa quantité utilisée. Il est donc crucial, lors de leur utilisation, de réaliser des essais représentatifs des conditions de chantier pour garantir leur efficacité.

L'utilisation d'adjuvants dans la production de béton pour des structures doit se conformer à la norme NF EN 206/CN. Leur usage ne doit pas altérer les propriétés mécaniques, physiques ou chimiques du matériau, ni compromettre l'adhérence des armatures au béton.

Les adjuvants jouent un rôle croissant dans la technologie du béton, notamment avec l'avènement de nouvelles générations d'adjuvants. Leurs mécanismes d'action sont complexes et dépendent de plusieurs facteurs tels que le dosage, le type de ciment, l'ordre d'ajout dans le mélangeur et les conditions climatiques lors de la mise en œuvre ¹².

2.3.3 Classification Selon la Norme NF EN 934 - 2

Les adjuvants destinés au béton, au mortier et aux coulis sont généralement regroupés en trois principales catégories ¹³.

- Adjuvants modifiant l'ouvrabilité et la rhéologie du béton
Plastifiant / Réducteur d'eau
Super plastifiant / Haut réducteur d'eau
- Adjuvants modifiant la prise et le durcissement
Accélérateur de prise
Accélérateur de durcissement
Retardateur de pris
- Adjuvants modifiant des propriétés particuliers
Entraîneur d'air
Hydrofuges de masse
Rétenteur d'eau ¹³.

2.4 Les fibres végétales

2.4.1 Historique des fibres végétales

Les études archéologiques ont révélé les plus anciens vestiges de textiles à base de fibres végétales, datant de la seconde moitié du Ve millénaire avant J.-C., provenant de stations lacustres. Les premières indications de culture, notamment du lin, remontent au VIIIe millénaire avant J.-C. Bien que les méthodes de transformation et d'extraction des matières textiles de cette époque demeurent largement méconnues, des sources anciennes ont permis d'identifier les espèces utilisées à l'époque néolithique. Des plantes surprenantes étaient alors employées, telles que le tilleul, le chêne ou le saule pour le tissage, tandis que la ronce ou le chèvrefeuille servaient à la confection de ligatures. Seuls le lin et partiellement l'ortie (jusqu'au XXe siècle) ont survécu dans les pratiques de tissage jusqu'à aujourd'hui. L'utilisation industrielle des fibres végétales a débuté au début du XXe siècle avec la fabrication des premiers composites pour l'aéronautique, dans le but de réduire le poids des avions au maximum. En 1890, Clément Ader a utilisé des composites naturels dans la construction de son premier avion, l'Éole. Cependant, l'avènement des fibres synthétiques a largement relégué les fibres naturelles à l'arrière-plan dans l'industrie. À ce jour, des préoccupations économiques et écologiques ont ravivé l'intérêt pour l'utilisation des fibres naturelles ¹⁴.

La montée en puissance de l'utilisation des fibres naturelles, en particulier celles provenant des végétaux, est actuellement remarquable. Ces fibres présentent deux avantages majeurs :

- Leur disponibilité étendue à un coût raisonnable ouvre des opportunités dans le secteur de la construction, permettant ainsi de valoriser les déchets agricoles.
- L'emploi de ces fibres naturelles réduit les impacts environnementaux par rapport aux composites conventionnels. En effet, elles proviennent de matières premières renouvelables et biodégradables, nécessitant peu d'énergie pour leur production.

Une fibre végétale se compose essentiellement de cellulose, d'hémicellulose, de lignine, ainsi que d'autres éléments tels que les pectines et la cire ¹⁵.

Illustration des différentes configurations que peut adopter une fibre végétale :

- Elle peut être présente de manière isolée, se présentant alors comme une cellule élémentaire fibreuse.
- Ou elle peut être regroupée avec d'autres fibres pour former un faisceau, où elles sont liées ensemble par des pectines et des hémicelluloses ¹⁶.

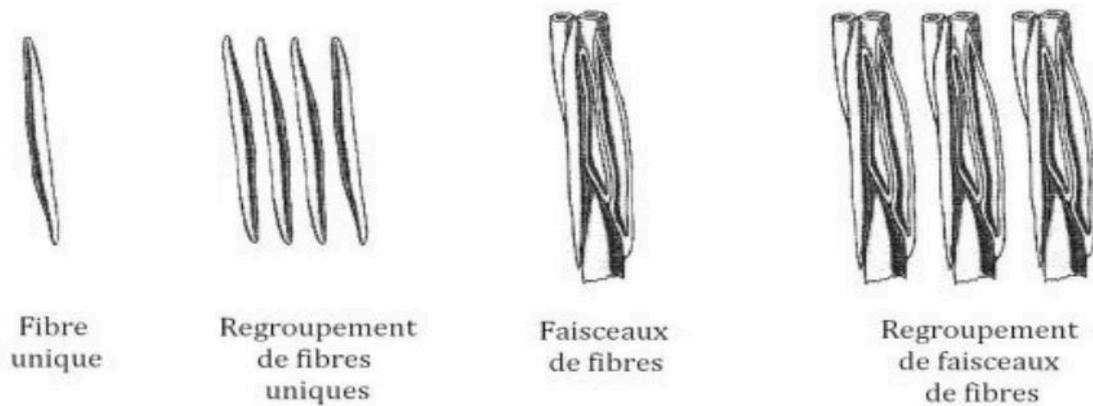


Figure 2.2 : Différentes formes de fibres végétales.

Le recours croissant aux fibres naturelles, malgré leurs propriétés mécaniques généralement moins robustes que celles des fibres inorganiques traditionnelles comme le verre ou le carbone, présente plusieurs avantages incontestables, notamment en termes de coût. Toutefois, du fait de leur origine naturelle, ces fibres sont sujettes à une variabilité importante de leurs propriétés, même au sein d'une même espèce.

Dans le domaine de la construction, l'essor de l'utilisation des fibres naturelles vise à substituer les matériaux isolants conventionnels par des alternatives naturelles. Ces fibres sont employées individuellement ou en association avec d'autres matériaux pour élaborer des produits de construction, tant pour les travaux de gros œuvre que pour les finitions, offrant ainsi une meilleure isolation thermique ¹⁷

2.4.2 Feuilles de maïs

Les feuilles de maïs, larges et robustes, sont les parties vertes de la plante de maïs, une culture omniprésente dans de nombreuses régions du monde, est exploitée de diverses manières, y compris dans le domaine de la construction en tant que liant naturel. Transformées en fibres ou en pâte, elles peuvent être intégrées dans des matériaux de construction écologiques tels que les matériaux composites. En tant que liant, les feuilles de maïs contribuent à renforcer la structure des matériaux tout en offrant des avantages environnementaux, étant renouvelables et biodégradables. Cette utilisation novatrice dans le

domaine de la construction met en lumière les possibilités de réduire l'empreinte carbone de l'industrie du bâtiment tout en favorisant l'utilisation de ressources naturelles durables ¹⁸ .



Figure 2.3 : feuilles de maïs séché

2.4.3 La coquille d'œuf

La coquille d'œuf est la partie dure qui protège l'œuf. Elle est principalement composée de carbonate de calcium, ce qui lui donne sa solidité. La coquille d'œuf, une fois nettoyée et broyée en poudre fine, peut être utilisée dans une variété d'applications, y compris dans le domaine de la construction. En effet, la composition principale de la coquille d'œuf est du carbonate de calcium, qui est un minéral couramment utilisé comme agrégat dans la fabrication de béton. En mélangeant de la poudre de coquille d'œuf avec du ciment et d'autres matériaux de construction, on peut créer un béton plus léger et plus résistant. De plus, la coquille d'œuf peut être utilisée comme additif pour améliorer la résistance et la durabilité du béton, réduisant ainsi la quantité de ciment nécessaire et offrant une solution écologique en valorisant les déchets alimentaires. Cette utilisation ingénieuse illustre comment les ressources naturelles peuvent être réutilisées de manière créative dans des applications industrielles, contribuant ainsi à réduire les déchets et à promouvoir la durabilité environnementale ¹⁹ .



Figure 2.4 : La coquille d'œuf.

2.4.4 Absorption d'eau dans les fibres

L'étude des fibres végétales suscite un vif intérêt en raison de leur diversité de propriétés, notamment leur capacité à absorber l'eau. Parmi ces fibres, les feuilles de maïs et les coquilles d'œuf se distinguent par leur composition chimique et leur structure microscopique. L'absorption d'eau dans les fibres végétales revêt une importance capitale pour les matériaux de construction durables. Une absorption excessive peut précipiter la dégradation prématurée des matériaux, tandis qu'une capacité d'absorption maîtrisée peut renforcer leur résistance aux intempéries et prolonger leur durée de vie. Ainsi, comprendre et maîtriser ce processus d'absorption dans ces fibres naturelles revêt une importance cruciale pour le développement de matériaux de construction durables et résilients.

Dans le but de comparer les propriétés d'absorption d'eau de différentes fibres végétales, Ghavami et al. (1999) ont identifié trois mesures essentielles :

- L'humidité naturelle des fibres (H_f), exprimée en pourcentage, est calculée comme suit :

$$H_f = (P_d - P_o) / P_o \times 100\% \quad (2.1)$$

Où P_d représente le poids des fibres séchées à l'air pendant 5 jours et P_o est le poids des fibres séchées à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

- Le poids spécifique (γ), exprimé en kN/m^3 , est calculé par la formule :

$$\gamma = P / V_f \dots \quad (2.2)$$

Où V_f est le volume des fibres, correspondant au volume d'eau déplacé après immersion des fibres dans l'eau pendant 24 heures, et P est le poids des fibres.

- La capacité d'absorption d'eau (W_f), exprimée en pourcentage, des fibres séchées à l'air est déterminée par :

$$W_f = (P_h - P) / P \times 100\% \quad (2.3)$$

Où P_h représente le poids des fibres immergées dans l'eau.

Ces mesures permettent une comparaison précise des propriétés d'absorption d'eau des différentes fibres végétales étudiées ²⁰.

Chapitre 3

Etude expérimentale

Chapitre 3

Etude expérimentale

3.1 Introduction

Cette section décrit l'étude expérimentale menée dans le cadre de ce travail. Nous commençons par présenter les différents matériaux utilisés, ainsi que le plan expérimental mis en place pour analyser l'impact de l'incorporation de poudre de coquille d'œuf, les cendres, la poudre de verre et poudre de feuilles de maïs sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du mortier.

Les expérimentations ont été réalisées en collaboration avec les laboratoires pédagogiques du département de Génie des procédés, PTEMF et le laboratoire de GICA Chelghoume laid.

Tous les essais ont été menés selon des protocoles conformes aux normes en vigueur.

3.2 Matériaux utilisés

Les différents matériaux utilisés :

- Un ciment de type CEM II/A-L 42.5 N.
- Les coquilles d'œufs le verre.
- les cendres.
- les feuilles de maïs.
- les déchets de bâtiments tels que le brique, céramique, plâtre, carrelage, résidus de carrière, tuiles



Figure 3.1 : Différents matériaux utilisés.

3.2.1 Ciment

Pour la confection des mortiers d'étude, nous avons utilisé un ciment Portland composé CEM II/A-L 42.5 N, provenant de la cimenterie GICA implantée dans la Wilaya de Constantine.

Les différentes caractéristiques du ciment utilisé sont indiquées sur la fiche technique élaborée par le producteur au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément à la norme NA 442, dont la composition chimique moyenne et les propriétés physiques sont présentées dans les **Tableaux 3.1** et **3.2** respectivement.



Figure 3.2 : Ciment Portland.

Tableau 3.1: Composition chimique moyenne du ciment CEM II/A-L 4205 N utilisé.

Composants	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Cl	SO ₃	P.A.F
Pourcentage (%)	58.6	24.92	1.21	6.58	3.65	0.08	0.00	2.17	1.70

Tableau 3.2 : Propriétés physiques du ciment utilisé .

