



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2025

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2025

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
DE MASTER ACADEMIQUE**

Filière : Génie des procédés

Option : Génie des procédés des matériaux

Thème

**Étude de la Faisabilité De La Fabrication D'un Ciment Composite A Base
De Déchets Inertes De Béton Et De Verre.**

Présenté par : M^{elle} TOUAT HALIMA

Soutenu le : 18/06/ 2025 devant le jury composé de :

Président :	SAIDJ MERZOUK	Grade : MCA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	MELLOUK SENIA	Grade : MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	BOUBEGRA NAIMA	Grade : MCA	Université de Mostaganem
Co-rapporteur :	BENHALIMA Amir	Grade : Chef division	GICA (Groupe Industriel des Ciments d'Algérie)

Année Universitaire 2024/2025

Table des matières

<i>Remerciements</i>	C
<i>DEDICACE</i>	D
RESUME	I
CHAPITRE 1 :.....	3
Généralités sur les ciments et la valorisation du déchet	3
PARTIE 1	3
Généralités sur les ciments	3
1. Historique :	3
2. Le ciment portland :	4
3. Composition chimique du ciment portland après broyage :	5
4. Les ajouts cimentaires :	6
5. Propriété et caractéristique pouzzolane :	7
6. Les ajouts inertes [13] :	10
6.6. En voie humide	12
7. Processus de fabrication de ciment :	13
8. Différents Types Et Classification Des Ciments :	14
9. UTILISATION DES DIFFERENTS TYPES DE CIMENTS :	16
PARTIE 02	19
Valorisation de déchet (Verre, béton)	19
1. Définition Des Déchets :	20
2. Classification Des Déchets :	20
3. Gestion Des Déchets	21
4. Valorisation Déchet De Verre :	21
5. Les déchets de béton dans la production du ciment :	24
CONCLUSION	26
Chapitre 2 :.....	27
Matériaux et procédures expérimentales	27
1. Présentation d'entreprise (E.C.D.E) :	28
2. PREPARATION DES NOUVEAUX CIMENTS :	31
3. Essais Effectues	32
4. Conclusion :	42

Chapitre 3	43
Caractérisation des ciments élaboré	43
1. Résultats Des Essais Réalisés	44
3. Caractérisation des ciments élaborés.....	45
4. Conclusion :	54
Conclusion générale	56
LISTE DES NOTATIONS	G
LISTE DES FIGURES.....	H
LISTE DES FIGURES.....	I
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	10



Remerciements

Nous remercions Allah, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, qui nous a enseigné ce que nous ignorions, et qui nous a accordé la santé ainsi que tous les moyens nécessaires pour accomplir ce travail et rédiger ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent A : **Madame BOUBEGRA Naima**, Maitres de conférences à **l'Université de Mostaganem**, Ce travail a été réalisé au niveau de la cimenterie Oued-Sly, wilaya de Chlef. J'adresse mes remerciements aux responsables de cette entreprise pour m'avoir donné l'occasion d'effectuer mes travaux de Master au sein de cette entreprise.

Mes remerciements vont à toute l'équipe du laboratoire de la cimenterie d'Oued-Sly, particulièrement **Mr BENHALIMA Amir** ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail durant la période de mon stage

Enfin, Mes remerciements les plus profonds à ma chère famille pour leur soutien moral indéfectible et leur encouragement.





RESUME

Ce travail de recherche s'inscrit dans une approche de valorisation des déchets inertes et de réduction de l'empreinte environnementale de l'industrie cimentière. Il vise à étudier la faisabilité de la formulation d'un ciment composite innovant, dans lequel une partie du clinker est remplacée par des poudres issues du broyage de déchets de verre et de béton. Le taux global de substitution a été fixé à 20 %, réparti en différentes proportions (10 %, 15 % et 20 %), en combinaison avec 5 % de gypse.

Les échantillons ainsi formulés ont été soumis à une série d'essais de caractérisation physico-chimique et mécanique, conformément aux normes en vigueur. L'évaluation des propriétés du nouveau ciment a porté notamment sur la consistance de la pâte, les temps de début et de fin de prise, ainsi que sur les résistances mécaniques (compression et flexion) à différents âges.

Les résultats obtenus mettent en évidence que la poudre de verre tend à accélérer la prise et à augmenter l'absorption d'eau, tandis que les fines de béton, agissant comme ajouts inertes, influencent peu la cinétique de durcissement. À l'état durci, les mortiers à base de ces ciments composites présentent une microstructure plus dense et homogène que celle du témoin, ce qui se traduit par une amélioration des performances mécaniques et de la durabilité.

Par ailleurs, les différentes poudres introduites contribuent de manière variable à la réactivité du ciment, en fonction de leur nature et de leur proportion, ce qui peut influencer la qualité du matériau final. Ainsi, bien que les résultats soient prometteurs, une étude approfondie de la microstructure du ciment reste nécessaire pour mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre ces ajouts et la matrice cimentaire.

En conclusion, l'utilisation combinée de déchets de verre et de béton, jusqu'à 20 % de la masse totale, permet d'élaborer un ciment composite performant, conforme aux exigences normatives, tout en contribuant à la valorisation de déchets et à la réduction des impacts environnementaux de la fabrication du ciment.

Mots-clés : Clinker, gypse, déchets de béton, déchets de verre, résistance à la compression, flexion, durabilité.

ملخص

يُعد هذا البحث جزءًا من نهجٍ لتثمين النفايات الخاملة وتقليل البصمة البيئية لصناعة الأسمنت. يدرس هذا البحث جدوى صياغة أسمنت مُركَّب مُبتكر، يُستبدل فيه جزء من الكلنكر بمساحيق ناتجة عن طحن نفايات الزجاج والخرسانة. حُدِّدت نسبة الاستبدال الإجمالية عند 20%، مُقسَّمة إلى نسب مُختلفة (10%، 15%، و20%)، مُضافًا إليها 5% جبس.

خضعت العينات المُصاغة بهذه الطريقة لسلسلة من اختبارات التوصيف الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية، وفقًا للمعايير الحالية. ركَّز تقييم خصائص الأسمنت الجديد بشكل خاص على قوام المعجون، ووقتي بدء وانتهاء التصلب، بالإضافة إلى المُقاومة الميكانيكية (الضغط والانثناء) في مختلف الأعمار.

تُشير النتائج المُتحصل عليها إلى أن مسحوق الزجاج يُسرِّع التصلب ويزيد من امتصاص الماء، بينما تُؤثر حبيبات الخرسانة الناعمة، التي تعمل كمُضافات خاملة، تأثيرًا ضئيلاً على حركية التصلب. في الحالة المتصلبة، يكون للملاط المعتمد على هذه الأسمنتات المركبة بنية مجهرية أكثر كثافة وتجانسًا من التحكم، مما يؤدي إلى تحسين الأداء الميكانيكي والمتانة.

علاوة على ذلك، تساهم المساحيق المُختلفة المُقدمة بطرق مُختلفة في تفاعل الأسمنت، اعتمادًا على طبيعتها ونسبها، مما قد يؤثر على جودة المادة النهائية. وهكذا، على الرغم من أن النتائج واعدة، إلا أن الدراسة المُتعمقة للبنية المجهرية للأسمنت تظل ضرورية لفهم آليات التفاعل بين هذه الإضافات ومصفوفة الأسمنت بشكل أفضل.

في الختام، فإن الاستخدام المشترك لخيوط الزجاج والبيتون، حتى 20% من الكتلة الإجمالية، يسمح بتصنيع مركب إسمنتي عالي الأداء، يتوافق مع المتطلبات المعيارية، ويساهم في تثمين المزالج وتقليل التأثيرات البيئية لتصنيع الأسمنت.

الكلمات المفتاحية: الكلنكر، الجبس، نفايات الخرسانة، نفايات الزجاج، قوة الضغط، الانحناء، المتانة.

Abstract

This research work is part of an approach to valorizing inert waste and reducing the environmental footprint of the cement industry. It studies the feasibility of formulating an innovative composite cement, in which part of the clinker is replaced by powders from the grinding of glass and concrete waste. The overall substitution rate was set at 20%, divided into different proportions (10%, 15% and 20%), in combination with 5% gypsum.

The samples thus formulated were subjected to a series of physicochemical and mechanical characterization tests, in accordance with current standards. The evaluation of the properties of the new cement focused in particular on the consistency of the paste, the start and end times of setting, as well as the mechanical strengths (compression and flexion) at different ages.

The results obtained highlight that glass powder tends to accelerate setting and increase water absorption, while concrete fines, acting as inert additives, have little influence on hardening kinetics. In the hardened state, mortars based on these composite cements have a denser and more homogeneous microstructure than the control, which results in improved mechanical performance and durability.

Furthermore, the different powders introduced contribute in varying ways to the reactivity of the cement, depending on their nature and proportion, which can influence the quality of the final material. Thus, although the results are promising, an in-depth study of the microstructure of the cement remains necessary to better understand the interaction mechanisms between these additions and the cement matrix.

En conclusion, l'utilisation combinée de déchets de verre et de béton, jusqu'à 20 % de la masse totale, permet d'élaborer un ciment composite performant, conforme aux exigences normatives, tout en contribuant à la valorisation de déchets et à la réduction des impacts environnementaux de la fabrication du ciment.

Keywords: Clinker, gypsum, concrete waste, glass waste, compressive strength, bending, durability

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans un monde confronté à une pression croissante sur les ressources naturelles et à des défis environnementaux majeurs, la valorisation des déchets issus du secteur de la construction et de la démolition devient une priorité stratégique. L'industrie cimentière, fortement consommatrice de ressources minérales et énergétiques, est au cœur de ces enjeux, notamment en raison de l'impact environnemental élevé de la production du clinker, constituant principal du ciment.

Parallèlement, les quantités importantes de déchets inertes générés par les activités de construction, tels que les fines de béton et de verre, posent un problème de gestion durable. Ces matériaux, difficilement biodégradables et souvent mis en décharge, représentent pourtant un potentiel inexploité de matière première secondaire.

Face à cette problématique, ce projet de fin d'étude s'inscrit dans une logique d'économie circulaire en proposant l'intégration de ces déchets inertes dans le processus de fabrication du ciment, comme ajouts minéraux partiels au clinker. L'objectif est double : réduire l'empreinte environnementale du ciment produit, tout en valorisant des déchets difficilement recyclables, sans compromettre la qualité et la conformité du produit final.

Le travail portera sur l'évaluation de l'impact de l'incorporation de fines de béton et de verre, à des proportions bien définies (10 %, 15 % et 20 %), en remplacement partiel du clinker, en association avec 5 % de gypse, sur les propriétés physico-mécaniques du ciment. L'étude veillera à ce que les formulations testées respectent les exigences normatives en vigueur, notamment celles de la norme NA 442 (EN 197-1), régissant les caractéristiques des ciments courants.

Ce projet vise ainsi à apporter une contribution technique et environnementale à la fabrication d'un ciment plus durable, en s'appuyant sur une démarche expérimentale rigoureuse, tout en répondant aux objectifs de performance, de qualité et de conformité du produit cimentier.

Le taux de substitution est fixé à 20% de la somme des deux ajouts. (7) échantillons de ciment sont préparés dont un est considéré comme échantillon de référence (0%) ajout.

Une fois préparés, les nouveaux ciments sont soumis à des essais de caractérisation chimique, physique et mécanique.

Le mémoire est composé en trois chapitres, le premier chapitre est une analyse de la bibliographie qui sera présentée en deux parties : la première est consacrée à l'industrie du produit ciment (composition, classification, normes, fabrication et hydratation), la deuxième partie est consacrée à une synthèse dans laquelle, on expose les résultats des travaux de recherches qui traitent la valorisation du déchet du verre, béton dans la fabrication du ciment

Dans le deuxième chapitre, la procédure expérimentale utilisée (Préparation des échantillons et le mode opératoire suivi pour la caractérisation de produit final) sera détaillée. Dans le troisième chapitre, nous exposons l'ensemble des résultats des essais de caractérisation réalisés à savoir la caractérisation chimique, physique et mécanique. Ces résultats seront également discutés et comparés avec ceux de l'échantillon de Référence.

INTRODUCTION GENERALE

Pour conclure, le manuscrit se termine par une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus et met en lumière les principaux axes à explorer dans le cadre d'une étude expérimentale future.

CHAPITRE 1 :

Généralités sur les ciments et la valorisation du déchet

PARTIE 1

Généralités sur les ciments

1. Historique :

Dans la préhistoire et au début l'antiquité les maçonneries étaient soit liées à l'argile, soit réalisées sans liant, comme les murs pélagiques de Grèce ou les murs incas [1]. A Babylone, les maçonneries de briques étaient liées au bitume. Les Egyptiens utilisèrent pour les pyramides, notamment, un plâtre grossier produit par cuisson d'un gypse (sulfate de calcium) impur. Les Grecs furent parmi les premiers constructeurs employant la chaux obtenue par cuisson du calcaire (carbonate de chaux). Les Romains se servirent beaucoup de la chaux dans leurs constructions, mais améliorèrent ce liant dès le 1er siècle avant J.-C en l'additionnant de pouzzolane soit naturelle comme les cendres volcaniques actives, soit artificielles comme les briques pilées. Ils obtinrent ainsi un liant hydraulique, appelé ciment romain, qui est en fait intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Celui-ci permit de construire de grands ouvrages hydrauliques, tel le pont du Gard, ou maritimes tels les ports. Aucun progrès ne fut accompli sur les liants pendant le moyen âge, dont les principales constructions-cathédrales doivent leur réussite surtout aux progrès réalisés dans l'art de tailler et d'assembler les pierres. [2]

C'est seulement au XVIIIe siècle, les procédés de cuisson s'améliorent, que des chaux hydrauliques, intermédiaires entre les chaux et les ciments, furent produits. En 1756 l'Anglais Seaton, en mélangeant celles-ci avec des pouzzolanes, obtint un mortier aussi dur que la pierre de portland. Cette élaboration fut reprise par ses successeurs. Ainsi fut introduit progressivement dans le langage l'appellation de ciment portland.

En 1817, le français Louis Vicat, étudiant scientifiquement et non plus empiriquement, comme ses prédécesseurs, les chaux hydrauliques, découvrit les principes chimiques des ciments et défini leurs règles de fabrication. Aussi en est-il considéré comme l'inventeur. [2]

En 1824, l'Anglais Aspidine prit un brevet pour la fabrication d'un ciment de portland mais celui-là comportait encore beaucoup de points obscurs, C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indiqua de façon précise les règles de fabrication de ce produit.