Propriétés	Unité	Valeur
Masse volumique apparente	g/cm ³	1.09
Masse volumique absolue	g/cm ³	2.92
Surface spécifique de Blaine	cm ² /g	3550

3.2.2 Les coquilles d'œufs

La poudre de coquilles d'œufs est riche en carbonate de calcium (CaCO_3), ce qui peut contribuer à augmenter la résistance à la compression, la durabilité et d'autres propriétés mécaniques et la méthode de préparation est simple, les étapes suivantes sont spécifiques pour garantir la sécurité et l'efficacité du produit final :

- **Collecte et nettoyage des coquilles d'œufs**

- Rassemblement des coquilles d'œufs utilisées suivi d'un rinçage avec de l'eau tiède pour éliminer toute trace de blanc ou de jaune d'œuf.
- Séchage à l'air libre .



Figure 3.3 : Les coquilles d'œufs.

- **Stérilisation**

- Pour éliminer toute bactérie potentielle, les coquilles d'œufs sont chauffées dans un four à environ 100-120°C pendant 15 minutes.
- Refroidissement en milieu ambiant.

- **Broyage**

- Un mixeur ou un moulin à café peuvent remplacer le broyeur.
- Broyez les coquilles jusqu'à obtenir une poudre fine homogène.



Figure 3.4 : Moulin à café.

- **Tamisage**

Le tamisage des coquilles d'œufs après les avoir broyées en poudre est une étape cruciale pour garantir l'homogénéité et la qualité du produit final. Un tamis de 0.355 mm a été utilisé pour séparer les particules les plus grosses et les broyer à nouveau.

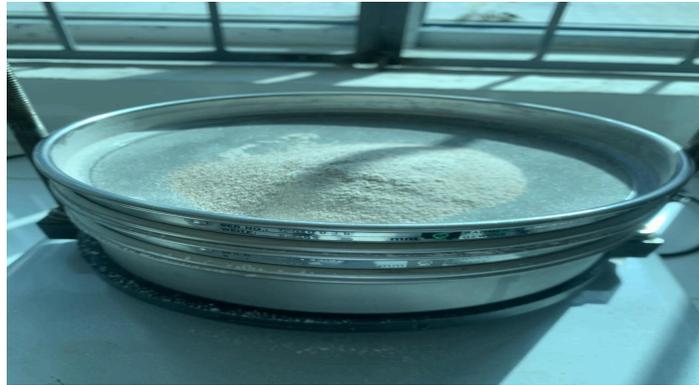


Figure 3.5 : Le tamisage des coquilles d'œufs.

- **Stockage**

- La poudre de coquilles d'œufs a été transférée dans un récipient hermétique pour éviter toute contamination et l'humidité.
- Étiquetez le récipient avec la date de préparation.



Figure 3.6 : Poudre de coquilles d'œufs.

3.2.3 La poudre de verre

La poudre de verre est obtenue en broyant à une certaine finesse le verre récupéré (**Figure 3.7**). Lorsqu'il est incorporé au notre mélange en remplacement d'une portion de ciment, le verre ainsi réduit en poussière se lie avec les éléments de chaux en vertu de ses propriétés pouzzolaniques.

La préparation de la poudre de verre peut être réalisée pour diverses applications, telles que la fabrication de matériaux composites, la création d'œuvres d'art ou le recyclage.



Figure 3.7 : la poudre de verre.

Le processus détaillé de la préparation de la poudre de vert est décrit comme suit :

- **Collecte et Sélection du Verre**
 - Assurer que les déchets de verre soient propres et dépourvus de contaminants tels que les étiquettes, les bouchons ou les résidus alimentaires.
 - Le tri est assuré par la précision du type de verre (clair, coloré, etc.) car les différents types de verre peuvent présenter des propriétés distinctes.

- **Nettoyage du Verre**
 - Lavez le verre pour éliminer toute saleté ou impureté
 - Séchez le verre avant de le broyer afin de prévenir les risques de blocage et les dysfonctionnements de la machine.

- **Concassage**
 - Placez les morceaux de verre dans un sac solide ou un contenant robuste.
 - À l'aide d'un marteau ou d'un pilon, cassez le verre en morceaux plus petits. Un broyeur à glace, un broyeur à café ou un concasseur mécanique peuvent être utilisés.

- **Broyage**

- Transférez les morceaux de verre dans un broyeur High-Speed Multifunction Grinder Cette étape réduit le verre en une poudre fine.
- Le broyage peut prendre un certain temps, selon la finesse de la poudre souhaitée.



Figure 3.8 : Broyeur High-Speed Multifunction Grinder.

- **Tamissage**

- Utilisez un tamis pour séparer les particules de verre en fonction de leur taille. Les particules plus grosses peuvent être renvoyées au broyeur pour un traitement supplémentaire.
- Répétez le tamisage jusqu'à obtenir la finesse désirée.

- **Stockage**

- la poudre de verre dans un contenant hermétique pour éviter toute contamination.
- Étiquetez clairement le contenant avec des informations telles que la date de broyage et le type de verre utilisé.

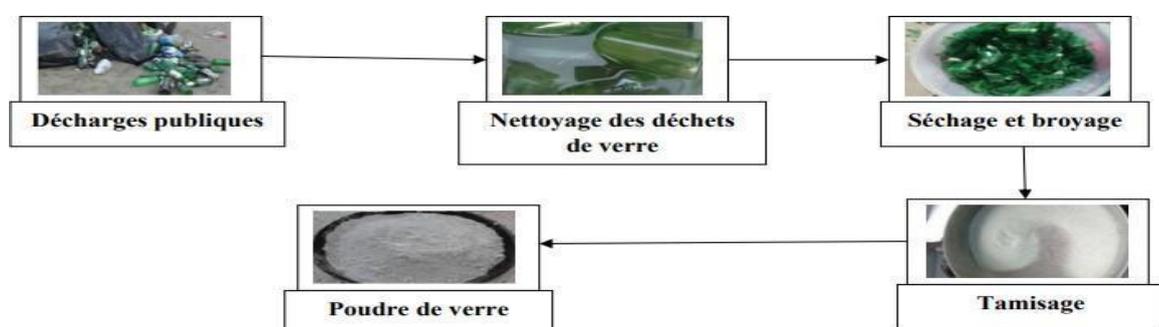


Figure 3.9 : Schéma de préparation de la poudre de verre .

3.2.4 Les cendres

Les cendres, essentiellement alcalines, résultent de la combustion du charbon, de l'incinération ou de la brûlure de divers déchets, que ce soit dans des incinérateurs, en plein air, ou dans des cheminées ou des fours.

Après avoir collectées à la sortie des chaudières, un tri est nécessaire pour distinguer les particules fines des grossières, car leurs propriétés diffèrent et elles sont souvent utilisées dans des domaines spécifiques tels que la construction ou la production de ciment. Ce processus de tri est effectué par tamisage (0,355 mm).

3.2.5 Les feuilles de maïs

Loin d'être de simples déchets, les feuilles de maïs, souvent éliminées après la récolte, recèlent un potentiel insoupçonné en tant que matériau de construction. Abondantes, biodégradables et renouvelables, elles offrent une alternative écologique et prometteuse aux matériaux traditionnels. Leur transformation en un matériau utilisable pour la construction implique un ensemble d'étapes cruciales.

- **La collecte des feuilles de maïs**

Après la récolte du maïs, nous avons procédé à la collecte manuelle des feuilles de maïs. Nous nous sommes assurés de récolter des feuilles saines et fraîches, sans aucun signe de décomposition notable. Un aspect crucial était de garantir une quantité suffisante de feuilles collectées pour répondre aux exigences du projet de construction.



Figure 3.10 : Les feuilles de maïs.

- **Le nettoyage et le tri des feuilles de maïs**

- Tout d'abord, les feuilles de maïs sont inspectées visuellement pour éliminer les impuretés et les débris tels que les morceaux de tiges, les cailloux ou toute autre matière étrangère qui pourrait être mélangée avec les feuilles.
- Ensuite, les feuilles de maïs sont triées pour éliminer celles qui sont endommagées, mal formées ou de mauvaise qualité.
- Enfin, les feuilles de maïs sont lavées avec de l'eau pour éliminer les résidus de saleté et toute autre matière étrangère qui pourrait encore adhérer à leur surface.

- **Le séchage des feuilles de maïs**

Dans cette étape, les feuilles fraîches sont disposées dans un endroit bien aéré où elles sont exposées à l'air libre, pour évaporer progressivement l'humidité, permettant aux feuilles de sécher naturellement. La durée de ce processus varie généralement de plusieurs jours à quelques semaines, selon divers facteurs tels que les conditions météorologiques et l'épaisseur des feuilles.



Figure 3.11 : Feuilles de maïs séchées .

- **Broyage des feuilles de maïs**

Une fois que les feuilles sont parfaitement sèches, elles sont prêtes à être transformées en une fine poudre par un processus de broyage. Cette opération a été effectuée à l'aide d'un moulin à grains traditionnel.

- **Tamissage de la poudre des feuilles de maïs**

Suite au broyage, la poudre de feuilles de maïs est soumise à un tamissage afin de séparer les particules plus grosses et d'assurer une texture uniforme.

- **Stockage de la poudre des feuille de maïs**

Une fois tamisée, la poudre de feuilles de maïs est placée dans des contenants hermétiques afin de garantir sa fraîcheur et sa qualité. Ces contenants doivent être conservés dans un lieu frais, sec et à l'abri de la lumière directe du soleil afin d'éviter toute altération de la poudre.

3.3 Le procédé de valorisation des déchets BTP

La valorisation des déchets du BTP est un enjeu important à la croisée de l'environnement et de l'économie. Ce domaine, générant d'importants volumes de déchets, offre des opportunités de réduction de l'empreinte écologique tout en stimulant de nouvelles filières économiques. Cependant, sa mise en œuvre est confrontée à des défis techniques et à la nécessité d'une collaboration étroite entre les acteurs du secteur et les autorités réglementaires.

3.3.2 Préparation de la poudre de déchet BTP

- **Collecte des déchets du BTP**

Les déchets sont initialement collectés sur les chantiers de construction en cours, les sites de démolition ou les points de dépôt désignés pour les déchets de construction et de démolition (DCD). Cette collecte peut inclure une variété de matériaux indésirables tels que les métaux.



Figure 3.12: Collecte des déchets inertes.

- **Broyage des déchets du BTP**

Les déchets de construction et de démolition (DCD) ont été séparés en deux catégories : les morceaux de bois ont été distincts puis broyés pour produire une fine poudre (BP), tandis que les autres matériaux minéraux notamment des fragments de béton, de briques, de carrelage, céramique composent le déchet inerte (DI).

Le broyage implique souvent l'utilisation d'un broyeur équipé de lames ou de marteaux rotatifs. Ces éléments coupent et pulvérisent les matériaux, les transformant en morceaux plus petits. Ces fragments subissent ensuite plusieurs cycles de broyage, passant à travers des grilles de tailles variées, afin d'atteindre la granulométrie (entre 0 à 500 microns) idéale pour la production de la pâte minérale.



Figure 3.13 : Poudre de bois PB



Figure 3.14 : Poudre de déchet inerte DI.

3.3.3 Formation de la pâte minérale

Après le processus de broyage, les particules obtenues sont combinées avec notre liant et l'eau pour former une pâte minérale. L'ajout d'eau vise à obtenir une texture fluide et uniforme, ce qui facilite son utilisation dans diverses applications. La quantité d'eau utilisée dépend des caractéristiques des déchets broyés et des exigences spécifiques de l'application finale.

Cette étape d'ajout d'eau est cruciale pour établir une liaison efficace entre les particules des déchets du BTP, garantissant ainsi une cohésion et une maniabilité appropriées. Différents

types de déchets, tels que les granulats issus du concassage de béton, les résidus de ciment, les cendres volantes de centrales électriques au charbon ou les poussières de carrière, sont mélangés avec de l'eau pour former une substance manipulable.

Ce processus repose sur des réactions chimiques et physiques entre les déchets et l'eau. L'eau pénètre dans les pores des matériaux et interagit avec les minéraux, favorisant ainsi l'hydratation des particules de ciment, la dissolution des composants solubles, et la création de liaisons chimiques. Ces réactions contribuent à la consolidation et au durcissement de la pâte, lui conférant les propriétés mécaniques nécessaires à son utilisation dans la construction.

Le dosage en eau lors de la formation de la pâte minérale à partir des déchets du BTP est un paramètre essentiel à contrôler. Plusieurs facteurs, tels que la porosité, la granulométrie et la composition chimique des déchets, ainsi que le rapport eau/déchets, doivent être pris en compte pour déterminer la quantité d'eau optimale à ajouter. Ce dosage doit être ajusté avec précision pour garantir la consistance appropriée de la pâte en fonction des exigences spécifiques de l'application finale.

L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des granulés à base de déchets et liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux, par réaction entre les constituants anhydres des liants, mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais ²³.

L'eau joue un double rôle dans la formulation :

- Déclencher l'hydratation du liant (liant _minéral) qui conduit à la prise et au durcissement de notre pâte de déchets par la formation de constituants hydratés qui ont des propriétés liantes.
- Assurer la maniabilité de la pâte pour faciliter sa mise en place .

Le dosage en eau qui se traduit par le rapport (E/M) est un paramètre déterminant vis-à-vis de la porosité, de la résistance et donc de la durabilité des granulats. Plus le rapport E/M est faible, plus ces propriétés sont favorisées. En règle générale le rapport E/M est compris entre 0,4 et 0,6 .

Un rapport E/M trop faible rendrait le mélange trop sec et difficile à mettre en œuvre, tandis qu'un rapport trop élevé augmenterait la porosité et réduirait les performances mécaniques.

En d'autres termes, pour une quantité donnée de farine de déchets, la quantité d'eau à ajouter doit représenter environ 20% de cette masse de farine, afin d'assurer une hydratation adéquate du mélange. Une quantité d'eau trop faible par rapport à la farine de déchets risquerait de compromettre l'hydratation, tandis qu'un excès d'eau pourrait affecter négativement les propriétés du mélange durci ²³.

Il est donc essentiel de respecter ce rapport eau/farine de déchets, soit environ 20%, pour obtenir les caractéristiques souhaitées du mélange, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

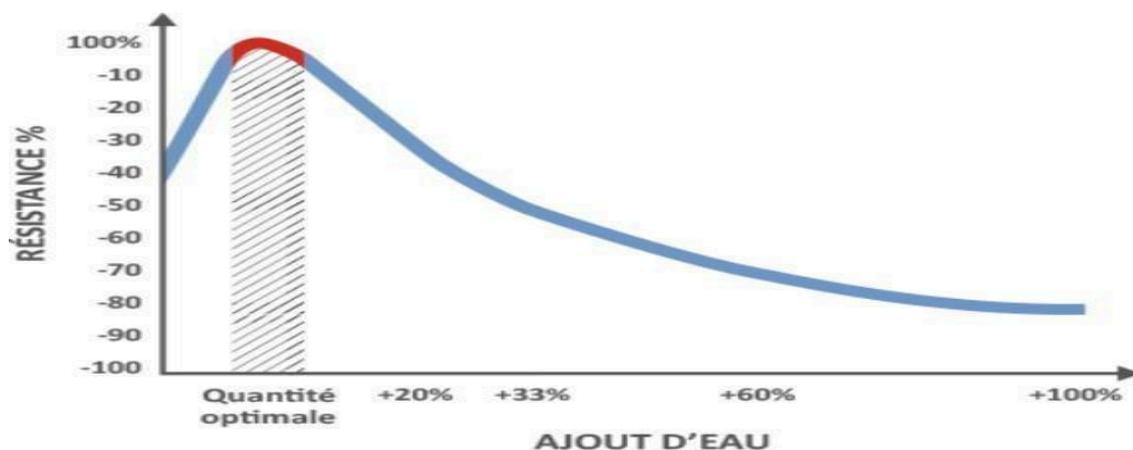


Figure 3.16 : Effet de l'eau ajouté sur la résistance (inférieur à 20%) ²³.

L'incorporation des composants cités ci-dessous à la pâte minérale permet d'améliorer les propriétés et d'étendre leur champ d'application des granulats produits:

- **Cendres : un substitut aux performances remarquables**
 - Leur activité pouzzolanique renforce la résistance mécanique et la durabilité du béton, réduisant sa porosité et son absorption d'eau.
 - Le dosage optimal se situe généralement entre 10 et 30% en masse.
- **Coquilles d'œuf : des atouts insoupçonnés pour la compacité**
 - La poudre des coquilles d'œuf s'intègre à la matrice des granulats recyclés, améliorant leur compacité par un empilement optimisé des particules.

- Résistance mécanique accrue et porosité réduite sont les bénéfices directs.
- Un dosage de 5 à 10% en masse des déchets du BTP est généralement suffisant.
- **Feuilles de maïs : isolation et renfort conjugués**
 - Incorporées broyées, les feuilles de maïs apportent aux granulats recyclés des propriétés d'isolation thermique et phonique appréciables.
 - Leur structure fibreuse renforce également la résistance à la traction du béton.
 - Cependant, un dosage excessif peut pénaliser la résistance à la compression.
 - Un apport de 2 à 3% en masse est généralement optimal.
- **Poudre de verre : un allié polyvalent pour des granulats performants**
 - La poudre de verre peut se substituer partiellement au ciment dans la formulation des granulats.
 - La compacité, la résistance mécanique et la durabilité du béton sont améliorées.
 - Ses propriétés pouzzolaniques renforcent la matrice cimentaire.
 - Un dosage optimal se situe autour de 10 à 20% en masse du liant.

3.3.4 Façonnage

L'étape de façonnage consiste à presser la pâte minérale issue du broyage fin des déchets de construction. Pour ce faire, une presse hydraulique est utilisée. Cette presse exerce une forte pression sur la pâte minérale, ce qui permet de la compacter et de lui donner la forme cylindrique de 4 cm de hauteur, un diamètre de 2 cm et la densité souhaitée pour obtenir des granulats recyclés. Le réglage de la pression, de la durée de compression et de la taille des moules permet d'ajuster finement les caractéristiques géométriques et physiques des granulats produits. Cette étape de façonnage par pressage hydraulique est essentielle pour conférer aux granulats recyclés les propriétés mécaniques requises pour leur utilisation dans de nouveaux matériaux de construction.



Figure 3.17 : Granulats obtenus.

3.4 Méthodes de caractérisation

Il est indispensable pour appréhender un matériau de le caractériser, c'est-à-dire d'en analyser les propriétés. Il existe de nombreuses techniques de caractérisation qui reposent sur différents principes physiques de base : les interactions rayonnement-matière, la thermodynamique et la mécanique ²⁸ .

- La diffraction de rayons X (DRX), pour la caractérisation structurale, l'orientation cristallographique et la détermination de la moyenne des grains.
- La microscopie électronique à balayage (MEB), pour l'étude des états de surface ²⁹ .

Nous présentons les différentes techniques auxquelles nous avons eu recours pour caractériser notre matériau.

3.4.1 Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X offre une méthode cristallographique pour analyser la composition minérale des poudres de différents déchets (DI , coquilles d'œuf,bois...)



Figure 3.18 : Diffractomètre de RX.

3.4.1.a Principe de la méthode

La diffraction des rayons X est une méthode extrêmement efficace pour analyser les solides cristallins. Grâce à cette technique, on peut obtenir des informations sur la structure cristalline (symétrie, paramètres de maille, arrangement atomique), la texture (taille des cristallites, contraintes internes du réseau) et la composition (qualitative et quantitative, en comparant les positions et les intensités des pics de diffraction).

Pour un échantillon sous forme de poudre, où les cristaux sont orientés de manière aléatoire, la condition de diffraction est remplie lorsque certains cristaux ont une orientation permettant au faisceau incident de rayons X d'illuminer un jeu de plans cristallins $\{hkl\}$ sous un angle d'incidence θ satisfaisant l'équation de Bragg. Cela entraîne une réflexion de Bragg. (Figure 3.20):

$$2.d_{hkl} \cdot \sin \theta_{hkl} = n\lambda \quad (3.4)$$

Où n est un entier et d_{hkl} est la distance entre deux plans atomiques $\{hkl\}$ consécutifs, θ_{hkl} est l'angle de Bragg³⁰.

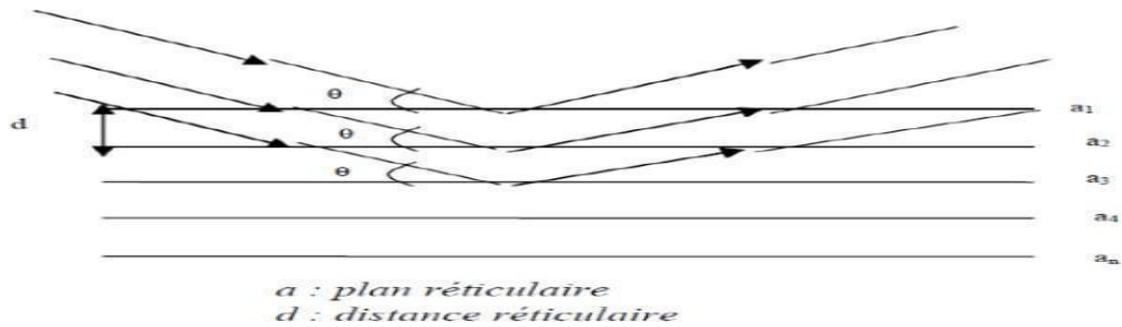


Figure 3.19 : Principe de la loi de Bragg.

3.4.1.b Analyse des spectres de diffraction de rayons X

Dans l'analyse d'un matériau cristallisé, les données de diffraction des rayons X sont cruciales. Elles fournissent trois types d'informations essentielles :

- **La position** : La localisation des pics de diffraction permet d'identifier la phase cristalline présente et de calculer ses paramètres de maille.
- **La forme** : La forme des pics de diffraction donne des indications sur la taille des domaines cristallins cohérents et sur le niveau de défauts de structure dans l'échantillon.
- **L'intensité relative** : En analysant les intensités relatives des pics, on peut déduire la distribution des atomes au sein de la maille cristalline et remonter à la position des différents types d'atomes dans la structure³⁰.

3.4.2 Microscopie électronique à balayage (MEB)

3.4.2.a Principe de la méthode

La microscopie électronique à balayage (MEB), également connue sous le nom de SEM (Scanning Electron Microscopy), est une technique d'imagerie largement utilisée dans divers domaines tels que la physique, la chimie, la biologie et la médecine. Son principal objectif est d'observer divers aspects tels que la morphologie (forme, dimension, arrangement de particules), la topologie de surface (relief, texture), la composition chimique (ratios relatifs d'éléments chimiques) et de fournir des informations cristallographiques précieuses sur la structure atomique.

La principale caractéristique de la MEB est sa capacité à offrir des résolutions très élevées, atteignant jusqu'à quelques nanomètres. En comparaison, un microscope optique est limité par la longueur d'onde de la lumière visible, qui ne peut descendre en dessous de 400 nm.

Le fonctionnement de la MEB repose sur l'émission d'un faisceau d'électrons par une cathode, appelé faisceau incident. Lorsque ces électrons interagissent avec l'échantillon, ils induisent la formation d'électrons secondaires de moindre énergie. Ces électrons secondaires sont ensuite amplifiés, détectés et convertis en un signal électrique.

En résumé, la MEB offre une capacité d'imagerie haute résolution qui permet d'explorer les structures et les compositions des matériaux à une échelle très fine, ce qui en fait un outil précieux pour la recherche et l'analyse dans de nombreux domaines scientifiques. En de plus amples détails :

Un système de bobines agissant comme des lentilles pour les ondes électroniques permet de focaliser le faisceau vers l'échantillon, avec le point de focalisation se déplaçant pour balayer sa surface. L'interaction des électrons incidents avec l'échantillon dépend de leur énergie et du numéro atomique moyen de celui-ci, ce qui détermine la profondeur de pénétration des électrons.