A la fin du XIXe siècle, en France. Le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments ; son œuvre fut perfectionnée et achevée par l'américain Bogue au XXe siècle.

En 1890, on comprit l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente : le ciment alumineux fut découvert par J-Bied, en 1908.

En Algérie, les ciments courants sont produits conformément à la norme NA 442/ 2000 et ceci depuis avril 2001. L'objectif de cette norme est de spécifier la composition, les exigences et les critères de conformité des ciments courants [2].

- Composition de CPJ en Algérie :

Le ciment Portland composé CPJ CEM II/A 42,5 est constitué de :

- Clinker Portland : 80 à 94%.
- Ajouts : 06 à 20% (laitier, pouzzolane, calcaire)

Qu'est-Ce Que Le Ciment ?

2. Le ciment portland :

Selon La Rousse (Larousse, 2017), un ciment est « une matière pulvérulente formant avec l'eau, ou une solution saline, une pâte plastique liante, susceptible d'agglomérer, en durcissant, des substances variées ».

Le ciment est un liant hydraulique artificiel à base clinker (produit par cuisson à 1450 °C) d'un mélange de calcaire (CaCO_3) et d'argile (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) ; Sa réaction avec l'eau (hydratation) forme des cristaux solides, lui conférant ses propriétés mécaniques [3].

Il en résulte le clinker qui, mélangé avec du gypse et éventuellement avec d'autres produits, puis finement broyé, donne le ciment [4].

Figure 1.1: Le ciment Portland.

2.1. Constituants de base :

La composition du ciment Portland, le type de ciment le plus couramment utilisé est principalement basée sur un mélange de **clinker** et d'ajouts (comme le gypse). Voici une décomposition détaillée [5].

2.2. Clinker Portland :

Le clinker est un matériau granulaire semi-fini, produit intermédiaire essentiel dans la

FIGURE 1 **FIGURE 1.1: LE CIMENT PORTLAND.**

fabrication du ciment portland. Il est obtenu par cuisson à très haute température environ 1450 °C d'un mélange de calcaire et d'argile dans un four rotatif [4].

2.3. Composition de clinker avant broyage :

Le clinker formulé doit répondre à certains critères de composition chimique qui sont reportés dans le tableau :

Tableau 1.1 : Composition en oxyde du clinker.

Oxydes	CAO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	SO ₃
Teneur limite (%)	65 à 70	18 à 24	4 à 8	1 à 6	< 5	< 2	< 3

TABLEAU 1 **COMPOSITION EN OXYDE DU CLINKER.**



FIGURE 2 **LE CIMENT PORTLAND.**

3. Composition chimique du ciment portland après broyage :

L'association de ces oxydes par cuisson à une température de 1450°C dans le four donne la formation des quatre phases anhydres présentées dans les deux tableaux suivants [6] :

Tableau 1.2 : Phases anhydres du clinker.

Phase minéralogiques	Notation simplifié	%
Silicate tricalcique	C3S	50 à 75
Silicate bi calcique	C2S	10 à 30
Aluminate tricalcique tétracalcique	C3A	2 à 15
Alumina ferrite Tétracalcique	C4AF	10-13

TABEAU 2 PHASES ANHYDRES DU CLINKER

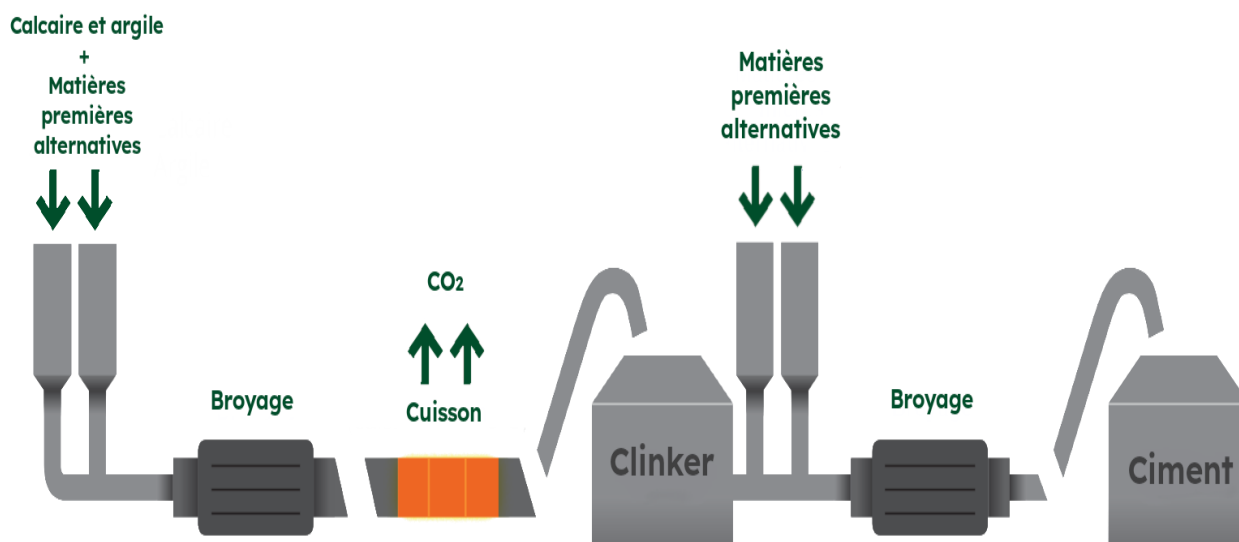


FIGURE 3 COMPOSITION DE CIMENT

Tableau 1.3 : Les caractéristique de chaque phase

Phase	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Formule	3CaO.SiO ₂	2CaO.SiO ₂	3CaO.Al ₂ O ₃	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
Nomenclature	Alite	Bêlait	Phase aluminate	Phase ferrite
Réactivité	Elevé	Faible	Très élevé	Faible

Contribution à la résistance	Forte résistance à jeune âge	Forte résistance à âge très tard	Forte résistance à jeune âge	Très faible
-------------------------------------	------------------------------	----------------------------------	------------------------------	-------------

TABLEAU 3 LES CARACTERISTIQUES DE CHAQUE PHASE

4. Les ajouts cimentaires :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore au clinker afin de produire un ciment composé. Ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui en présence d'eau peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment.

On de la définition technique les ajouts cimentaires sont des matériaux fins, généralement d'origine naturelle ou industrielle qui sont incorporés au ciment pour en modifier les propriétés physiques, chimique ou mécanique. Ils peuvent être utilisés soit comme complément partiel du clinker dans la fabrication du ciment soit comme adjuvant directement ajouté au béton lors du malaxage [7].

Ces ajouts jouent un rôle dans l'optimisation des performances du ciment, notamment en termes de durabilité de résistance mécanique de tra valabilité et de réduction de l'impact environnemental.

4.1. Classification des ajouts minéraux :

Selon la norme (ENV 2006) paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux sont classés en actifs telles que la fumée de silice et la pouzzolane naturelle et inertes telles que le calcaire.

4.2. Les ajouts pouzzolaniques (active) :

4.3. Les pouzzolanes [8] :

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels (d'origine volcanique) ou artificiels capables de réagir en présence de l'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux stables peu soluble dans l'eau et possédants des propriétés liantes, elles sont essentiellement composées de silice SiO_2 , d'alumine et d'oxyde de fer.



FIGURE 4 POUZZOLANE NATURELLE

5. Propriété et caractéristique pouzzolane :

Les pouzzolanes sont des roches (acides) ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80%) pour les deux composants ensemble) puis en alcalins, en magnésie et en chaux.

5.1. Fumée de silice [9] :

Ce sont des particules sphériques très fins ayant une très haute teneur en silice (85%), issu de l'industrie de fabrication de silicium (le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours), le quartz est réduit en présence de carbone.



FIGURE 5 LA FUMEE DE SILICE EN POUVRE

Les caractéristiques très particules de la fumée de silice en font un produit très réactif à l'état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler.

Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

5.2. Le laitier de hauts fourneaux [10] :

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.



FIGURE 6 LE LAITIER DU HAUT FOURNEAU EN POUDRE



FIGURE 7 LE LAITIER DU HAUT FOURNEAU EN POUDRE

D'un point de vue chimique (**Tableau1.4**), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Tableau 1.4: Composition typique de laitier du haut fourneau

Oxydes	Laitier français	Laitier USA	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CAO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4	0.3 à 20	2.0
MgO	6	3 à 12	4.7
S	1.5	-	0.15

TABLEAU 4 : COMPOSITION TYPIQUE DE LAITIER DU HAUT FOURNEAU

5.3. Les cendres volantes [11] :

Sont des particules très fines récupérés par les systèmes des gaz des chaudières des centrales thermiques, Cependant, la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup. D'une façon générale l'introduction des cendres volantes dans béton diminue la sensibilité du béton aux la cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable.

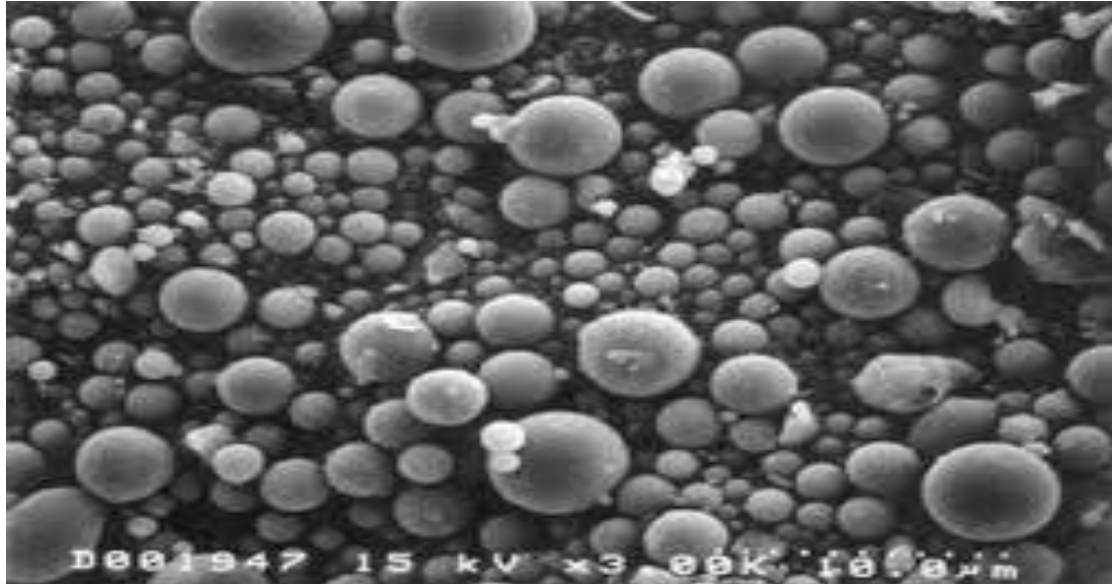
**FIGURE 8 LES PARTICULES DES CENDRES VOLANTES**



FIGURE 9 LES CENDRES VOLANTES EN POUDRE

5.4. La poudre de verre [12] :

Il existe un autre ajout, qu'on qualifiera d'alternatif, constitué la poudre de verre. Cette dernière est obtenue en broyant à une certaine finesse le verre récupéré des différentes décharges.

Lorsqu'il est incorporé au béton 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. Ce nouveau matériau cimentaire sera décrit avec plus de détails dans les chapitres qui suivront.

. Cette poudre de verre est l'objet de l'étude de ce projet

6. Les ajouts inertes [13] :

Ce sont des matériaux quasiment inertes organique naturelle ou synthétique qui par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment portland. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les poussières.

6.1. La poussière [14] :

La poussière est une matière à particule fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée.

Le ciment composé de poussières des caractéristiques mécanique meilleurs à celle de ciment sont

Fillers calcaires [13] :

Selon la norme NF EN 12620 [12], les fillers sont des granulats de taille inférieure à 0,063mm. L'utilisation des fillers dans des dosages appropriés dans la formulation des bétons permet d'améliorer les propriétés d'écoulement du béton frais et les résistances mécaniques du béton durci.



FIGURE 10 FILLER CALCAIRE

Les fillers se différencient uns des autres par :

- Leur origine, leur composition chimiques et minéralogique.
- Leur défaut de structure, impuretés qu'il contienne, leur finesse, la formées grains, leur état de surface.
- Leur dureté, les différents résultats montre que les fillers calcaires ajoutés un rôle chimique, physiques conduisissent à l'accélération de l'hydratation du C_3S et C_3A età la formation de carboaluminates.

Principaux Procédés Et Méthodes De Fabrication De Ciment :

La fabrication de ciment est un processus industriel complexe qui transforme des matières premières naturelles en un liant hydraulique utilisé dans la construction, il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : la voie sèche, semi sèche, semi humide et humide.

6.2La voie sèche :

La fabrication de ciment par voie sèche est la méthode le plus répandu aujourd'hui (environ 80% de la production mondiale), car elle est plus économe en énergie que la voie humide (le tableaux)

Voici les étapes clés et les spécificités de ce procédé :

Les matières premières sont concassé broyé et séchés pour obtenir une poudre fine appelé Cru, le mélange est stocké dans des silos équipés de système d'homogénéisation (air comprimé ou mélangeurs mécanique) pour garantir une composition chimique uniforme avant cuisson. Le cru passe par une tour de préchauffage à cyclones (4 à 6 étages) où il est chauffé par les gaz chauds du four (économie d'énergie). La poudre obtenue passe ensuite dans des fours le plus souvent constitués de deux parties : une partie verticale (préchauffer) où elle se décarbonate et arrive ainsi vers 1000° dans un four rotatif court (60 à 80 mètres de longueur). (Un four de 4 mètres de diamètre et 70 mètres de longueur a une production de 2500 tonnes/jours) après le clinker incandescent est refroidi à $100C^\circ$ dans un refroidisseur à grille (pour préserver ses propriétés), à la fin le clinker est broyé avec 5% de gypse(formule) pour réguler la prise, et d'autres ajouts minéraux (laitier, cendres, pouzzolane (pour réduire l'empreinte carbone). Le ciment est stocké en silos avant d'être conditionné en sacs ou livré en vrac [2].

Tableaux 1.5 : comparaison avec la voie humide.

Critère	Voie Sèche
Energie	3000 à 3500 KJ /Kg de clinker
Eau utilisée	Très faible
Emissions de CO ₂	Plus faible

TABLEAU 5 COMPARAISON AVEC LA VOIE HUMIDE.