Les interactions entre les électrons incidents et l'échantillon peuvent entraîner l'émission de nouveaux faisceaux d'électrons ou de photons, chacun fournissant des informations spécifiques sur l'échantillon en termes d'énergie, de localisation spatiale et de caractéristiques.

Dans la plupart des microscopes électroniques à balayage, les trois faisceaux principaux détectés sont les électrons secondaires, les électrons rétrodiffusés et les rayons X, nécessitant chacun un détecteur spécifique pour être observé.

Les détecteurs d'électrons secondaires et rétrodiffusés enregistrent le nombre de particules recueillies à chaque point, cartographiées ensuite sur un écran en niveaux de gris ou en couleurs différentes selon la quantité de particules détectées. Quant aux détecteurs de rayons X, ils enregistrent non seulement le nombre de photons recueillis, mais aussi leur énergie ou longueur d'onde sur toute la surface balayée³¹.

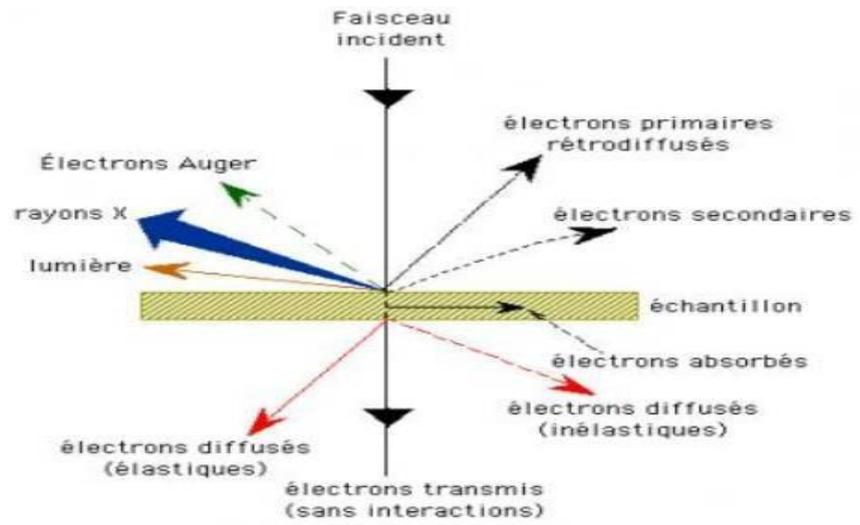


Figure 3.20 : Microscopie électronique à balayage : interaction entre les électrons et l'échantillon ³¹.

Chapitre 4

Résultats et discussion

Chapitre 4

Résultats et discussions

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de la caractérisation des échantillons sont présentés, en mettant l'accent sur l'analyse des diagrammes de diffraction des rayons X (DRX). Cette analyse est généralement effectuée à l'aide de logiciels dédiés, tels que le logiciel High Score version 3.0e utilisé dans cette étude.

Les résultats de DRX ont fourni des informations sur la composition chimique de l'échantillon, en mettant en évidence des structures cristallines cubiques et hexagonales à des angles spécifiques.

De plus, la méthode de Scherrer a été utilisée pour estimer directement la taille des cristallites à partir des données DRX. Cela a permis de caractériser finement les propriétés microstructurales de la poudre de déchets étudiée.

4.2 Caractérisation par DRX de la poudre de déchet inerte

L'étude caractéristique de la poudre de DI obtenue par broyage des déchets, en utilisant le logiciel X'pert Highscore qui a relevé le spectre représenté sur la figure 4.1

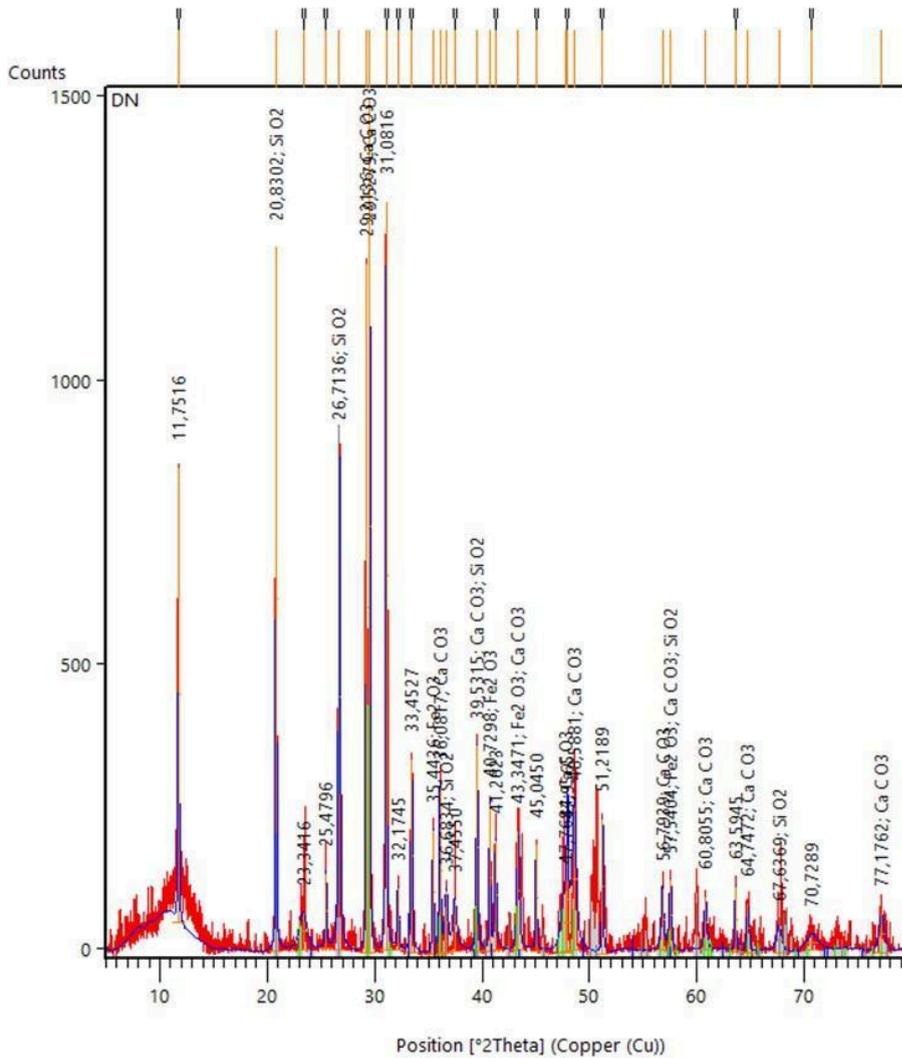


Figure 4.1 : Spectre DRX de la poudre DI.

4.2.1 Analyse de la Première phase de la poudre DI

La figure 4.1 montre que tous les spectres contiennent des pics qui sont particulièrement bien définis pour plusieurs éléments chimiques.

Les pics présentés nous confirment la présence du carbonate de calcium CaCO_3 , La carte la plus approprié à cet échantillon est celle numérotée (00-005-0586) avec ses raies les plus intenses situées à : (2 theta=29.229°, 77.1762°).

Cette carte représente la phase de carbonate de calcium (CaCO_3) dont la structure est Rhombohedral avec les paramètres suivants ($a=b = 4,9890 \text{ \AA}$, $c = 17,0620 \text{ \AA}$). Les pics du

spectre de l'échantillon sont très fins, cela signifie que la cristallinité de l'échantillon est bonne.

4.2.1 Analyse de la Première phase de la poudre DI

La figure 4.1 montre que tous les spectres contiennent des pics qui sont particulièrement bien définis pour plusieurs éléments chimiques.

Les pics présentés nous confirment la présence du carbonate de calcium CaCO_3 , La carte la plus approprié à cet échantillon est celle numérotée (00-005-0586) avec ses raies les plus intenses situées à : ($2\theta=29.229^\circ, 77.1762^\circ$).

Cette carte représente la phase de carbonate de calcium (CaCO_3) dont la structure est Rhombohedral avec les paramètres suivants ($a=b = 4,9890 \text{ \AA}, c = 17,0620 \text{ \AA}$).

Les pics du spectre de l'échantillon sont très fins, cela signifie que la cristallinité de l'échantillon est bonne.

4.2.2 Tracé de la première phase de la poudre DI

Le tracé de la première phase de la poudre du déchet DI est représenté sur la figure 4.2, alors que la composition résultant de l'analyse des données optiques par High score est citée dans les tableaux 4.1 .

A partir des résultats de la composition minéralogique exposée sur le tableau 4.1, il est clair que le constituant prédominant dans la première phase est le carbonate de calcium (calcite) (CaCO_3) provenant du carbonate de calcium contenu dans le ciment et les mortiers.

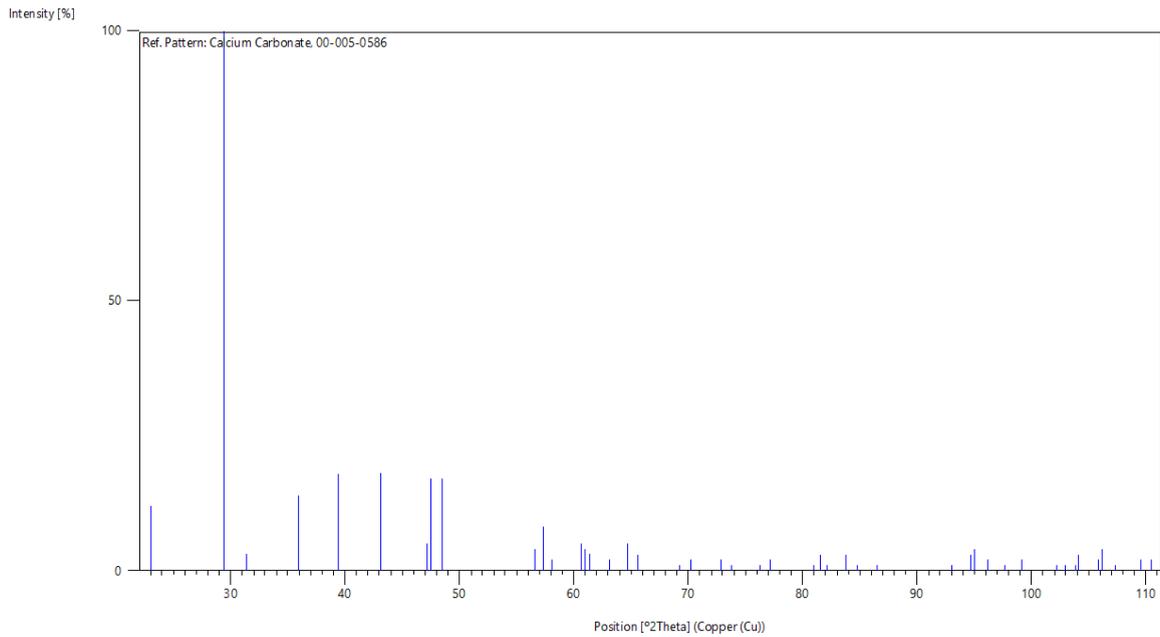


Figure 4.2 : Tracé de la première phase de la poudre DI.

Tableau 4.1 : Composition chimique de la première phase de la poudre DI.

Code de référence	00-005-0586
Nom composé	carbonate de calcium
Nom ICSD	carbonate de calcium
Formule empirique	CaCO₃
Formule chimique	CaCO₃

4.2.3 Analyse de la deuxième phase de la poudre de DI

Les pics présentés nous confirment la présence d'Oxyde de Silicium Quartz (SiO₂) , La carte la plus approprié à cet échantillon est celle numérotée (00-033-1161) avec ses raies les plus intenses entre : (2 theta=20.8302°, 67.690°).

Cette carte représente la phase de d'Oxyde de Silicium Quartz (SiO_2) dont la structure est Hexagonal avec les paramètres suivants ($a=b = 4,9134 \text{ \AA}$, $c = 5,4053 \text{ \AA}$).