6.3. En voie semi sèche :

La voie semi sèche est un procédé intermédiaire entre la voie sèche et la voie humide ; elle est surtout utilisée lorsque les matières premières contiennent une humidité naturelle élevée, La poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée dans une chambre « Grille LEPOL » puis dans le four [2].

6.4. Comparaison des procédés :

Tableaux 1.6 : comparaison des procédés

Critère	Voie semi sèche	Voie sèche	Voie humide
Teneur en eau	10-20%	INF1%	30-40%
Energie	3500/4000 KJ/Kg clinker	3000/3500KG/Kg	5000/6000KJ/Kg
Utilisation	Cas spécifique	Standard moderne	Historique, en déclin

TABLEAU 6 COMPARAISON DES PROCEDES

6.5. En voie semi-humide :

La pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru [15].

6.6. En voie humide :

La voie humide est l'un des plus anciens procédés de fabrication du ciment, Elle est aujourd'hui progressivement remplacée par la voie sèche (Plus économe en énergie), mais reste utilisée dans certaines régions où les matières premières sont très humides ou lorsque la cimenterie est ancienne [15].

6.7. Principe de la voie humide :

Les matières premières (Calcaire et argile) sont broyées et mélangées avec l'eau pour former une bouillie liquide contenant 30 /40% d'eau, cette bouillie est ensuite déshydratée partiellement avant d'être introduit dans un four rotatif long pour la cuisson et alors la consommation d'énergie est plus élevée que la voie sèche en raison de l'évaporation de l'eau [16].

7. Processus de fabrication de ciment :

7.1. Les Etapes De Fabrication Du Ciment

Les opérations suivantes sont communes à tous les procédés [2] :

- Extraction des matières premières,
- Stockage et broyage des matières premières
- Cuisson pour obtention du clinker,
- Broyage du clinker et d'additifs pour obtenir le ciment

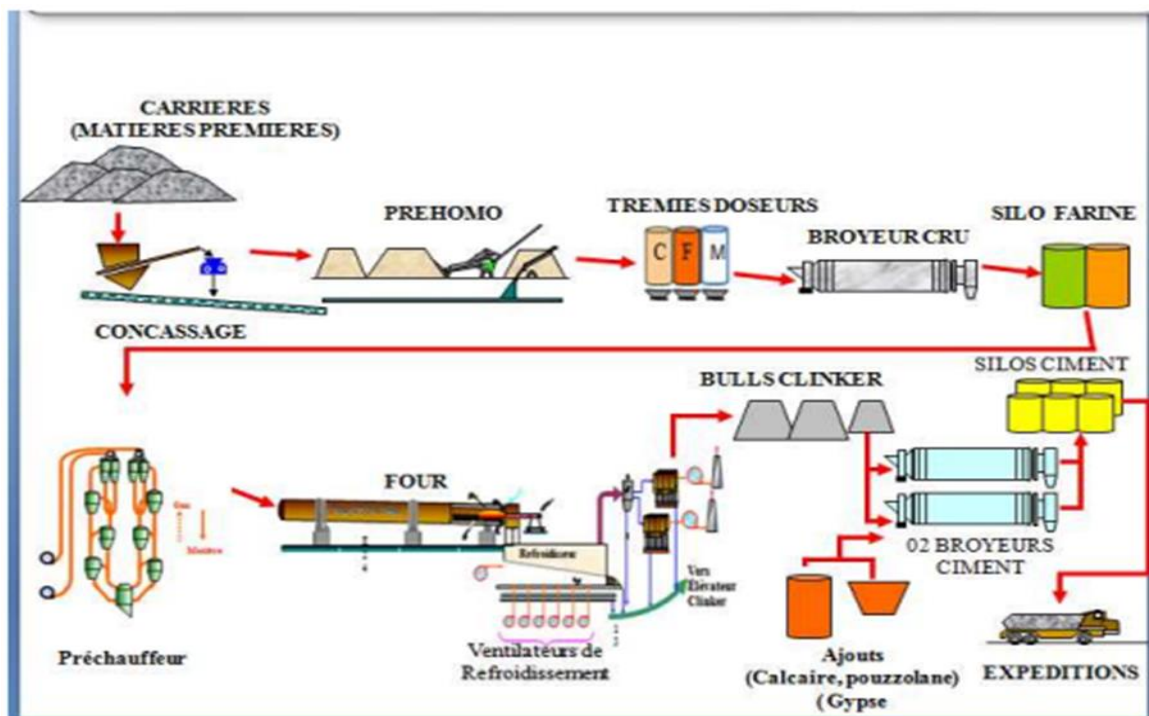


FIGURE 11 SCHEMA DE LA FABRICATION DU CIMENT

7.2. Extraction des matières premières :

Les principales matières premières utilisées sont le calcaire, c'est-à-dire de source de carbonate de calcium (CaCO_3) est extrait par des engins mécaniques et transporté en cimenterie et l'argile apporte la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de fer (Fe_2O_3), un mélange homogène de calcaire et d'argile est réalisé avec des proportions qui sont déterminées selon leur composition chimique et sont toujours proches de 80% de calcaire et 20% d'argile. Le concassage fait sur les lieux de l'extraction réduit la granulométrie des matériaux à environ 50 mm.

7.3. Stockage et broyage des matières premières :

Le mélange de calcaire et d'argile est broyé finement en une poudre de granulométrie inférieure de 200 µm et mélangé dans des proportions précises pour former le **Cru** en une poudre.

7.4. Cuisson pour obtention du clinker :

Le cru est introduit dans un four rotatif (long cylindre incliné à 3-4% et tournant sur lui-même) chauffé à 1450-1550°C. Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions

Physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker.

Décarbonation (700-900°C) : le calcaire se décompose en chaux vive (CAO) et CO₂ ;

Formation de silice (1200°C) : Réaction entre la chaux, la silice et l'alumine pour former des clinkérisés.

Clinkérisation (1450°C) : Formation des minéraux du clinker (alite, Bêlait, alumine ferrite).

Le produit sortant du four est le clinker sous forme de granules grisâtres.

7.5. Broyage du clinker pour obtenir le ciment :

Le clinker est broyé très finement avec gypse pour la régulation de prise du ciment en retardant la réaction d'hydratation et des éventuels ajouts comme les laitiers ; cendres volantes, pouzzolane. Ce broyage se fait dans un broyeur à boulets ou broyeur vertical le ciment est stocké dans des silos avant d'être expédié.

7.6. Control de qualité :

Tout au long du processus, des analyses chimiques et physiques sont réalisées pour garantir

- La finesse de broyage.
- La résistance mécanique.
- La composition minéralogique.

Conclusion : La fabrication de ciment est une succession d'étapes précises, alliant haute température et chimie des matériaux. Les innovations visent à réduire son empreinte carbone tout en maintenant ses performances [2].

8. Différents Types Et Classification Des Ciments :

8.1. En fonction de leur composition :

Les ciments constitués de clinker et des constituants énumérés précédemment sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P 15-301 et ENV

197-1. Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [15] :

- CEM I : Ciment portland artificiel (CPA),
- CEM II : Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC)

Le Tableau 1.7 : Les différents types de ciment courants

Désignation	Type de ciment	Teneur en clinker	Teneur (%) de l'un des constituants suivants : laitier pouzzolane- cendre - calcaires – schistes - fumée de silice	Matière secondaire
CPA – CEMI	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5 %
CPJ - CEMII/A CPJ - CEMII/B	Ciment Portland composé	80 à 94 % 65 à 79 %	<ul style="list-style-type: none"> • De 6 à 20 % de l'un quelconque de constituant • De 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus 	0 à 5 % 0 à 5 %
CHF-CEMIII/A CHF-CEMIII/B CHF-CEMIII/C	Ciment haute fourneau x	35 à 65 % 20 à 34 % 5 à 19 %	<ul style="list-style-type: none"> • 36 à 65 % de laitier de haut fourneau • 66 à 80 % de laitier de haut fourneau • 81 à 95 % de laitier de haut fourneau 	0 à 5 % 0 à 5 % 0 à 5 %
CPS-CEMIV/A CPS- CEMIV/B	Ciment de haut fourneau	65 à 90 % 45 à 64 %	<ul style="list-style-type: none"> • 10 à 35 % de pouzzolane, cendre siliceuse ou fumée de silice. Ces derniers étant limités à 10 % • 36 à 55 % comme ci -dessus 	0 à 5 %

TABLEAU 7 LES DIFFERENTS TYPES DE CIMENT COURANTS

8.2. En fonction de leur résistance normale :

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous classes

“R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du Tableau 1.4. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées [17].

Tableau 1.8 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe

Classe de résistance	Résistance à la compression Mpa			Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	a		Résistance courante		
	Résistance court terme			Min	Min
	2 jours	7 jours	28 jours		
32.5 L ^{a)}	-	≥ 12.0	≥ 32.5	≤52.5	≤ 10
32.5 N	!:mmk -	≥ 16.0		≥75	
32.5R	≥ 10.0	-			
42.5L ^{a)}	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤62.5	≤ 10
42.5N	≥ 10.0	-		≥60	
42.5R	≥ 20.0	-			
52.5L ^{a)}	≥ 10.0	-	≥ 32.5	-	≤ 10
52.5N	≥ 20.0	-		≥45	
52.5R	≥ 30.0				

a) classe de résistance uniquement définie pour les ciments CEM III

TABLEAU 8 SPECIFICATION ET VALEURS GARANTIES EN FONCTION DE LA CLASSE

9. UTILISATION DES DIFFERENTS TYPES DE CIMENTS :

Tableau 1.9: Utilisation du ciment des ciments courants

Ciment	Utilisation
CEM I	Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué. Béton précontraint. Décoffrage rapide, mise en service rapide (de préférence classe R) Bétonnage jusqu'à une température extérieure entre 5 et 10° C. Béton étuvé ou auto-étuvé.

<p>CEM II / A ou B</p>	<p>Ces ciments sont les plus couramment utilisés CEM II/A ou B classe R : travaux nécessitant une résistance initiale élevée (décoffrage rapide par exemple). Béton en élévation, armé ou non, d'ouvrages courants. Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs. Dallages, sols industriels. Maçonneries. Stabilisation des sols.</p>
<p>CEM III / A, B Ou C CEM V / A ou B</p>	<p>Travaux souterrains en milieux agressifs (terrains gypseux, eaux d'égout, eaux industrielles...). Ouvrages en milieux sulfatés : les ciments utilisés sont tous ES, ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, en conformité à la norme NF P 15319. Travaux à la mer : les ciments utilisés sont tous PM, ciments pour travaux à la mer, en conformité à la norme NF P 15-317. Bétons de masse. Travaux en béton armé ou non, hydrauliques et souterrains (fondations). Travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation. Stabilisation des sols.</p>

TABLEAU 9 UTILISATION DU CIMENT DES CIMENTS COURANTS

9.1. Autres Types De Ciments :

9.2. Ciments résistants aux sulfates : (C.R. S) :

La teneur en C_3S ne doit pas dépasser 50%, celle du C_3A 5% et la somme de C_3A et C_4AF ne doit pas être supérieure à 22% [15].

9.3. Ciments blancs :

Ces ciments sont obtenus à partir des matières premières contenant le moins possible d'oxydes colorants (oxyde de fer, de manganèse, de chrome, de titane ...etc.)

Ces matières sont des calcaires, des craies ou des marbres purs, des argiles Kaoliniques blanches. Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents [15].

9.4. Ciments colorés :

Ces ciments sont obtenus par addition au clinker blanc de colorants minéraux résistants à la lumière et aux alcalis au cours du broyage ciment. On peut citer le bleu d'outre-mer, l'oxyde de chrome, le noir de fumée etc. [15].

9.5. Ciments alumineux :

Le ciment alumineux est un liant hydraulique prompt obtenu par la cuisson d'un mélange de bauxite et de chaux. Ces ciments sont fabriqués sans ajouts ou parfois en quantité très limitées 2% au maximum pour améliorer certaines de leurs propriétés. Ils sont utilisés pour les travaux

nécessitant l'obtention, dans un délai très court, de résistances mécaniques élevées (poutres et linteaux pour le bâtiment, sols industriels, etc.)

9.6. Ciment à maçonner

Ce ciment contient en proportions moindres les mêmes éléments actifs que le ciment portland artificiel ; ses propriétés et son comportement dans les milieux courants sont analogues à ce dernier. Mais ses résistances sont moins élevées que celle de ce produit. Ils conviennent bien pour la confection de mortiers utilisés dans les travaux de bâtiment (maçonnerie, enduits, crépis, etc.). Ils peuvent également être employés pour la fabrication ou la reconstitution de pierres artificielles [15].

CHAPITRE 1

**Généralités Sur Les Ciments Et La
Valorisation Du Déchet.**

PARTIE₀₂

Valorisation de déchet (Verre, béton)

1. Définition Des Déchets :

Le problème des sous-produits et déchets industriels est l'un des problèmes majeurs de notre civilisation industrielle, et l'avenir même de cette civilisation est largement conditionné par les solutions que nous pourrions apporter à ce problème. A cet effet, les travaux de Génie Civil, présentent des possibilités intéressantes pour la valorisation de ces sous-produits et déchets qui doivent être exploitées en profondeur. Dans ce qui suit, on expose d'abord les déchets (notion, classification, gestion des déchets), puis on abordera les résultats des études scientifiques menées sur la valorisation des déchets de verre, béton et plus particulièrement dans l'industrie cimentaire

Le déchet est défini, d'après la loi Algérienne N°01-19 du 12/12/2001, comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation. Toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur est destiné à l'abandon ». Cependant, la notion de déchet est parfois ambiguë car ce qui est considéré comme déchet pour une personne, peut être considéré comme matière première pour une autre. Seuls les déchets ultimes sont réellement inutilisables et doivent être stockés pour éviter des pollutions de l'environnement [18].

2. Classification Des Déchets :

Les déchets sont généralement classés en fonction de leur provenance et de leur dangerosité.

Le **Tableau1.2.1**: Donne un exemple de chaque classe.