Les pics du spectre de l'échantillon sont très fins, cela signifie que la cristallinité de l'échantillon est bonne.

4.2.4 Tracé de la deuxième phase de la poudre de DI

Le tracé de la deuxième phase de la poudre DI est représenté sur la figure 4.3, alors que la composition résultants de l'analyse des données optiques par High score est citée dans les tableaux 4.2

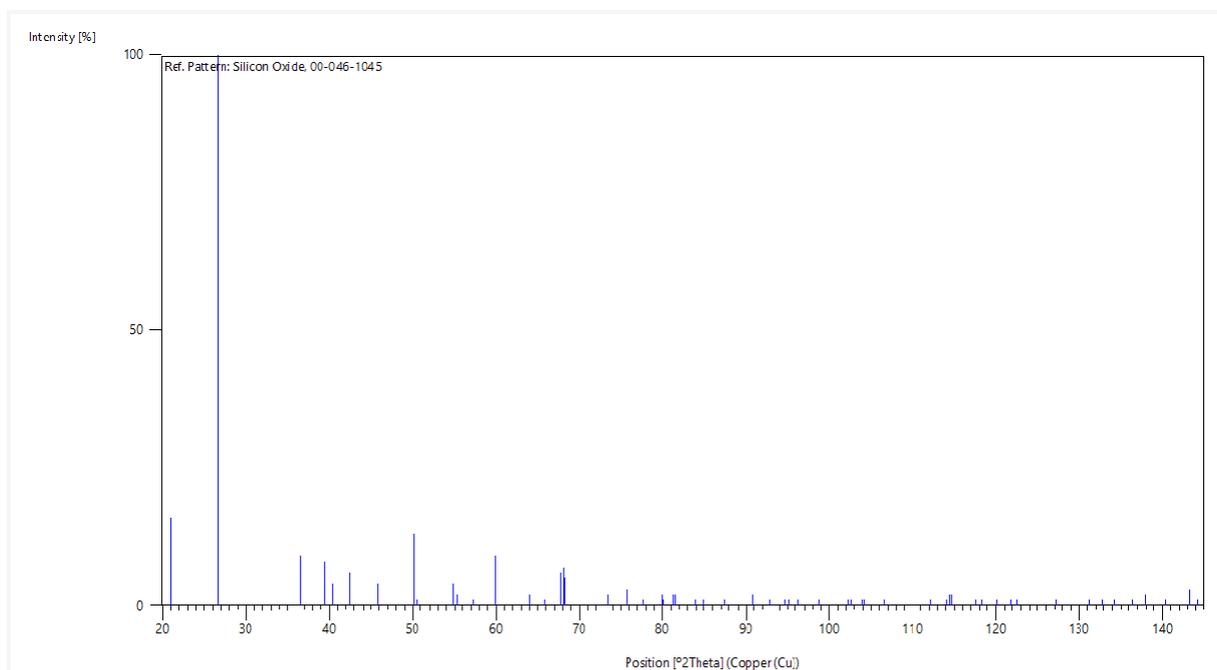


Figure 4.3: Tracé de la deuxième phase de la poudre DI.

Tableau 4.2 : Composition chimique de la deuxième phase de la poudre DI.

Code de référence	000-046-1045
Nom minérale :	Quartz, syn
Nom composé	Silicon Oxide
Formule empirique	O_2Si
Formule chimique	SiO_2

4.2.5 Analyse de la troisième phase la poudre de DI

Les pics présentés nous confirment la présence d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 , La carte la plus approprié à cet échantillon est celle numérotée (00-010-0173) avec ses raies les plus intenses entre : **($2\theta=25.4796^\circ, 77.1762^\circ$)**.

Cette carte représente la phase d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 dont la structure est Rhombohedral avec les paramètres suivants ($a=b = 4,7580 \text{ \AA}$, $c = 12,9910 \text{ \AA}$).

Les pics du spectre de l'échantillon sont très fins, cela signifie que la cristallinité de cette phase est en effet un indicateur bon. Des pics fins et bien définis signifient que les cristaux sont de grande taille et bien ordonnés.

4.2.6 Tracé de la troisième phase la poudre de DI

Le tracé de la troisième phase de la poudre DI est représenté sur la figure 4.4, alors que la composition résultant de l'analyse des données optiques par High score est citée dans les tableaux 4.3

A partir des résultats de la composition minéralogique exposée sur le tableau 4.3, il est clair que le constituant «oxyde d'aluminium Al_2O_3 » est l'élément majeur de cette phase. Selon son intensité illustrée sur le pic ; il est présent en faible quantité .

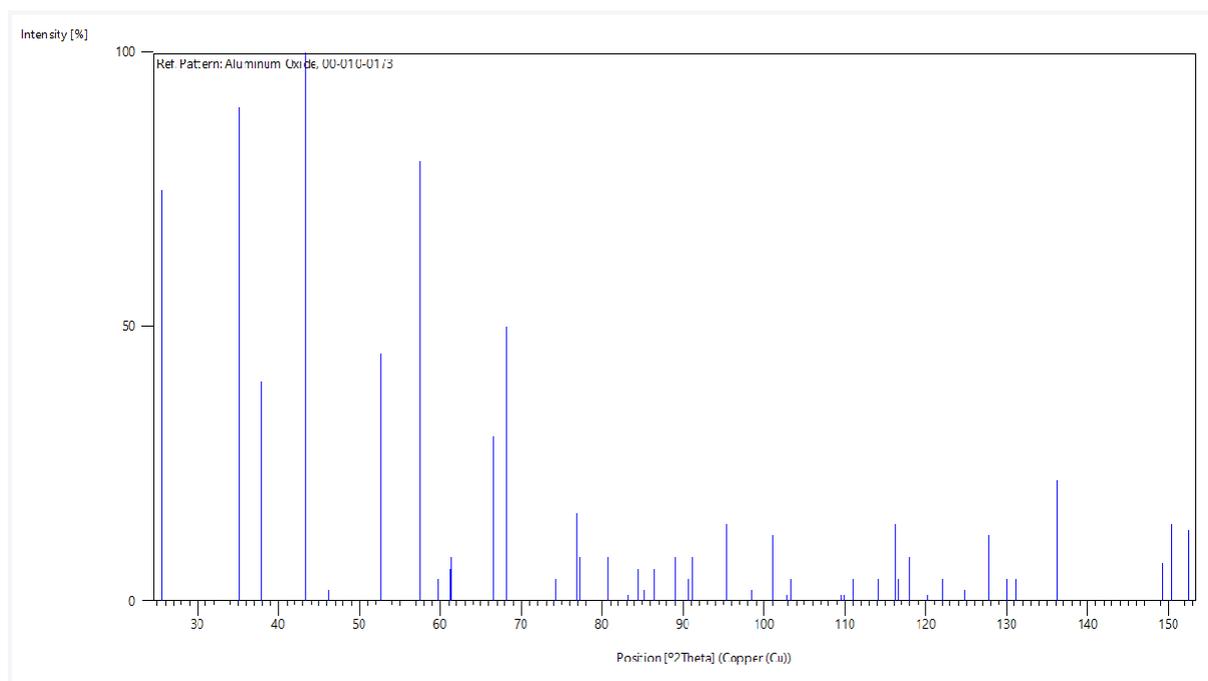


Figure 4.4 : Tracé de la troisième phase de la poudre DI.

Tableau 4.3 : Composition chimique de la troisième phase de la poudre DI.

Code de référence	00-010-0173
Nom composé	Aluminum Oxide , Al₂O₃
Nom minérale	Corundum, syn
Nom ICSD	Aluminum Oxide
Formule empirique	Al₂O₃
Formule chimique	Al₂O₃

4.2.7 Taille de particules cristallines de la poudre DI

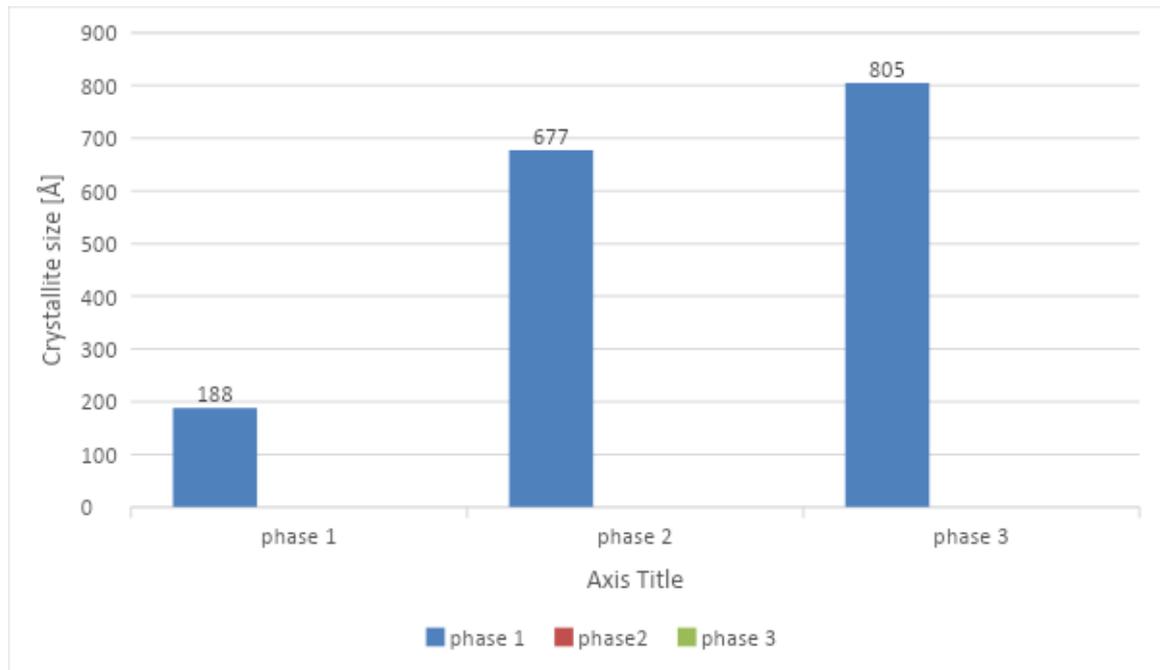


Figure 4.5: Calcul de la taille cristalline des phases identifiées dans la poudre DI.

L'exploitation du diagramme de la figure 4.1 nous a permis de déduire la taille des grains d'échantillon déchet inerte pour les trois phases, ainsi pour se faire nous avons utilisé la relation de Scherrer :

Tableau 4.4 : Tableau récapitulatif des résultats expérimentaux pour de la taille des grains des trois 03 phases .

N°	B obs. [$^{\circ}2\text{Th}$]	B std. [$^{\circ}2\text{Th}$]	Peak pos. [$^{\circ}2\text{Th}$]	B struct. [$^{\circ}2\text{Th}$]	Crystallite size [\AA]
1	0,432	0,008	6,261	0,424	188
2	0.126	0,008	11,752	0,118	677
3	0.108	0,008	18,156	0,100	805

Ce tableau nous permet de comparer la taille des grains des trois phases où on note que :

Pour la première phase, la taille cristalline est de 188 \AA .

Pour la deuxième phase, la taille cristalline est de 677 \AA .

Pour la troisième phase, la taille cristalline est de 805 \AA .

Cela montre que la taille des cristallites varie de manière significative entre les trois échantillons, avec le troisième échantillon présentant la taille la plus élevée.

4.3 Caractérisation par DRX de la poudre de Coquille d'oeufs

La figure 4.7 montre que le spectre contient des pics qui sont particulièrement bien définis pour un élément chimique.

Les pics présentés nous confirment la présence du carbonate de calcium CaCO_3 , La carte la plus approprié à cet échantillon est celle numérotée (00-005-0586) avec ses raies les plus intenses situées à : (**2 theta=31.672°, 77.725°**).