		Déchets dangereux (I)	Déchets non dangereux (II)	Déchets inertes (III)
Déchets Ménagers	Ordures ménagères (OM)		Ordures ménagères Résiduelles (OMR)	Verre
			Déchets recyclables	Plastique non recyclable
Déchets Ménagers Occasionnels	Déchets ménagers Spéciaux : déchets toxique et déchets toxique en quantité dispersée		Déchets verts	Encombrants en métal et en plastique
			Textile (non souillé)	
			Encombrants en bois	
			Pneus	
			Carcasses de voitures	
Déchets industriels	Déchets industriels spéciaux : déchets des activités de soins à risque infectieux (DASRI), déchets		Déchets assimilables aux déchets ménagers	Déchets du bâtiment et travaux publics
			Déchets industriels banals	
			Boues d'assainissement	

	d'amiante, déchets toxique et déchets toxique en quantité dispersée		
--	--	--	--

TABLEAU 10 DONNE UN EXEMPLE DE CHAQUE CLASS

3. Gestion Des Déchets

La gestion des déchets consiste en la détermination du type de traitement à appliquer à telle ou telle autre catégorie des déchets. La question de la gestion des déchets constitue un défi majeur pour tous les pays, plus particulièrement ceux en voie de développement, car ses effets sont fortement visibles par tous. La priorité en matière de gestion des déchets est la réduction à la source : cela consiste à en produire le moins possible, voire pas du tout. Dès lors que le déchet est produit, une hiérarchie des modes de traitement s'impose, justifiée par la finalité suivante : valoriser tout ce qui peut l'être afin de réduire le gaspillage des ressources sans porter atteinte à l'environnement et à la santé. En respectant les principes généraux suivant :

- réduction à la source de la quantité et de la toxicité des déchets produits,
- recyclage ou valorisation des “ sous-produits ” de la fabrication,
- prétraitement ou traitement interne ou externe enfouissement

Le recyclage est l'un des procédés de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement, par incinération ou autre moyen. IL est défini comme la récupération de matériaux utiles, tels que le papier, le verre, le plastique et les métaux, ainsi que la transformation des matériaux, pour fabriquer de nouveaux produits afin de réduire la quantité de matières premières vierges nécessaires pour répondre aux demandes des consommateurs [18].

4. Valorisation Déchet De Verre :

4.1. Définition de verre :

Le verre, dans le langage courant, désigne un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent au rayonnement visible. Le plus souvent, le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2) et de fondants, le constituant principal du sable.

De manière scientifique, le verre est défini comme un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. En dessous de cette température de transition qui est très élevée, le verre se présente à l'état vitreux.

Il est un matériau fragile et transparent. De côté scientifique, il semble plus difficile à définir avec précision mais généralement on peut dire que le verre est un solide non cristallin, amorphe aux rayons X c'est-à-dire comme celle d'un liquide figé, il possède une structure désorganisée dépourvue d'ordre à longue distance et n'y a aucune périodicité dans l'arrangement des atomes. Autrement dit, le verre est un solide obtenu par trempe d'un liquide surfondu [18].

4.2. Structure du verre :

4.2.1. Composition chimique du verre :

La composition chimique du verre dépend de ces éléments et leurs caractéristiques. En générale sa composition est celle présentée sur le Tableau

Tableau 1.2.2 : Composition chimique du verre [19]

Sable (SiO ₂)	68 à 74%
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	12 à 16%
Chaux (CaO)	7à14%
Potasse (K ₂ O)	1%
Alumine (Al ₂ O ₃)	0.3 à3%
Oxyde d’antimoine (Sbo)	0.3à3%

TABLEAU 11 COMPOSITION CHIMIQUE DU VERRE [19]

4.2.2. Structure vitreuse du verre :

La Figure 1.13. Présente un DRX sur une particule de verre qui présente un halo montrant la phase amorphe de ce matériau [19].

Par verre, on désigne « un solide non cristallin, présentant le phénomène de transition vitreuse ». Cette définition est plus générale, elle englobe les matériaux amorphes, c’est-à-dire les matériaux obtenus par refroidissement, mais exclut les matériaux non cristallins qui n’ont pas la stabilité interne requise [20]

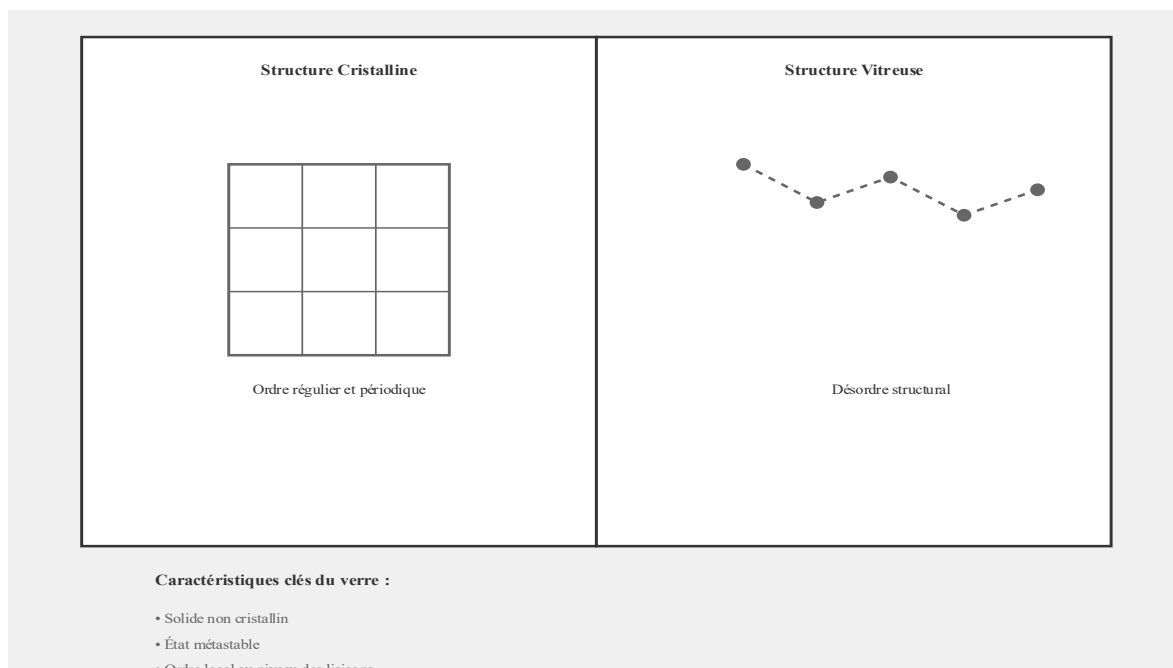


FIGURE 12 SCHEMA STRUCTURE VITREUSE DE VERRE [20]

En effet, l'état vitreux est un état solide métastable, qui peut présenter un ordre au niveau des Liaisons interatomiques mais qui est désordonné, tout comme les liquides, à plus grande Échelle [21].



FIGURE 13 TRANSFORMATION DE DECHETS DE VERRE EN POUDRE DE VERRE [21]

4.2.3. Utilisation de la poudre de verre comme substituant du ciment :

Nous sommes intéressés dans le présent travail à l'utilisation de la poudre de verre comme Ajout. Pour cette raison, nous allons exposer seulement les résultats des travaux traitant la Valorisation de cette poudre dans le béton, le mortier, et ciment.

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de Silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. En Effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans Le ciment sa suscité l'intérêt d'innombrables décideurs et ceux-ci ont encouragé de nouvelles Etudes. Son utilisation dans les matrices cimentaires peut entraîner deux effets secondaires [22]. L'opposé : la réaction alcali silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère, Et la réaction pouzzolanique qui est bénéfique.

4.2.4. Bénéfices de l'intégration de la poudre de verre comme ajout cimentaire

- Meilleure imperméabilité ;
- Durabilité accrue à long terme ;
- Matière de couleur blanche à l'état naturel ;
- Amélioration du bilan de carbone en favorisant la valorisation de matériaux recyclables ;
- Proximité de la source d'approvisionnement ;
- Accroissement de la résistance en compression à moyen terme [23].

5. Les déchets de béton dans la production du ciment :

5.1. Introduction :

Le béton appartient à la catégorie des déchets inertes ou de chantier. Les bétons se composent de granulats comme le sable, d'un liant hydraulique (le plus souvent du ciment) et d'eau. Aujourd'hui, différents types de bétons existent et varient selon l'usage souhaité. Économique et résistant, ce matériau est devenu incontournable dans le secteur de la construction. Employé dans le bâtiment (privé ou BTP), la voirie et la réalisation d'ouvrages d'art, il se hisse au premier rang mondial des matériaux de construction.

Même si une loi de 1906 règlemente les volumes des composants du béton, **il reste un très grand consommateur d'eau et de sable**. Et il compte pour 5 % des émissions de CO₂ dans le monde. Pour autant, une fois réduit en gravats, le béton devient un matériau inerte facilement valorisable. On estime à plus de 6 milliards de m³ de béton consommés chaque année dans le monde au moment des travaux ou sur les chantiers du BTP

5.2. Définition de béton :

Est un matériau de construction formé par l'association de gravillons, de sable, de ciment et d'eau. Ce mélange est mis en œuvre, à l'état plastique, dans un moule appelé coffrage. Après durcissement, le béton se présente sous la forme d'un élément de construction monolithique très résistant (Kummer, 2004). En faisant varier la nature et les proportions des composants, on obtient des bétons aux propriétés et caractéristiques très différentes. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci [22].

5.3. Rôle des différents éléments constituant le béton :

Le béton est un mélange de ciment (liant), d'eau (hydratation), de gravier (résistance) et de sable (remplissage). Le ciment durcit en réagissant avec l'eau, liant les granulats pour former un matériau solide et durable [24].

Ciment : liant hydraulique essentiel, réagit avec l'eau pour former une pâte durcissant. Celle-ci enrobe le sable (remplissage des vides) et les graviers (structure porteuse), créant ainsi la matrice solide du béton.

• **L'eau** : la réaction d'hydratation du ciment débute, transformant le mélange en une pâte liante. Cette pâte enrobe progressivement les granulats (sable et graviers), solidifiant l'ensemble pour former le béton durci.

Gravier : la structure granulaire se forme : les graviers (5-20 mm) créent l'armature mécanique, tandis que le sable comble les vides entre eux. Le mélange ciment-eau, désormais actif, enrobe cette ossature pour figer la résistance finale du béton.

- **Le sable** : il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.

5.4. Utilisation de béton comme substituant du ciment

L'utilisation du béton comme substitut du ciment

Dans les mortiers ou les bétons à base de ciment, le béton peut être utilisé comme addition dans les mélanges en tant que charge calcaire. Il peut également remplacer directement une partie du clinker dans la fabrication d'un composite de ciment.

La réutilisation des déchets de béton comme additif dans l'industrie du ciment est une pratique qui vise à réduire les déchets tout en améliorant l'utilisation des ressources. Les déchets de béton peuvent être recyclés en granulats, qui peuvent ensuite être utilisés dans de nouveaux mélanges de béton. Cependant, leur utilisation pose certains défis, notamment en raison du changement des propriétés mécaniques et de durabilité du béton avec la porosité et l'absorption des granulats recyclés.

Les déchets de béton ne sont généralement pas ajoutés directement dans le ciment en tant qu'additifs. Ils sont utilisés davantage comme granulats dans le béton. Cependant, certains sous-produits tels que les cendres volantes peuvent être utilisés pour remplacer une partie du clinker utilisé dans le ciment, ces additifs peuvent aider à améliorer l'utilisation de matériaux recyclés en modifiant les propriétés du béton pour le rendre plus durable[24].

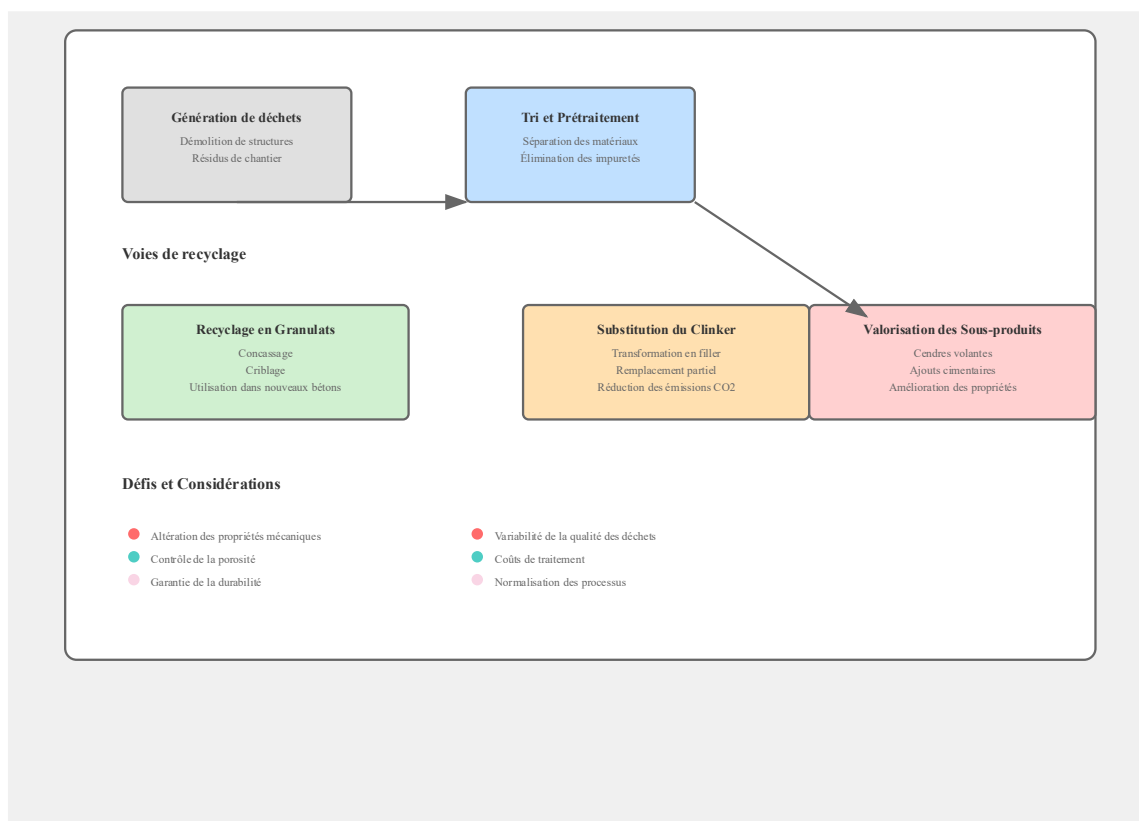


FIGURE 14 CYCLE DE REUTILISATION DES DECHETS DE BETON DANS L'INDUSTRIE CIMENTAIRE

CONCLUSION :

Ce chapitre a été consacré à une brève recherche bibliographique relative aux caractéristiques des ciments et déchets de verre, déchets de béton .

Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, nous devons accorder beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton. Les déchets et les sous-produits peuvent être utilisés comme constituant principal du clinker ou comme granulats pour le béton.