Cette carte représente la phase de carbonate de calcium (CaCO_3) dont la structure est Rhombohedral avec les paramètres suivants ($a=b = 4,9890 \text{ \AA}$, $c = 17,0620 \text{ \AA}$).

Les pics du spectre de l'échantillon sont très fins, cela signifie que la cristallinité de l'échantillon est bonne.

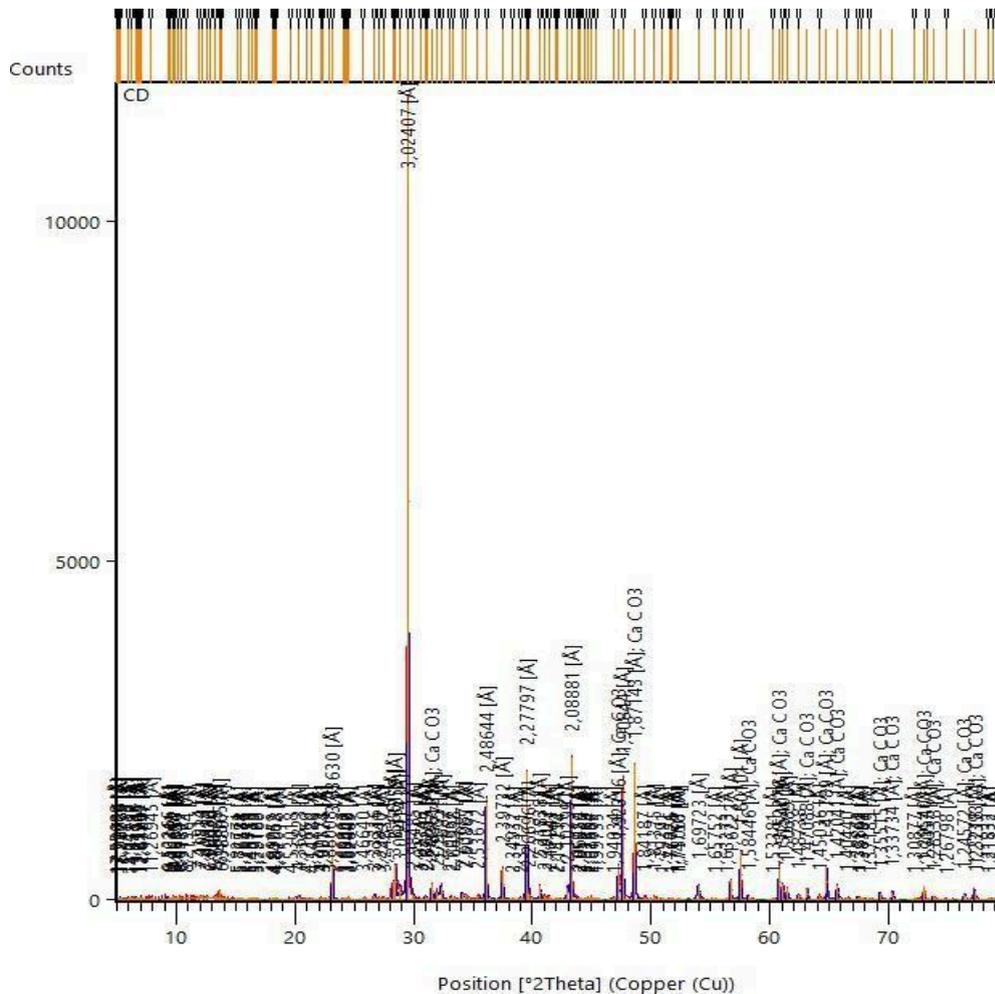


Figure 4.6 : Spectre DRX de la poudre CD.

4.3.1 Tracé de la phase de poudre CD

Le tracé de la première phase de la poudre CD est représenté sur la figure 4.7, alors que la composition résultant de l'analyse des données optiques par High score est citée dans les tableaux 4.5 .

A partir des résultats de la composition minéralogique exposée sur le tableau 4.5 et la figure 4.8 , il est clair que le constituant prédominant est le carbonate de calcium (calcite) (CaCO_3) .

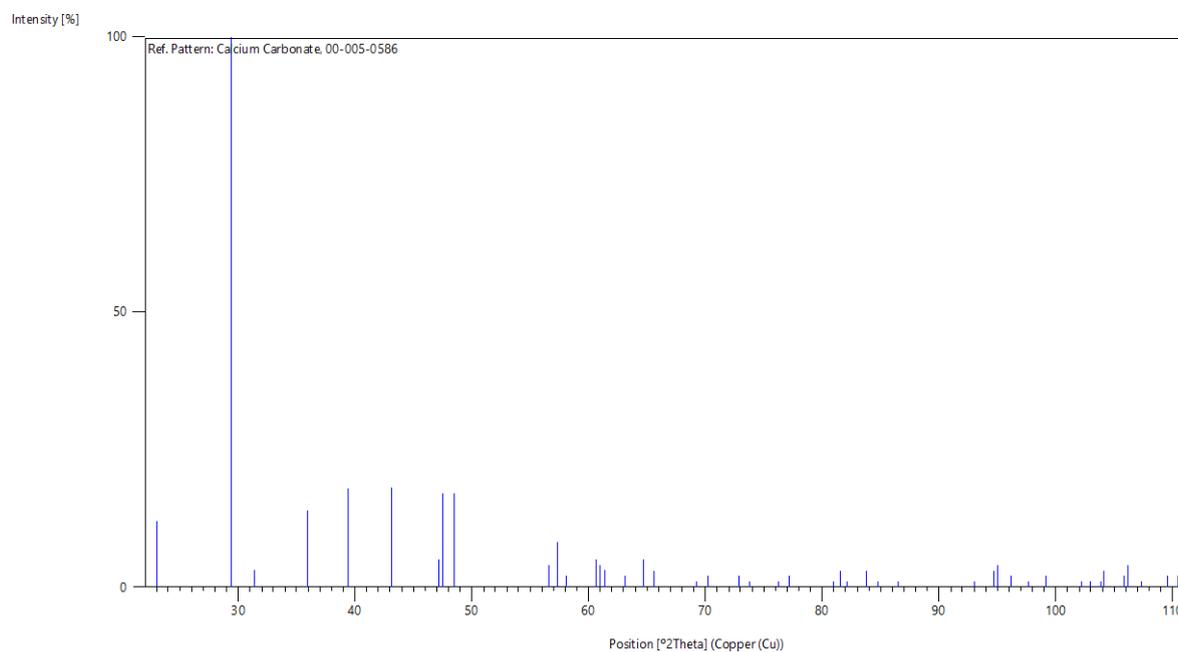


Figure 4.7 : Tracé de la phase de la poudre CD.

Tableau 4.5 : Composition chimique de la première phase de la poudre CD.

Code de référence	00-005-0586
Nom composé	Calcium Carbonate
Nom minérale	Calcite, syn
Nom ICSD	Calcium Carbonate
Formule empirique	CaCO_3
Formule chimique	CaCO_3

4.4 Caractérisation par DRX de la poudre de bois

4.4.1 Analyse de la première phase de PB

La figure 4.9 montre que le spectre contient des pics qui sont particulièrement bien définis pour un élément chimique.

Les pics présentés nous confirment la présence de la bornite (Cu_5FeS_4), La carte la plus approprié à cet échantillon est celle numérotée (01-073-1667) avec ses raies les plus intenses situées entre : ($2\theta = 28.284^\circ, 69.530^\circ$).

Cette carte représente la phase de bornite (Cu_5FeS_4) dont la structure est Cubique avec les paramètres suivants ($a=b = 5,4700 \text{ \AA}, c = 5,4700 \text{ \AA}$).

Les pics fins du spectre indiquent que l'échantillon est de bonne qualité cristalline. Cela suggère que les techniques d'analyse et de préparation de l'échantillon ont été effectuées avec soin.

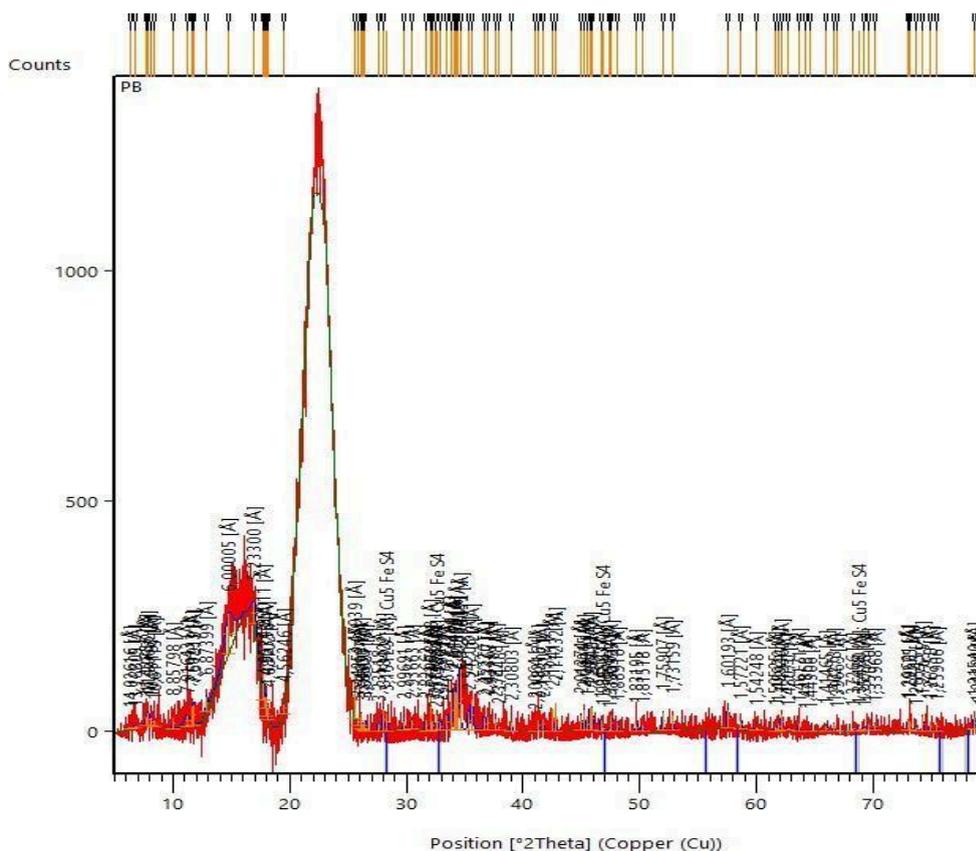


Figure 4.8 : Spectre DRX de la poudre du bois PB.

4.4.2 Tracé de la première phase

Le constituant identifié dans le tracé de la première phase (figure 4.11) est le bornite (Cu_5FeS_4), sa composition chimique est présentée dans le tableau 4.7

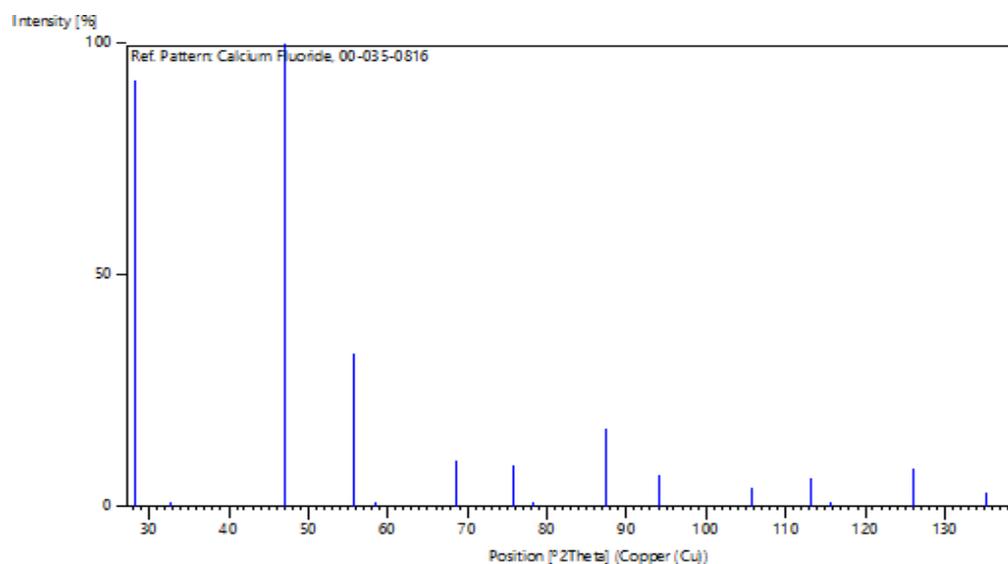


Figure 4.9 :Tracé de la première phase de poudre de bois .