Chapitre 2 :

Matériaux et procédures expérimentales

1. Présentation d'entreprise (E.C.D.E) :

Dans ce deuxième chapitre, on présentera les essais de caractérisation effectués sur les ciments élaborés. Ces essais qui ont été conduits conformément aux différentes normes Algériennes et Européennes, sont réalisés dans le laboratoire du contrôle continu de cimenterie de wilaya de chlef (ECDE) est située dans la zone industrielle d'Oued Sly .

La société CHLEF CIMENT est une entreprise de fabrication et ventes des ciments au capital social de 6 241 000 000 DA dont l'objectif de cette entreprise en premier lieu consiste à satisfaire le marché national d'un produit local tout en permettant un accès stable, aux matériaux de construction en termes de qualité, de choix, de services à des prix abordables.

Et en deuxième lieu d'ouvrir des marchés internationaux. La cimenterie possède 02 lignes de productions avec une capacité totale de 04 millions T/an.



FIGURE 15 E.C.D.E

1.2.Organigramme de la direction usine

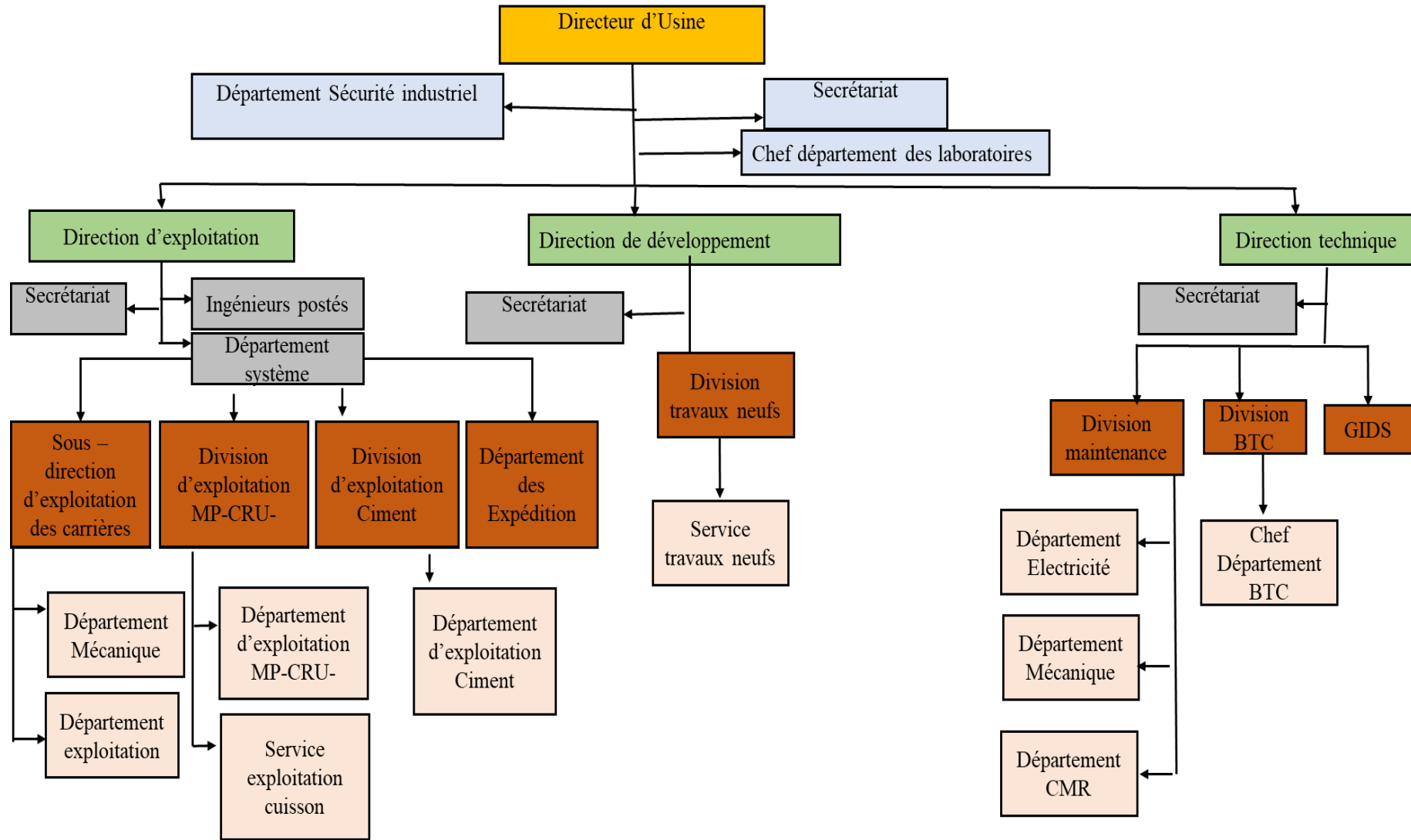


FIGURE 16 .ORGANIGRAMME DE LA DIRECTION USINE

2.2.3. Organigramme de la direction general

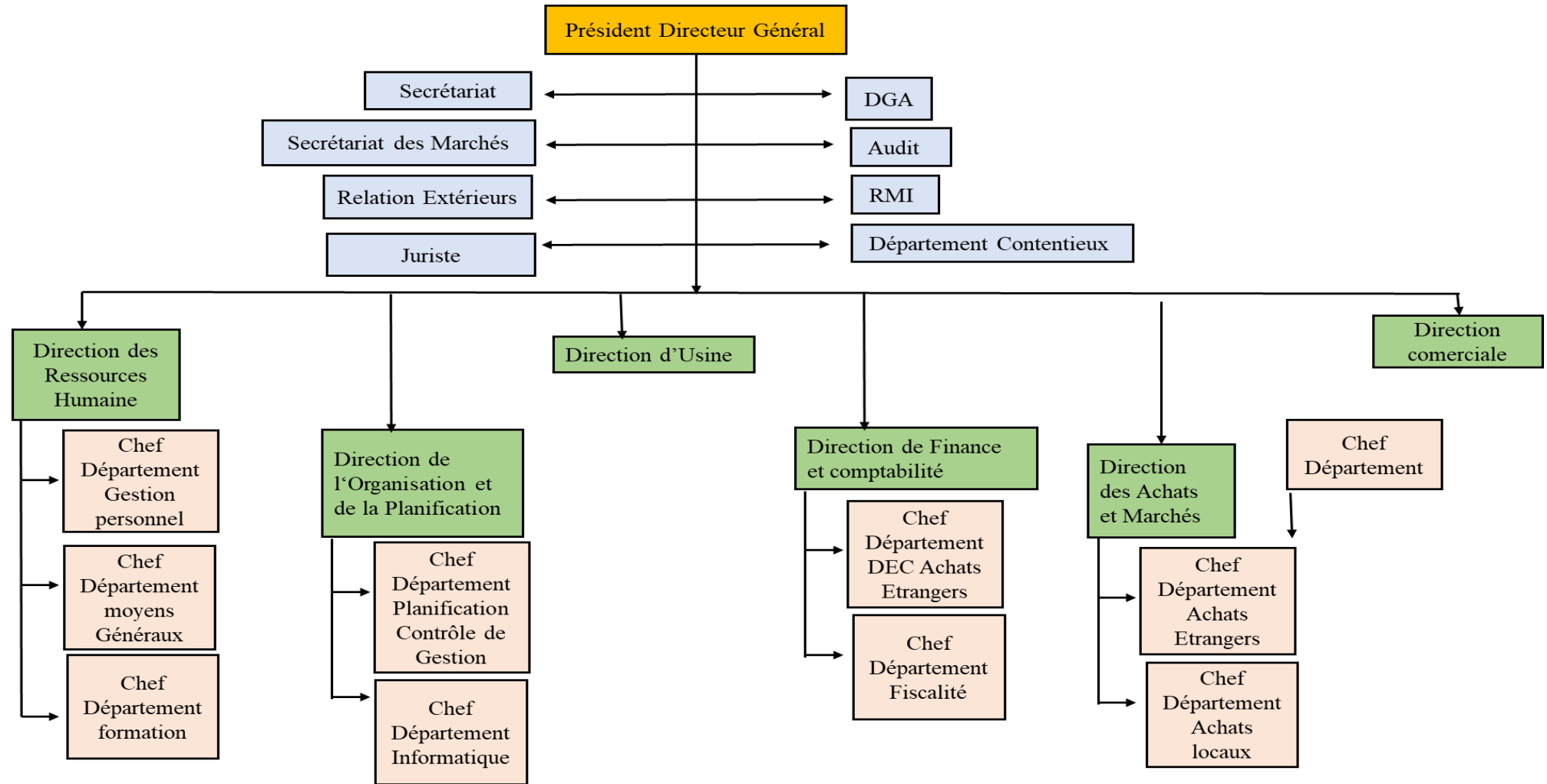


FIGURE 17 ORGANIGRAMME DE LA DIRECTION GENERAL

2. PREPARATION DES NOUVEAUX CIMENTS :

Les nouveaux ciments sont obtenus en remplaçant une partie du clinker par la poudre issue du broyage de déchets de verre et de béton

La poudre utilisée pour remplacer une partie du ciment provient de deux sources de déchets : d'une part, du verre broyé provenant de la nouvelle verrerie de Chlef (NOVER), collecté sous forme de verre concassé prêt à être fondu, et d'autre part, des résidus de béton issus du broyage de matériaux de construction à Mostaganem.

Ces déchets sont soumis à un nettoyage, un séchage, un concassage, puis un broyage suivi d'un tamisage avec des mailles comprises entre 45 et 90 micromètres. Les poudres ainsi obtenues sont ensuite incorporées au ciment CEM I.

Après un dosage rigoureux et une homogénéisation complète, un échantillon de ciment est élaboré en intégrant 20 % de ces poudres de déchets.

Ainsi, la composition des ciments développés est la suivante :

80 % de ciment CEM I – CPJ 42.5 R

20 % de poudre de déchets (verre et béton) traités et tamisés

Cette technique permet de produire un ciment composite performant tout en valorisant des déchets industriels locaux, contribuant à une production plus durable.

Tableau 2.1 : Ciment avec poudre de verre

Ciment	EC0	EC1	EC3	EC5
Clinker	95	85	80	75
Gypse	5	5	5	5
Verre	0	10	15	20

TABLEAU 12 CIMENT AVEC POUDRE DE VERRE

Tableau 2.2 : Ciment avec poudre de béton

Ciment	EC0	EC1	EC3	EC5
Clinker	95	85	80	75
Gypse	5	5	5	5
Béton	0	10	15	20

TABLEAU 13 CIMENT AVEC POUDRE DE BETON

Le Tableau (2.1-2.2) regroupe les ciments élaborés et la teneur de chaque constituant. L'utilisation

de la poudre de verre et la poudre de béton dans la fabrication du ciment n'entre pas dans le champ de la norme Algérienne du ciment NA442, (2013) [64], mais il répond à la démarche

environnementale adoptée par les cimentiers pour réduire l'émission des gaz à effet de serre.



FIGURE 19 MATERIAUX UTILISES.



FIGURE 18 BROYAGE DES DECHETS

3. Essais Effectues

3.1. Préparation des mortiers normalisés

Le sable normalisé [un sable naturel, siliceux, le plus quartzeux possible en particulier dans sa partie fine, propre, à grains arrondis et sec, livrée en sacs étanches contenant 1350 g correspondant à la préparation de 3 éprouvettes (4x4x16)cm³ et le ciment à tester sont gâchés avec de l'eau en utilisant les proportions suivantes selon la Norme EN196-1(2016) [25] :

- 450 g \pm 2 g de ciment.
- 1350 g \pm 5 g de sable normalisé.
- 225 g \pm 1 g d'eau potable de robinet.

Le rapport E/C d'un tel mortier est donc 0.50. Avant d'être utilisé pour les différents essais ce mortier est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de (Voir le Tableau 2.2)



FIGURE 20 MALAXEUR POUR LA PREPARATION DU MORTIER NORMALISE.



FIGURE 21 SACHETS DE SABLE NORMALISE



FIGURE 22 MATIERES UTILISEES

Tableau 2.3 : Malaxage d'un mortier normal .

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Introduction du sable			Raclage de la cuve		
			30s	30s	30s	15s	75s	60 s
Durée			30s	30s	30s	15s	75s	60 s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente			Vitesse rapide		Vites rapide

TABLEAU 14 MALAXAGE D'UN MORTIER NORMAL

Avec le mortier normal préparé on remplit un moule (4x4x16) cm³. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Le moule est arasé et vibré. Après 24 h du début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à 20 °C ± 1°C jusqu'au moment de l'essai.

3.2. Essais de caractérisations chimiques

3.2.1. Composition chimiques par fluorescence X

Analyse chimique par spectrométrie de fluorescence X (XRF) permet de déterminer la proportion des différents oxydes présents dans un matériau, tels que SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, Cl-, Na₂O, K₂O, SO₃, ainsi que de calculer des modules et indices spécifiques. Le principe de cette méthode repose sur l'excitation de l'échantillon par un faisceau de rayons X primaires, qui éjecte des électrons des couches internes (principalement K et L) des atomes constituant la matière. Cette ionisation crée un état instable, rapidement compensé par le déplacement d'électrons des couches externes vers les couches internes vacantes. Ce processus génère l'émission de rayons X secondaires, dits de fluorescence, dont les longueurs d'onde sont caractéristiques de chaque élément présent dans l'échantillon. Ces radiations sont ensuite dirigées vers un cristal analyseur qui sépare les différentes longueurs d'onde avant de les envoyer vers un détecteur. La mesure de l'intensité des raies caractéristiques permet d'identifier et de quantifier précisément les éléments tels que Ca, Si, Al, Fe, etc., dans l'échantillon analysé

Tableau 2.4 : Compositions chimiques des matériaux utilisées.

Matériau	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-	PAF%
clinker	21.98	5.35	3.23	66.23	0.81	0.12	0.66	0.17	0.001	0.18

gypse	4,41	1.09	0.53	31.57	0.63	40.63	0.17	0.01	0,003	20.89
Verre	94,42	3,25	0,63	0,15	0,1	0,001	0,14	0,14		0,83
Béton	24.36	1.95	2.36	42.22	0.93	0.18	0.15	0.09	0.001	1.25

TABLEAU 15 COMPOSITIONS CHIMIQUES DES MATERIAUX UTILISEES



FIGURE 23 SPECTROMETRE A FLUORESCENCE X

3.2.2. Perte au feu (PAF)

La perte au feu correspond à la réduction de masse due à l'élimination du dioxyde de carbone (CO₂), de l'eau liée et des matières organiques lors du chauffage. La détermination de la perte au feu a été réalisée en présence d'air (atmosphère oxydante), conformément aux directives de la norme algérienne NA235[26]. La validation de cette méthode s'appuie sur la norme NA442, publiée en 2013.



FIGURE 24 FOUR DE CALCINATION POUR PAF.

3.2.3. Teneur en (CAO) libre

La teneur en chaux libre dans le clinker et les ciments élaborés est déterminée conformément à la norme NA21.



FIGURE 25 ESSAI DE LA TENEUR EN CAO LIBRE



FIGURE 26 LES TAMIS DE 45 ET DE 90 MICROMETRES

3.3. Essais de caractérisations physiques

3.3.1. Détermination du refus :

Cette méthode vise à déterminer la proportion des particules non broyées du ciment après le processus de broyage. Le pourcentage de ces refus est utilisé pour vérifier l'efficacité du broyeur ainsi que le niveau de finesse atteint. En effet, un taux élevé de refus indique un broyage insuffisant, ce qui peut nuire aux caractéristiques du ciment. Cette évaluation permet donc de contrôler et d'ajuster le fonctionnement du broyeur afin d'obtenir une mouture adéquate.



FIGURE 27 LES TAMIS DE 45 ET DE 90 MICROMETRES

- L'appareil Alpine donne automatiquement le pourcentage des refus



FIGURE 28 APPAREIL ALPINE.

3.3.2. Masse volumique absolue des ciments anhydres

Les masses volumiques sont déterminées sur de la poudre de ciment anhydre selon la norme NA2595[27]. La mesure de la masse volumique absolue est réalisée à l'aide d'un densimètre Le Chatelier, en employant l'acétone comme liquide inerte. L'appareil utilisé pour cette opération est présenté dans la Figure 2.8, et la masse volumique absolue est calculée à partir d'une formule spécifique associée à ce dispositif

$$P_{abs} = \frac{M1}{V2 - V1}$$

M1 : Masse de l'échantillon de ciment

V1 : Volume initial de l'Acétone

V2 : Volume après l'introduction de l'échantillon de ciment.



FIGURE 29 MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES CEMENTS.

3.3.3. Masse volumique apparente des ciments anhydres

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume y compris les vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 1097-3[28].

L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume connu de matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau. On calcule la valeur de la masse volumique par le

rapport : $\rho = M/V$ (g/cm^3).



FIGURE 30 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES CIMENTS ANHYDRES

3.3.4. Mesure de la surface spécifique de blaine (SSB) des ciments

La finesse de mouture de la poudre de ciment est déterminée à l'aide du perméabilimètre de Blaine, comme montré à la Figure 2.10. Cette méthode, dont le principe et la description détaillée sont définis par la norme EN 196-6, consiste à mesurer la surface spécifique du ciment en évaluant le temps nécessaire à un volume d'air constant pour traverser un lit compacté de ciment. Cette mesure reflète la finesse des particules et permet de contrôler la qualité du broyage du ciment [29].



FIGURE 31 APPAREIL DE BLAINE (SSB).

3.3.5. La consistance normalisée :

La consistance normalisée caractérise la propriété rhéologique des pâtes.

Elle est déterminée par la méthode décrite par la norme NFP.15.402 [30] et consiste en la détermination de la quantité d'eau qui il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte de ciment normale.



FIGURE 32 APPAREIL DE VICAT

3.3.6. Préparation la Pâte normale :

Verser dans le récipient du malaxeur la quantité d'eau préalablement déterminé par des successifs de manière à réaliser la consistance normale. Lui ajoutes 500g de ciment dans le moule tronconique.

3.3.7. Essai de prise

Le temps de début de prise correspond approximativement au moment où la pâte de ciment cesse d'être humide et commence à se comporter comme un solide doté d'une certaine résistance mécanique. La fin de prise marque la transformation progressive et régulière de la pâte en un bloc dur.

Cet essai, réalisé conformément à la norme NA230[31], utilise l'appareil de Vicat (voir Figure 2.12) dans une enceinte dont la température est maintenue à 24 ± 3 °C. Une aiguille de 1,13 mm de diamètre, fixée à une tige mobile pesant au total 300 g, est enfoncée dans une pâte de ciment pure contenue dans un moule tronconique de 40 mm de hauteur.

Le temps de début de prise est enregistré lorsque l'aiguille s'arrête à une distance de 4 ± 1 mm de la plaque de base plane, indiquant que la pâte commence à durcir. La fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne pénètre plus dans la pâte, ce qui signifie que la pâte s'est transformée en un matériau rigide.

-Début de prise :

Le début de prise est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant du début de gâchage et celui où l'aiguille de Vicat s'arrête à une distance du fond du moule supérieur à $4 \text{ mm} \pm 1$.

-Fin de prise :

C'est la période qui sépare le début de gâchage de ciment jusqu'au moment où la sonde porte-aiguille ne s'enfonce plus la pâte.

NB : L'essai de prise est normalement effectué sur pâte normale, il est exécuté sur moule



FIGURE 33 APPAREILLE DE LA PRISE



FIGURE 34 PR ISOMETRE (VICAT AUTOMATIQUE).

3.4. Essai d'expansion :

Définition :

L'essai d'expansion, défini notamment par la norme EN 196-3, permet d'évaluer la stabilité dimensionnelle d'une pâte de ciment en mesurant son gonflement pendant l'hydratation. Pour

cela, on prépare une pâte de ciment avec une consistance standard, que l'on place dans un moule équipé d'aiguilles de Le Chatelier. Après un chauffage qui accélère l'hydratation, on mesure la distance entre les aiguilles avant et après le traitement, ce qui donne l'expansion volumique de la pâte.

Ce test est important pour s'assurer que l'expansion ne dépasse pas 10 mm, seuil au-delà duquel le ciment pourrait devenir instable et provoquer des fissures dues à un gonflement excessif. L'essai est réalisé dans des conditions contrôlées de température et d'humidité afin d'obtenir des résultats fiables.



FIGURE 35 APPAREIL D'EXPANSION

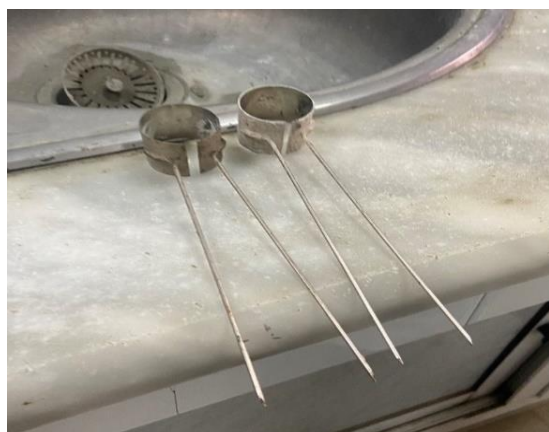
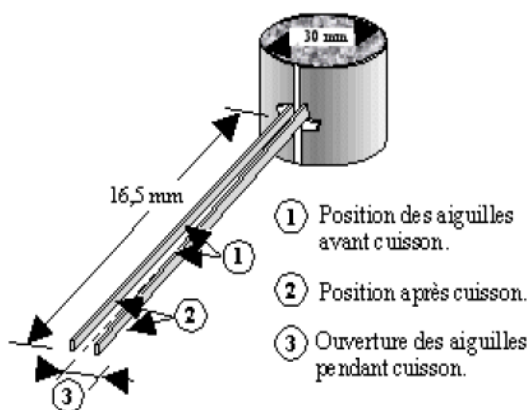


FIGURE 36 AIGUILLE DE CHATIEUR.



3.5. Essais de caractérisations mécaniques

Définition :

Ils ont pour but de mesurer les résistances aux différentes contraintes au bout d'un certain temps.

Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la compression des liants hydrauliques.

Les résistances à la compression et à la flexion ont été évaluées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $4,4 \times 4,4 \times 16 \text{ cm}^3$, fabriquées à partir d'un mortier standard conformément à la norme NA234[32]. Le mélange a été réalisé avec du ciment et du sable normalisé, en utilisant un rapport eau/ciment de 0,5. Le malaxage s'est fait dans un malaxeur vertical d'une capacité de 5 litres, selon les recommandations de la norme NA234[32]. Après le moulage, les éprouvettes ont été compactées à l'aide d'une table vibrante, recouvertes d'un film plastique, puis placées dans une chambre humide à une température contrôlée de $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Après 24

heures, les échantillons ont été démoulés et conservés dans une atmosphère saturée au sein de la même chambre humide pendant des périodes de 28 et 60 jours. Lors des essais, les éprouvettes ont d'abord été soumises à un test de flexion, puis les moitiés obtenues ont été testées en compression. Les valeurs obtenues pour chaque type de ciment correspondent à la moyenne de trois essais.



FIGURE 37 TABLE A CHOCS.



FIGURE 38 APPAREIL FLEXION-COMPRESSION

4. Conclusion :

Les essais physiques, analyses chimiques et mécaniques réalisés dans différents laboratoires fournissent une vision globale des principales caractéristiques des matériaux utilisés pour formuler les mortiers. Ces informations sont essentielles pour l'étude mécanique et physique des mortiers qui sera abordée dans le chapitre suivant. La connaissance précise de ces propriétés permet d'interpréter de manière plus pertinente les résultats des essais expérimentaux, en reliant les comportements observés aux caractéristiques intrinsèques des matériaux constitutifs. Ainsi, ces analyses constituent une base indispensable pour comprendre et commenter les performances mécaniques et physiques des mortiers formulés.

Chapitre 3

Caractérisation des ciments élaboré

1. Résultats Des Essais Réalisés

Dans ce chapitre, les résultats obtenus suite à une série d'essais de caractérisation chimique, physique et mécanique seront présentés, analysés et confrontés à ceux d'un échantillon de référence. Les tests ont été effectués en respectant les normes algériennes en vigueur relatives aux ciments.

La préparation des échantillons de ciment a consisté en un broyage et un tamisage distinct des matières premières (clinker, gypse, poudre de verre et poudre de béton). Une fois les proportions dosées, les composants ont été soigneusement mélangés pour obtenir un mélange homogène avant d'être soumis aux différents tests.

2. Composition Chimique Des Déchets

La composition chimique de la brique, du verre et du béton utilisés déterminée par fluorescence X, est représenté dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition chimique des déchets utilisés.

Matériau	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-	PAF%
clinker	21.98	5.35	3.23	66.23	0.81	0.12	0.66	0.17	0.001	0.18
gypse	4.41	1.09	0.53	31.57	0.63	40.63	0.17	0.01	0,003	20.89
Verre	94,42	3,25	0,63	0,15	0,1	0,001	0,14	0,14		0,83
Béton	24.36	1.95	2.36	42.22	0.93	0.18	0.15	0.09	0.001	1.25

TABLEAU 16 COMPOSITION CHIMIQUE DES DECHETS UTILISES

On constate d'après les Tableau 3.1 que les différents déchets choisis ne présentent pas la même composition chimique.

Il est également constaté que le verre renferme une proportion élevée de silice, alors que sa concentration en chaux est moindre par rapport à celle du béton. Le verre contient plus d'alumine suivie par et en fin le béton. Lors de l'expérience, il a été observé que le verre est dépourvu de chlorure, tandis que le béton en contient une faible quantité ce qui nous oblige de suivre son pourcentage dans le ciment. Pour être employée comme constituant secondaire actif dans l'industrie du ciment, la poudre de béton issue de minéraux d'argile cuite doit satisfaire à certains critères chimiques spécifiques. Selon la norme américaine ASTM C618 (2018), ces minéraux doivent respecter trois conditions principales :

La somme des teneurs en silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃) et oxyde de fer (Fe₂O₃) doit être au

Conclusion Générale

Ciment	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6
CLNKER	95	85	85	80	80	75	75
Gypse	5	5	5	5	5	5	5
Verre	0	10	0	15	0	20	0
Béton	0	0	10	0	15	0	20

TABLEAU 17 DESIGNATION ET DOSAGE DES CIMENTS ELABORES.

Moins égale à 70 % en poids, afin d'assurer une bonne réactivité un matériau pouzzolanique actif pour le béton. En effet :

$$1-(\% \text{SiO}_2) + (\% \text{Al}_2\text{O}_3) + (\% \text{Fe}_2\text{O}_3) = 64.30 + 20.80 + 6.60 = 91.70 \% > 70$$

Le maintien d'un faible taux de chaux libre (CaO libre) est indispensable pour prévenir toute instabilité ou dégradation de la qualité du ciment.

$$2\text{-P.A.F} = 1.25 < 10\%.$$

Il est indispensable de maintenir les taux de soufre (SO₃), de chlorures et de résidus insolubles en dessous de valeurs spécifiques pour assurer la qualité et la durabilité du produit final.

$$3-(\% \text{SO}_3) = 0.18 < 4\%$$

Est exigences permettent de s'assurer que la poudre d'argile cuite peut efficacement améliorer les performances mécaniques et la longévité du ciment, tout en contribuant à réduire son impact environnemental.

3. Caractérisation des ciments élaborés

Après avoir procédé au broyage séparé des déchets, puis au criblage, au pesage et au mélange, six échantillons de ciment ont été préparés. Ces échantillons seront soumis à des analyses chimiques, physiques et mécaniques. Les résultats obtenus seront comparés à ceux d'un échantillon de référence, le ciment CPA CEM I/42.5 R.

Le tableau 3.2 présente les détails des compositions des différents mélanges réalisés.

Conclusion Générale

3.1. Caractérisation Chimique

3.1.1 Composition Chimique Des Ciments Elaborés

Les résultats de cette analyse sont reportés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : composition chimique des ciment préparés en laboratoire avec introduction de fines de verre comme ajout.

Échantillons	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-	PAF%
EC0	21,1015	5,137	3,095	64,497	0,801	2,1455	0,6355	0,162	0,0011	1,2155
EC1	28,3455	4,927	2,835	57,889	0,73	2,1336	0,5835	0,159	0,0012	1,2805
EC3	31,9675	4,822	2,705	54,585	0,6945	2,12765	0,5575	0,1575	0,00125	1,313
EC5	35,5895	4,717	2,575	51,281	0,659	2,1217	0,5315	0,156	0,0013	1,3455

TABLEAU 18 COMPOSITION CHIMIQUE DES CIMENT PREPARES EN LABORATOIRE AVEC INTRODUCTION DE FINES DE VERRE COMME AJOUT.

EC0 -ciment (95%clinker +5%gypse).

EC1-ciment (85% clinker + 5% gypse + 10% fine de verre.

EC3- ciment (80% clinker + 5% gypse + 15% fine de verre.