Tableau 4.6 : Composition chimique de la première phase de la poudre PB.

Code de référence	00-035-0816
Nom composé	Bornite
Nom ICSD	Bornite
Formule empirique	Cu_5FeS_4
Formule chimique	Cu_5FeS_4

4.4.3 Analyse de la deuxième phase la poudre de bois

La figure 4.12 montre que le spectre contient des pics qui sont particulièrement bien définis pour un élément chimique.

Les pics présentés nous confirment la présence du silicium(Si) , La carte la plus approprié à cet échantillon est celle numérotée (00-027-1402) avec ses raies les plus intenses situées entre : (2 theta=47.342 ° , 69.324°).

Cette carte représente la phase du silicium (Si) dont la structure est Cubique avec les paramètres suivants (a=b = 5,4309 Å , c = 5,4309 Å°).

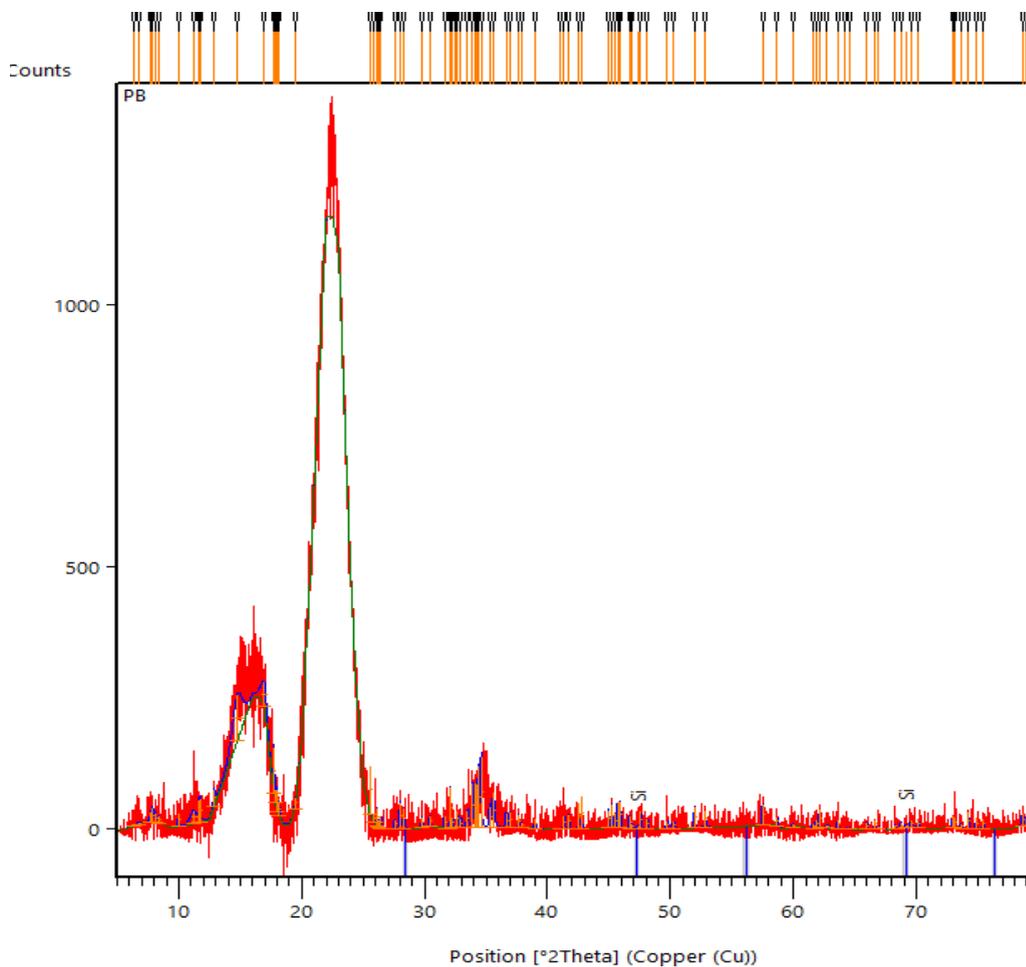


Figure 4.10: Spectre DRX de la deuxième phase de PB .

4.4.4 Tracé de la deuxième phase

Le constituant identifié dans le tracé de la deuxième phase (figure 4.13) est le silicium (Si), sa composition chimique est présentée dans le tableau 4.8.

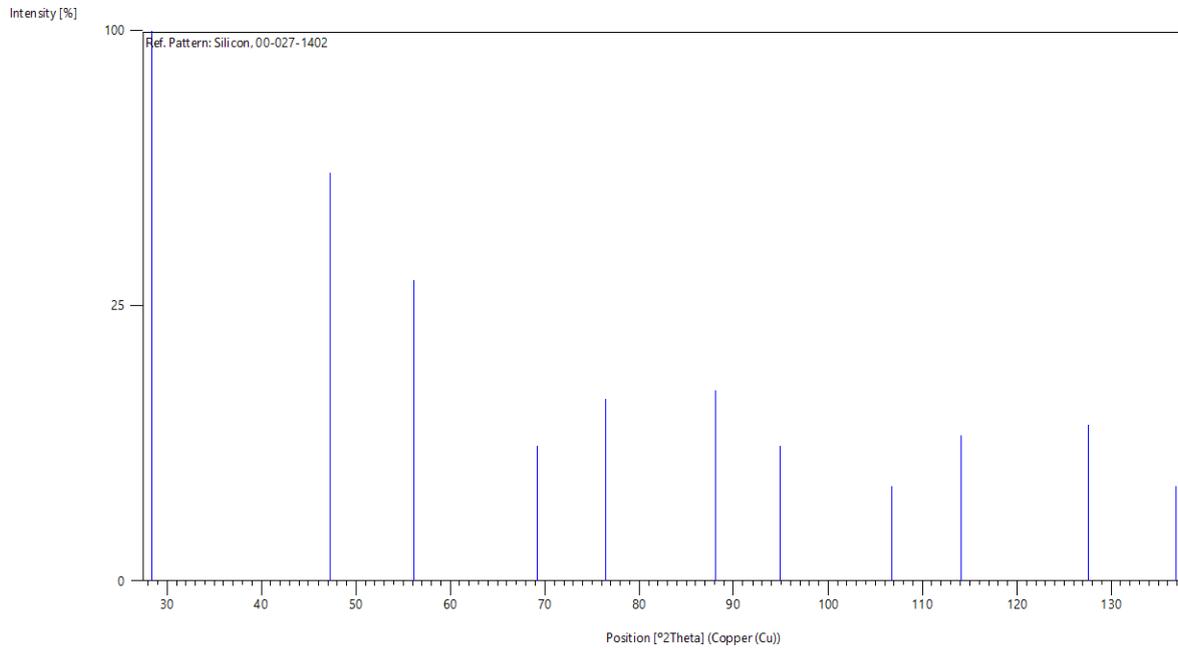


Figure 4.11: Tracé de la deuxième phase de PB .

Figure 4.7 : Composition chimique de la deuxième phase de la poudre PB.

Code de référence ;	00-027-1402
Nom composé	Silicon
Nom ICSD	Silicon
Formule empirique	Si
Formule chimique	Si

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif principal est de développer une solution innovante permettant de recycler ces déchets en les transformant en granulats minéraux de haute qualité, pouvant ensuite être réutilisés dans la construction, le granulat est composé de 80 % en masse de déchets non dangereux et inertes et ne pouvant faire l'objet d'un recyclage. La fabrication des granulats est réalisée en broyant les refus des centres de tri du BTP en fine poudre, en mélangeant la farine de déchet avec des liants bas carbone.

Cette étude se concentre sur l'incorporation d'un consortium de liants alternatifs, comprenant la poudre de verre, de la cendre, des coquilles d'œufs et des feuilles de maïs, pour la fabrication de granulats destinés à la construction.

Avant de commencer les essais de caractérisations chimiques, il était essentiel de microniser les déchets à 0,5 mm (500 microns). Cette étape a amélioré l'homogénéité : la réduction de la taille des déchets à 0,5 mm garantit une distribution granulométrique uniforme, cruciale pour la cohérence et la performance des matériaux composites fabriqués avec ces déchets.

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a permis d'atteindre les objectifs de la première phase d'étude. Les résultats obtenus ont révélé la présence des phases minérales suivantes :

- Quartzite (SiO_2) : Les spectres de diffraction ont montré des pics caractéristiques du quartz, confirmant ainsi la présence de cette phase dans les échantillons de déchets inertes. Les positions et les intensités des pics correspondent parfaitement aux données de référence du quartz (000-046-1045), indiquant une structure cristalline bien définie.
- Calcite (CaCO_3) : Les coquilles d'œufs et les DI ont montré des pics distincts correspondant à la calcite. Les résultats obtenus sont en accord avec les références de diffraction de la calcite (00-005-0586), confirmant que la majeure partie du carbonate de calcium dans les coquilles d'œufs est sous forme de calcite et aussi pour les DI elle forme une phase dominante qui est très importante.

- Oxyde d'aluminium (Al_2O_3) : les spectre de cette phase ont donner une identification à l'oxyde d'alumine , Les résultats obtenus sont en accord avec les références de diffraction de l'alumin (00-010-0173), sa présence indique également la contribution des matériaux comme les briques et les éléments en céramique.
- Bornite (Cu_5FeS_4) : le spectre de PB contient des pics qui sont particulièrement bien définis pour deux éléments chimiques. Les pics présentés nous confirment la présence de la bornite (Cu_5FeS_4), la carte la plus approprié à cet échantillon est celle numérotée (01-073-1667). Le spectre de la deuxième phase contient des pics qui sont définis pour le silicium(Si), la carte la plus approprié à cet échantillon est celle numérotée (00-027-1402).

La présence de la bornite indique probablement une contamination métallique du bois, provenant par exemple d'un outil de coupe ou d'une installation de broyage contenant des alliages cuivreux. Le silicium peut provenir de sables, de poussières ou d'autres impuretés minérales mélangées au bois lors de la collecte ou du traitement.

Ces deux phases non organiques peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés physiques et chimiques de la poudre de bois, notamment sa résistance.

Les différentes formes cristallines identifiées des poudres de déchets proposés dans cette étude sont les suivants :

Cubique : La présence de minéraux à structure cubique indique des propriétés physiques favorables, telles que la dureté et la résistance à la compression, qui sont souhaitables pour les granulats de construction.

Hexagonale : Les minéraux à structure hexagonale peuvent également offrir de bonnes propriétés mécaniques, bien que leur comportement sous contrainte puisse varier en fonction de leur orientation cristalline.

Rhomboédrique : Les minéraux à structure rhomboédrique présentent des propriétés mécaniques intéressantes, notamment une bonne résistance à la compression et une certaine flexibilité en fonction de la direction de la charge .

Cette première phase d'analyse approfondie a joué un rôle crucial dans la caractérisation des matériaux de substitution envisagés pour les granulats de construction. L'objectif principal était d'identifier avec précision la composition minéralogique de ces ressources alternatives, afin de mieux comprendre leur potentiel d'application et d'orienter les prochaines étapes de leur développement.