EC5-ciment (75% clinker + 5% gypse + 20% fine de verre.

Tableau 3.4: composition chimique des ciment préparés en laboratoire avec introduction de fines de Béton comme ajout.

Échantillons	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl-	PAF%
EC0	21,1015	5,137	3,095	64,497	0,801	2,1455	0,6355	0,162	0,0011	1,2155
EC2	21,3395	4,797	3,008	62,096	0,813	2,1515	0,5845	0,154	0,0011	1,3225

Conclusion Générale

EC4	21,4585	4,627	2,9645	60,8955	0,819	2,1545	0,559	0,15	0,0011	1,376
EC6	21,5775	4,457	2,921	59,695	0,825	2,1575	0,5335	0,146	0,0011	1,4295

EC0 -ciment (95%clinker +5%gypse).

EC2-ciment (85% clinker + 5% gypse + 10% fine de béton.

EC4- ciment (80% clinker + 5% gypse + 15% fine de béton.

EC5-ciment (75% clinker + 5% gypse + 20% fine de béton.

D'après le Tableau 3.3-3.4, on constate que les nouveaux ciments présentent une composition chimique très proche pour l'ensemble des oxydes. On constate aussi, que l'ensembles des ciments composés contiennent un pourcentage plus élevé en silice et un pourcentage plus faible

TABLEAU 19 COMPOSITION CHIMIQUE DES CIMENT PREPARES EN LABORATOIRE AVEC INTRODUCTION DE FINES DE BETON COMME AJOUT

en chaux. Cette différence est due essentiellement aux teneurs de ces oxyde dans les poudres ajoutées.

3.1.2 Teneur en (CaO) libre et en perte au feu (PAF)

Les mesures expérimentales de la teneur en CaO libre des ciments élaborés sont reportées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Teneur en (CaO) libre déterminée par l'alcool glycérol.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6
CaO libre (%)	0,70	0,80	0,90	1,00	1,01	1,03	1,05
PAF	1,2155	1,2805	1,3225	1,313	1,376	1,3455	1,4295

TABLEAU 20 TENEUR EN (CAO) LIBRE DETERMINEE PAR L'ALCOOL GLYCEROL

La teneur en chaux libre et la perte au feu dans l'ensemble des ciments élaborés sont très proches et reste toujours dans l'intervalle préconisé par la norme NA442.

3.2. Caractérisation Physique

Refus (μm) Des Ciments Elaborés

Le refus (%) des ciments élaborés correspond à la proportion de particules non suffisamment fines qui restent retenues sur un tamis après broyage, généralement un tamis de 45 μm ou 90 μm selon les études. Cet indicateur est utilisé pour contrôler la granulométrie du ciment et s'assurer de la qualité du broyage.

Conclusion Générale

Tableau 3.5: Refus (%) des ciments élaborés

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6
Tamis 45 µm	3,0	9,1	10,2	13,6	10,4	12,8	13,6

TABLEAU 21 REFUS (%) DES CIMENTS ELABORES

La finesse du ciment a une influence directe sur l'évolution des résistances mécaniques. Pour agir sur cette finesse, on intervient principalement au niveau du procédé de broyage. Les résultats obtenus montrent que le ciment sans ajouts présente une meilleure finesse comparé aux ciments avec ajouts. L'opérateur peut donc optimiser la broyabilité afin d'augmenter la finesse du produit, ce qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques du ciment.

3.2.1 Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés

Le broyage vise à diminuer la taille des particules du clinker et des autres composants du ciment pour accroître leur surface spécifique, mesurée par la méthode Blaine, ce qui améliore la réactivité chimique et les performances du ciment. Les valeurs de surface spécifique Blaine, obtenues selon la norme NF EN 196-6, servent d'indicateurs pour évaluer la finesse des différents ciments.

Tableau 3.6: Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6
SSB (cm ² /g)	3822	3050	2857	2890	3541	4088	4612

TABLEAU 22 SURFACE SPECIFIQUE DE BLAINE (SSB) DES CIMENTS ELABORES.

Les différences observées dans la finesse des ciments fabriqués résultent principalement du type de broyage employé, notamment lorsque les composants sont broyés séparément. En effet, les matériaux additionnels ne possèdent pas tous la même facilité à être broyés, ce qui affecte la finesse finale du produit. Ainsi, le broyage distinct des constituants permet d'optimiser la granulométrie et d'améliorer la finesse des ajouts, contribuant à une meilleure qualité du ciment tout en contrôlant la consommation d'énergie. Cette méthode est particulièrement efficace pour augmenter la proportion de calcaire dans le ciment tout en maintenant une finesse uniforme conforme aux exigences techniques.

3.2.2 Essai de consistance normale des ciments

L'essai de consistance normale a été effectué selon la norme NA 229 [30]. Cette mesure de la consistance standard d'une pâte de ciment est indispensable pour déterminer les temps de prise initiale et finale. Le Tableau 3.6 présente l'évolution de la quantité d'eau nécessaire pour les différents échantillons de ciment en fonction de leur teneur en ajouts.

Conclusion Générale

Tableau 3.7 : Consistance normale des ciments élaborés.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6
Consistance (%)	30	27,2	28	28	27,6	27,6	28

TABLEAU 23 CONSISTANCE NORMALE DES CIMENTS ELABORES.

Le tableau 3.7 présente les pourcentages d'eau nécessaires pour atteindre la consistance normale des pâtes de ciment élaborées. Les valeurs obtenues varient entre 27,2 % et 30 %, avec une valeur de référence de 30 % pour l'échantillon EC0 (ciment sans ajouts).

On constate que tous les ciments contenant des ajouts (EC1 à EC6) nécessitent une quantité d'eau légèrement inférieure pour atteindre la même consistance. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

Les variations restent modérées et dans la plage attendue pour des ciments courants, ce qui signifie que les ajouts étudiés n'ont pas altéré de manière significative la maniabilité des pâtes de ciment.

Conclusion :

Les résultats confirment que l'introduction de déchets inertes de béton et de verre, jusqu'à 20 %, n'affecte pas négativement la consistance normale des ciments élaborés. Les formulations restent conformes aux exigences d'utilisation en laboratoire pour la suite des essais (prise, résistance...).

3.2.3 Temps de prise

Le temps de prise d'un ciment est influencé par divers facteurs, tels que la concentration de la solution alcaline, la durée du malaxage, la vitesse à laquelle la silice et l'alumine se dissolvent, le rapport masse eau/ciment (E/C), la température de traitement ainsi que le degré de cristallinité du matériau aluminosilicaté.

La mesure des temps de début et de fin de prise a été réalisée sur des pâtes fraîches de ciment conservées à la température ambiante du laboratoire, soit environ 21 ± 1 °C. Les données recueillies sont compilées dans le Tableau 3.9, qui illustre les variations des temps de prise pour les différents échantillons analysés.

Tableau 3.8 : Temps de prise des ciments élaborés.

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Conclusion Générale

T. de début de prise (min)	132	194	189	210	179	101	212
T. de fin de prise (min)	220	342	287	360	266	284	318

Les résultats obtenus pour le temps de début de prise des différents échantillons sont présentés dans le tableau ci-dessus. Ces temps varient de 101 minutes (EC5) à 212 minutes (EC6).

Conformément à la norme NA 442 [33] (EN 197-1), le temps de début de prise pour un ciment courant doit être supérieur ou égal à 60 minutes (sauf cas particuliers pour les ciments à prise rapide ou lente). L'ensemble des échantillons testés respecte largement cette exigence minimale.

On observe néanmoins une variabilité notable entre les échantillons, probablement influencée par :

- La nature et la proportion des ajouts (verre et béton) ;
- Le niveau de finesse du ciment,
- La réactivité chimique des matériaux ajoutés.

En particulier, l'échantillon EC5, qui présente le temps de prise le plus court (101 min), reste conforme, mais indique une prise plus rapide que les autres formulations. À l'inverse, EC6 montre un temps de début de prise plus long (212 min), ce qui peut être attribué à une possible diminution de l'alcalinité ou à l'effet inhibiteur de certains composants vitreux du verre recyclé.

Conclusion Générale

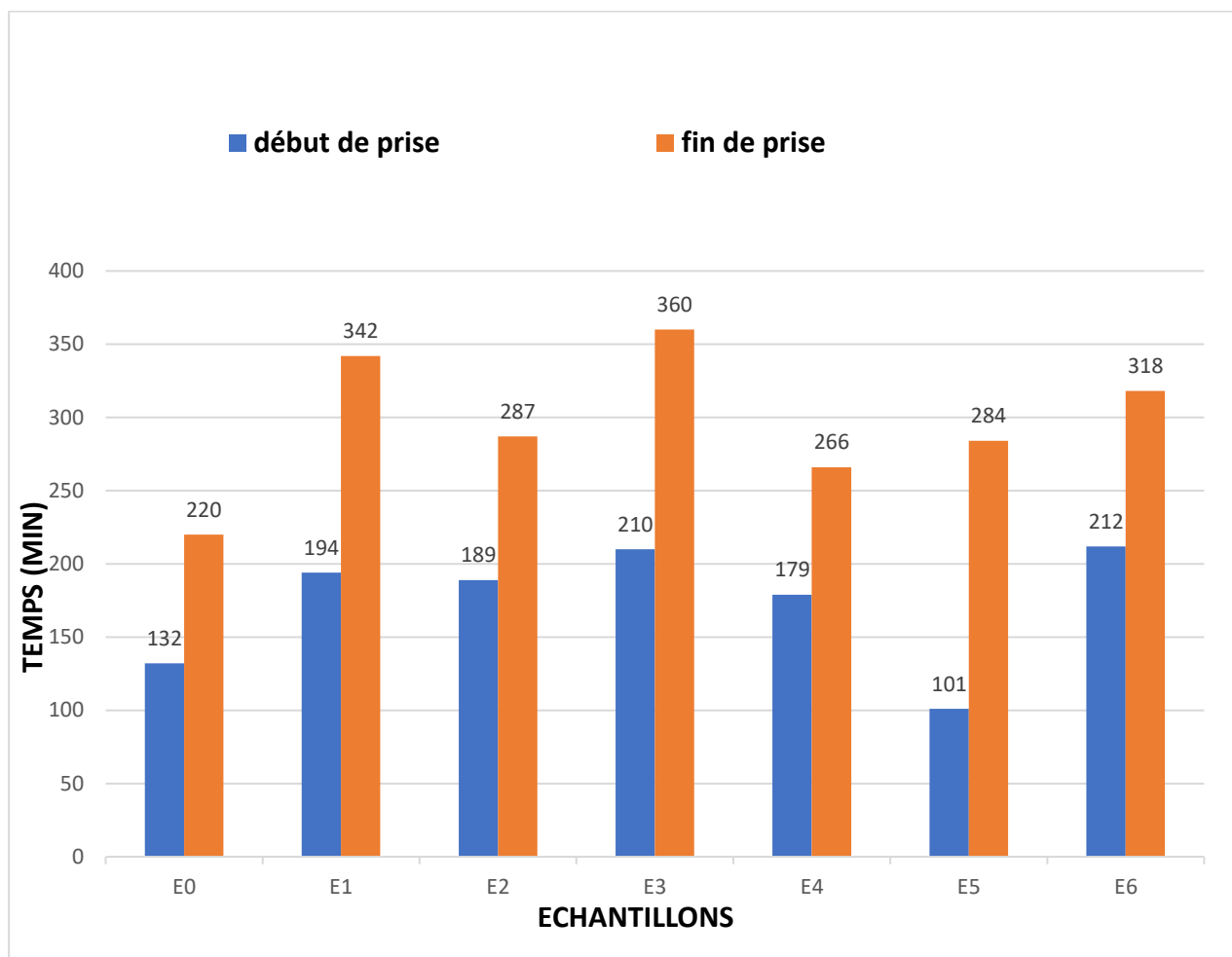


FIGURE 39 RESULTATS DE TEMPS DE PRISE DES CIMENTS ELABORES

3.2.4 d'expansion des ciments élaboré

L'essai d'expansion du ciment sert à détecter la présence de substances susceptibles de provoquer des déformations, comme le gypse, la chaux libre ou la magnésie libre, qui peuvent affecter la durabilité des ouvrages en béton. Il se réalise sur des indiqués de pâte ou de mortier placés dans des moules flexibles équipés d'aiguilles de Le Chatelier pour mesurer la dilatation le Tableau 3.9, qui illustre les expansions pour les différents échantillons analysés.

Tableau 3.9 :les expansions des échantillons analysés

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6
EXP (min)	1,0	0,0	2,0	1,0	1,0	0,0	3,0

TABLEAU 25 LES EXPANSIONS DES ECHANTILLONS ANALYSES

Conclusion Générale

Les résultats du test d'expansion des différents échantillons, présentés dans le tableau 3.9, montrent des valeurs comprises entre 0,0 mm et 3,0 mm. Ces valeurs sont nettement inférieures à la limite maximale autorisée de 10 mm, conformément aux exigences de la norme NA 442 (EN 197-1) relative à la conformité des ciments courants.

L'expansion mesurée reste donc dans la plage admissible, ce qui traduit une bonne stabilité dimensionnelle des ciments élaborés, y compris ceux contenant des ajouts de déchets de béton et de verre. Cela indique que l'introduction de ces déchets, dans les proportions étudiées, n'affecte pas négativement la stabilité volumétrique du ciment hydraté.

En conclusion, aucun risque de gonflement pathologique ou de désordres liés à une instabilité volumétrique n'est à craindre, ce qui renforce la faisabilité technique de cette substitution dans le respect des normes en vigueur.

3.3. Caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique réalisée dans cette étude porte sur la mesure de la résistance à la compression ainsi que sur la résistance à la traction par flexion en trois points. Les essais ont été menés sur des éprouvettes prismatiques en mortier normal, de dimensions 4 x 4 x 16 cm³, conformément à la norme NA 234 [32]. Ces éprouvettes ont été conservées immergées dans l'eau à température ambiante du laboratoire pendant (28 jours). Les résultats des tests de compression et de flexion sont rassemblés dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Résistance mécanique à la compression et à la flexion des ciments

Echantillons	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6
R. compression à 2 jours (MPa)	23,64	19,79	19,01	17,51	17,89	17,81	19,8
R. compression à 28 jours (Mpa)	58,44	49,20	42,43	48,96	43,35	43,37	44,18
R. à la flexion à 28 jours (Mpa)	8,25	8,45	8,01	7,33	7,21	7,16	7,52

TABLEAU 26 RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION ET A LA FLEXION DES CIMENTS

Le tableau 3.10 présente les valeurs de résistance à la compression à 2 jours et à 28 jours pour les différents ciments élaborés à base de clinker, gypse, et ajouts de déchets inertes (verre et béton).