Fort de ces résultats, l'exploration et la mise au point de ces solutions de substitution aux granulats conventionnels, avec une meilleure connaissance de leurs caractéristiques intrinsèques. Cela représente une avancée significative vers la valorisation durable de ces déchets dans le secteur de la construction.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **Bounif, Abderrahmane.** Valorisation des déchets générés par l'usine en recyclage interne (Biskria Cimenterie). 2019, http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/17789/1/Bounif_Abderrahmane.pdf.
2. **Hou, Y.** Contribution Au Développement de La Valorisation Des Déchets Inertes Du BTP: Étude de La Carbonatation Des Granulats Recyclés Compactés. PhD thèses, Université de La Rochelle, 2021. <https://theses.hal.science/tel-03595042/>.
3. **"DMA2 Report."** 2024, <https://and.dz/site/wp-content/uploads/rapport%20DMA2.pdf>.
4. **Martaud, T.** Évaluation environnementale de la production de granulats en exploitation de carrières - Indicateurs, Modèles et Outils.
5. **Hadj, M. E.** étude des propriétés mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage.
6. **Salah, B. M.** L'utilisation des SIG sur les données d'infrastructure et de fondations : Application dans la zone d'Alger - Doctorat en Sciences Spécialité : Génie civil. 2019.
7. **Legros, J. P. titre :** Le calcaire : de la pierre à la civilisation. 2023, vol. 54.
8. **Salah, B. M.** L'utilisation des SIG sur les données d'infrastructure et de fondations : Application dans la zone d'Alger - Doctorat en Sciences Spécialité : Génie civil. 2019.
9. **"LOGBI-Abdelaziz.pdf** these :effet des ajouts minéraux actifs et inertes sur les propriétés physico, mécanique et chimique du mortier. 2019
10. **"SAYOUD, Achraf.** F1 Génie Civil et Hydraulique Structures (1)."
11. **Radhia, H.** Thèse de doctorat en Science , [Propriétés physico-mécaniques et durabilité des Mortiers avec additions minérales](#) . 2018 .
12. **Sow, M.** these : Réalisation d'éco-ciments par la valorisation de cendres volantes de charbon non conventionnel issues de centrales thermiques . 2016
13. **"MÉMOIRE-BENLARBI, H., et KAMEL, M."** Effet de remplacement partiel de ciment par poudre de verre ou charbon actif à base de noyau de datte sur les performances du mortier. 2019
14. **"LEGHREIB, Mekki Nour El Islam, et TAMAOUST, Aissam."**Étude des bétons à la poudre de verre. 2015
15. **Riad, D.** Article : Effet du dosage en superplastifiant sur les caractéristiques des

mortiers élaborés à base d'additions minérales (à l'état frais et à l'état durci). 2012.

16. **Memoire "Étude de l'influence des ajouts des adjuvants et le mode de séchage sur la résistance du béton."** . 2019
17. **Grégoire, M.** Extraction des fibres de chanvre pour des composites structuraux - Optimisation du potentiel mécanique des fibres pour des applications concernant des matériaux composites 100% bio-sourcés.
18. **Vidil, Lisa.** 2019. Scribd , thèse : étude de matériaux 2D- potentialités d'utilisation comme renfort de matériaux composite. 2019
19. **Matthieu, M. S.** Potentiel des fibres végétales courtes dans l'amélioration du comportement mécanique des mortiers. 2022.
20. **Dujardin, N.** un Matériau Biosourcé de choix Les Fibres Naturelles. caractérisation et application. 2014.
21. **Moghaddam, M. K., Gheshlagh, F. G., et Moezzi, M.** "Extraction and characterization of cellulose microfibrils from corn husk for application as reinforcing agent in biocomposite." International Journal of Biological Macromolecules, vol. 264, 2024, pp. 130669. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.130669.
22. **Gupta, A., Vennila, T., Andiyappan, K., Shreepad, S., Sathiyamoorthy, M., et Gopala Gupta, A. S. A. L. G.** "Characterization of the hydroxyapatite obtained from chicken egg shells applied in bioceramics." Materials Today Proceedings, Published online Sept. 2023, S2214785323047405. doi:10.1016/j.matpr.2023.09.079.
23. **ARD-Normandie, D., et al.** Mécanique (science) thèse : De l'étude du comportement mécanique de sols hétérogènes modèles à son application au cas des sols naturels. 2010
24. **Zouaoui, Selma, et Kenza, Zine.** Thèse de doctorat . étude des propriétés mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage.
25. **Zerguine, Wided.** Thèse de doctorat. 2024, etude des propriétés des mélanges des composites à base de POLYPROPYLENE /PP-g-MAH/ POLYAMIDE 66 Renforcé par les fibres de verre , influence de la modification
26. **Zerguine, Wided.** Thèse de doctorat. 2024, etude des propriétés des mélanges des composites à base de POLYPROPYLENE /PP-g-MAH/ POLYAMIDE 66 Renforcé par les fibres de verre , influence de la modification

DÉFINITION DES NORMES :

- (NF EN 993-1): Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses
- Partie 1 : Détermination de la masse volumique apparente, de la porosité ouverte et de la porosité totale.
 - Los Angeles (NF EN 1097-2): Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats .
- Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
 - Sulfates solubles dans l'eau (NF EN 1744-1) : Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats
 - Masse volumique et absorption d'eau (NF EN 1097-6 §8 et 9) détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau.
 - **Perte au feu à 950°C (NF EN 1744-1)**:traite de la mesure de la perte au feu des granulats. La perte au feu est déterminée en atmosphère oxydante par calcination à 950°C.
 - **Lixiviation (NF EN 12457-4)** : spécifie un essai de conformité fournissant des informations sur la lixiviation des déchets fragmentés et des boues. Cet essai s'applique aux déchets ayant une granularité inférieure à 4 mm, avec ou sans réduction de la granularité. Elle a principalement été conçue pour étudier les constituants inorganiques des déchets. Elle ne tient pas compte des caractéristiques particulières des constituants organiques non polaires ni des conséquences de l'évolution microbiologique des déchets organiques dégradables

Résumé

L'Algérie s'est engagée depuis les années 2000 dans une amélioration significative de la gestion environnementale, notamment en renforçant ses infrastructures de collecte, de tri et de traitement des déchets. Malgré ces efforts, des lacunes persistent, nécessitant un renforcement des moyens pour une transition environnementale réussie.

Une nouvelle méthode innovante de traitement des déchets émerge comme alternative aux méthodes traditionnelles polluantes telles que l'enfouissement et l'incinération. Cette méthode transforme les déchets comme le plâtre, les plastiques et le bois en pâte minérale, séquestrant ainsi le CO₂ plutôt que de le libérer dans l'atmosphère. Les agrégats minéraux obtenus peuvent être réutilisés dans la construction, favorisant une économie circulaire et réduisant l'empreinte environnementale des activités de gestion des déchets et de construction malgré ces initiatives louables, force est de constater que des insuffisances persistent encore sur le terrain. Cela montre que les moyens mis en œuvre doivent être renforcés et amplifiés pour permettre à l'Algérie de poursuivre avec succès sa transition environnementale.

Cette approche non seulement répond aux défis écologiques actuels mais ouvre également de nouvelles perspectives pour la valorisation durable des ressources en Algérie.

Mots clés : transition environnementale , séquestrant , agrégats minéraux , valorisation

ملخص

الجزائر ملتزمة منذ العام 2000 بتحسين كبير في إدارتها للبيئة، بتعزيز بنياتها التحتية لجمع وفرز ومعالجة النفايات. على الرغم من هذه الجهود، إلا أن هناك نقائص تستمر، مما يتطلب تعزيز الوسائل لضمان نجاح الانتقال البيئي.

طريقة جديدة ومبتكرة لمعالجة النفايات تظهر كبديل للأساليب التقليدية الملوثة مثل التخزين في المدافن والاحتراق. تقوم هذه الطريقة بتحويل النفايات مثل الجص والبلاستيك والخشب إلى عجينة معدنية، مما يساعد في امتصاص ثاني أكسيد الكربون بدلاً من إطلاقه في الغلاف الجوي. يمكن إعادة استخدام الركام المعدني المحصل عليه في البناء، معززاً بذلك الاقتصاد الدائري ويقلل من الأثر البيئي لأنشطة إدارة النفايات والبناء

هذا النهج ليس فقط لمواجهة التحديات البيئية الحالية، بل يفتح أيضاً آفاقاً جديدة لتعزيز الاستدامة في استغلال الموارد في الجزائر.

الكلمات المفتاحية : الانتقال البيئي , التقاط ركام معدني , تعزيز القيمة

Abstract

Algeria has been committed since the 2000s to significantly improving its environmental management, particularly by strengthening its infrastructure for waste collection, sorting, and treatment. Despite these efforts, there are persistent shortcomings that require enhanced resources to ensure a successful environmental transition.

A new innovative method for waste treatment has emerged as an alternative to traditional polluting methods such as landfilling and incineration. This method transforms waste like plaster, plastics, and wood into mineral paste, thereby sequestering CO₂ rather than releasing it into the atmosphere. The mineral aggregates produced can be reused in construction, promoting circular economy practices and reducing the environmental footprint of waste management and construction activities.

This approach not only addresses current ecological challenges but also opens new perspectives for sustainable resource valorization in Algeria

Word Keys : Environmental Transition , Sequestrant, Mineral Aggregates, Valorization

Annexe

CENTRALE À BÉTON GICA CHELGHOUMLAID



STOCK DE GRANULAT NATUREL A USAGE BETON



Sn; <0.0001% Ag, Cr, Fe, Li, Mn. Temperature of Data Collection: Pattern taken at 26 C. Other form: aragonite. Pattern reviewed by Parks, J., McCarthy, G., North Dakota State Univ., Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1992). Agrees well with experimental and calculated patterns. Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed. Additional Patterns: See ICSD 16710, 20179, 28827, 18164, 18165 and 18166 (PDF 72-1214 and 72-1937); ICSD 73446 (PDF 81-2027); ICSD 79673 (PDF 83-577); ICSD 79674 (PDF 83-578).

References

Primary reference:

Swanson, Fuyat., Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, **II**, 51, (1953)

Optical data:

Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., **II**, 142

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3,86000	23,022	12,0
2	1	0	4	3,03500	29,406	100,0
3	0	0	6	2,84500	31,418	3,0
4	1	1	0	2,49500	35,966	14,0
5	1	1	3	2,28500	39,402	18,0
6	2	0	2	2,09500	43,146	18,0
7	0	2	4	1,92700	47,124	5,0
8	0	1	8	1,91300	47,490	17,0
9	1	1	6	1,87500	48,514	17,0
10	2	1	1	1,62600	56,555	4,0
11	1	2	2	1,60400	57,402	8,0
12	1	0	10	1,58700	58,075	2,0
13	2	1	4	1,52500	60,678	5,0
14	2	0	8	1,51800	60,987	4,0
15	1	1	9	1,51000	61,345	3,0
16	1	2	5	1,47300	63,060	2,0
17	3	0	0	1,44000	64,678	5,0
18	0	0	12	1,42200	65,599	3,0
19	2	1	7	1,35600	69,231	1,0
20	0	2	10	1,33900	70,238	2,0
21	1	2	8	1,29700	72,870	2,0
22	3	0	6	1,28400	73,729	1,0
23	2	2	0	1,24700	76,300	1,0
24	1	1	12	1,23500	77,177	2,0
25	3	1	2	1,18690	80,933	1,0
26	2	1	10	1,17950	81,547	3,0
27	0	1	14	1,17280	82,113	1,0
28	1	3	4	1,15380	83,767	3,0
29	2	2	6	1,14250	84,788	1,0
30	1	2	11	1,12440	86,483	1,0
31	2	0	14	1,06130	93,072	1,0
32	4	0	4	1,04730	94,701	3,0
33	3	1	8	1,04470	95,011	4,0
34	1	0	16	1,03520	96,165	2,0
35	2	1	13	1,02340	97,647	1,0
36	3	0	12	1,01180	99,161	2,0
37	3	2	1	0,98950	102,242	1,0
38	2	3	2	0,98460	102,952	1,0
39	1	3	10	0,97820	103,899	1,0
40	1	2	14	0,97670	104,124	3,0