- À 2 jours :

Les valeurs varient de 17,51 MPa (EC3) à 23,64 MPa (EC0). Le ciment de référence (EC0), sans ajouts, affiche la meilleure résistance initiale, ce qui est attendu étant donné sa teneur élevée en clinker, principal composant hydraulique actif à court terme.

L'introduction progressive des ajouts a entraîné une baisse des résistances initiales. Cela s'explique par :

- La réduction de la quantité de clinker, affectant la réactivité immédiate.

Conclusion Générale

- Le caractère peu hydraulique ou non pouzzolanique des ajouts utilisés (verre et béton), qui ont un impact limité sur les réactions précoces d'hydratation.
 - À 28 jours

Les résistances s'échelonnent entre 42,43 MPa (EC2) et 58,44 MPa (EC0). Malgré une baisse par rapport au ciment de référence, plusieurs échantillons, notamment EC1 (49,20 MPa) et EC3 (48,96 MPa), présentent des performances mécaniques satisfaisantes à 28 jours, conformes aux exigences normatives de la norme NA 442[33], qui exigent généralement :

≥ 42,5 MPa pour un ciment de classe 42,5 R/N.

≥ 52,5 MPa pour un ciment de classe 52,5 R/N.

Ces résultats indiquent que, malgré une baisse de performance mécanique, certains mélanges contenant jusqu'à 20 % d'ajouts (comme EC3 et EC6) conservent des résistances à 28 jours supérieures à 42 MPa, ce qui les rend compatibles avec la fabrication de ciments de classe CEM II / A ou B, à condition de respecter d'autres critères normatifs (finesse, prise, expansion...).

3.3.1 Résistance Mécanique A La Compression

Le but de cet essai est de déterminer la classe Concernant la résistance à la flexion,

Le Tableau 3.11 regroupe et synthétise les principaux résultats obtenus au cours de ces expérimentations. Afin d'évaluer la conformité des ciments étudiés, ces résultats sont confrontés aux exigences de la norme NA 442 [33]. Qui spécifie les critères de performance pour les ciments composés de type CPJ CEM II/A, classe. Cette norme fixe notamment des seuils minimaux pour la résistance à la compression, la finesse, la teneur en chaux libre, ainsi que d'autres paramètres essentiels à la qualité et à la durabilité du ciment.

Conclusion Générale

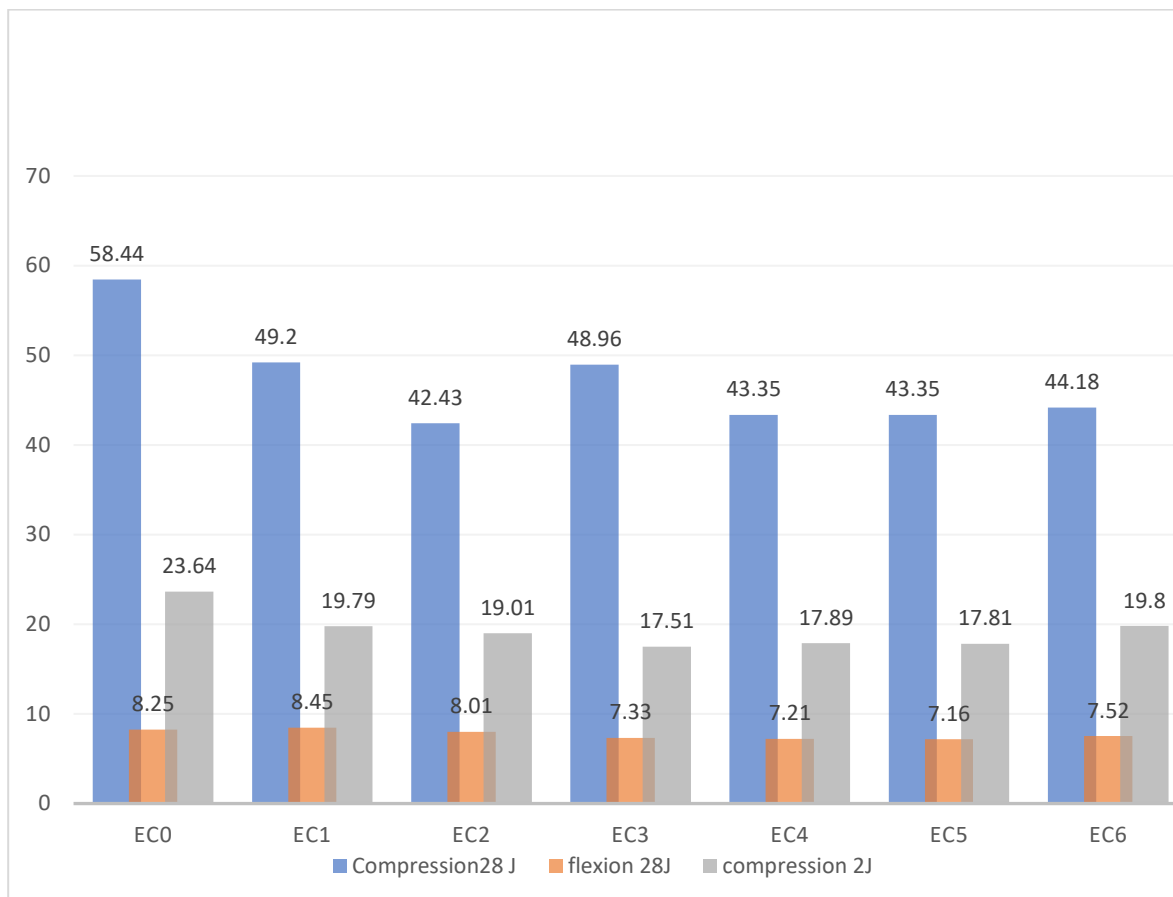


FIGURE 40 RESULTAT DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION A 2 ET 28 JOURS.

3.3.2 Résistance Mécanique A La Flexion

Concernant la résistance à la flexion, on a observé les mêmes remarques que celles de la Résistance à la compression.

Finalement les échantillons des nouveaux ciments présentent des résistances plus faibles que celles de l'échantillon de référence à l'âge de 28 jours. Ce gain de résistance s'explique par l'effet pouzzolanique ainsi que l'effet filler des ajouts utilisés.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a exposé tous les résultats des essais réalisés qui visent à caractériser les nouveaux ciments. Le Tableau 3.11 résume les principaux résultats trouvés. Ces derniers seront accompagnés avec les valeurs préconisées par la norme NA 442 [33] caractérisant un ciment composé CPJ CEMII/A de classe 42.5.

Tableau 3.11 : Caractéristiques des ciments élaborés

Echantillons	NA 442	EC0	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6

Conclusion Générale

R. compression 28 j (MPa)	$\geq 42,5N$	58,44	49,20	42,43	48,96	43,35	43,37	44,18
R. Flexion à 28 jours (MPa)	...	8,25	8,45	8,01	7,33	7,21	7,16	7,52
SSB (cm²/g)	...	3822	3050	2857	2890	3541	4088	4612
SO₃ (%)	$\leq 3,5$	2,1455	2,1336	2,1515	2,12765	2,1545	2,1217	2,1575
(P.A.F) (%)	1,2155	1,2805	1,3225	1,313	1,376	1,3455	1,4295
T. début de prise (min)	≥ 60	132	194	189	210	179	101	212
Cl- (%)	≤ 0.10	0,0011	0,0012	0,0011	0,00125	0,0011	0,0013	0,0011

TABLEAU 27 CARACTERISTIQUES DES CIMENTS ELABORES

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail de recherche a porté sur l'étude de la faisabilité technique de la valorisation de déchets inertes, notamment les **fines de béton** et les **fines de verre** , comme ajouts dans la composition du ciment. L'objectif principal était de contribuer à une démarche de **développement durable**, en réduisant la consommation de clinker, fortement émissif en CO₂, tout en maintenant les performances du ciment dans le respect des **exigences normatives en vigueur**.

Les différents échantillons de ciments élaborés avec des taux croissants de substitution (jusqu'à 20 %) ont été soumis à une série d'**essais physico-mécaniques** (finesse, prise, consistance, chaux libre, expansion, résistances à la compression et à la flexion). Les résultats ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les **propriétés physiques** (temps de prise, consistance normale, expansion) restent **conformes aux limites imposées par la norme NA 442[33]**, ce qui témoigne d'une bonne aptitude à l'emploi des ciments modifiés.
- Les **résistances mécaniques** à 2 jours subissent une légère baisse due à la réduction de clinker, mais certaines formulations atteignent des performances à 28 jours supérieures à **42 MPa**, permettant de viser des classes de ciment de type **CEM II**.
- La substitution partielle du clinker par ces déchets contribue à **réduire l'impact environnemental** de la production du ciment, sans compromettre sa conformité technique.

Ainsi, cette étude confirme que l'introduction contrôlée de déchets de béton et de verre dans la fabrication du ciment est **techniquement viable**, et représente une **solution prometteuse pour la valorisation des déchets inertes**, en ligne avec les enjeux actuels de **gestion des déchets, économie circulaire et transition écologique**

LISTE DES NOTATIONS

C3S : Silicate tricalcique dénommé (alite), sa formule chimique est $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$.

C2S : Silicate bi-calcique ou (bélite), sa formule chimique est $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$.

C3A : Aluminates tricalciques ou (célite), sa formule chimique est $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$.

C4AF : Ferro-aluminates tétra-calcique, de formule chimique $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$.

T : Les schistes calcinés.

D : les fumées de Silice.

H : H_2O

C : CAO

PAF : Perte au feu.

PZ : Pouzzolane naturelle.

RI : Résidus insolubles.

E/C : Le rapport (eau/ ciment).

Ri : Pourcentage des refus cumulés.

Ti : Pourcentage des tamisant cumulés.

SSB : Surface spécifique Blaine.

Mc : Masse des refus cumulés (g)

E/C : Le rapport (eau/ ciment).

Ri : Pourcentage des refus cumulés.

T : Température.

NA : Normes algériennes.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Figure 1.1: Le ciment Portland.	4
Figure 2 Le ciment Portland.	4
Figure 3 Composition de ciment	5
Figure 4 Pouzzolane naturelle	7
Figure 5 La fumée de silice en poudre	7
Figure 6 Le laitier du haut fourneau en poudre	8
Figure 7 LE LAITIER DU HAUT FOURNEAU EN POUFRE	8
Figure 8 Les particules des cendres volantes	9
Figure 9 Les cendres volantes en poudre	10
Figure 10 Filler calcaire	11
Figure 11 Schéma de la fabrication du ciment	13
Figure 12 Schéma structure vitreuse de verre [20].....	22
Figure 13 Transformation de déchets de verre en poudre de verre [21].....	23
Figure 14 Cycle de réutilisation des déchets de béton dans l'industrie cimentaire	25
Figure 15 E.C.D.E	28
Figure 16 .Organigramme de la direction usine	29
Figure 17 Organigramme de la direction general.....	30
Figure 18 Broyage des déchets	32
Figure 19 Matériaux utilisés.	32
Figure 20 Malaxeur pour la préparation du mortier normalisé.	33
Figure 21 Sachets de sable normalisé.....	33
Figure 22 Matières utilisées	33
Figure 23 Spectromètre à Fluorescence X.....	35
Figure 24 Four de calcination pour PAF.....	35
Figure 25 Essai de la teneur en CaO libre	36
Figure 26 les tamis de 45 et de 90 micromètres	36
Figure 27 les tamis de 45 et de 90 micromètres	36
Figure 28 appareil Alpine.....	37
Figure 29 Masse volumique absolue des ciments.	37
Figure 30 Masse volumique apparente des ciments anhydres.....	38
Figure 31 Appareil de Blaine (SSB).....	38
Figure 32 Appareil de Vicat	39
Figure 33 Appareille de la prise	40
Figure 34 PR isomètre (Vicat automatique).....	40
Figure 35 Appareille d'expansion	41
Figure 36 Aiguille de châteaur.....	41
Figure 37 Table à chocs.....	42
Figure 38 Appareil flexion-compression.....	42
Figure 39 Résultats de temps de prise des ciments élaborés	51
Figure 40 Résultat de la Résistance mécanique à la compression à 2 et 28 jours.	54

Conclusion Générale

LISTE DES FIGURES

Tableau 1 Composition en oxyde du clinker.....	4
Tableau 2 Phases anhydres du clinker.....	5
Tableau 3 Les caractéristique de chaque phase.....	6
Tableau 4 : Composition typique de laitier du haut fourneau	9
Tableau 5 comparaison avec la voie humide.....	12
Tableau 6 comparaison des procédés	12
Tableau 7 Les différents types de ciment courants	15
Tableau 8 Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.....	16
Tableau 9 Utilisation du ciment des ciments courants	17
Tableau 10 Donne un exemple de chaque class	21
Tableau 11 Composition chimique du verre [19].....	22
Tableau 12 Ciment avec poudre de verre	31
Tableau 13 Ciment avec poudre de béton	31
Tableau 14 Malaxage d'un mortier normal.....	34
Tableau 15 Compositions chimiques des matériaux utilisées	35
Tableau 16 Composition chimique des déchets utilisés	44
Tableau 17 Désignation et dosage des ciments élaborés.....	45
Tableau 18 composition chimique des ciment préparés en laboratoire avec introduction de fines de verre comme ajout.....	46
Tableau 19 composition chimique des ciment préparés en laboratoire avec introduction de fines de Béton comme ajout.....	47
Tableau 20 Teneur en (CaO) libre déterminée par l'alcool glycérol.....	47
Tableau 21 Refus (%) des ciments élaborés.....	48
Tableau 22 Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés.....	48
Tableau 23 Consistance normale des ciments élaborés.....	49
Tableau 24 Temps de prise des ciments élaborés.....	50
Tableau 25 les expansions des échantillons analysés.....	51
Tableau 26 Résistance mécanique à la compression et à la flexion des ciments	52
Tableau 27 Caractéristiques des ciments élaborés	55

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographique

- [1] **Nicolas BUR** ; « Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco respectueux Pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement Durable » ; Thèse du doctorat ; Université de Strasbourg Discipline, 5 septembre 2012.
- [2] **Ben Inak Chouaib Amine**, « processus de fabrication du ciment, et gestion des Poussières » ; Mémoire fin étude, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [3] **Techniques de l'Ingénieur**, « Fabrication Ciments », consulté le 24 octobre 2023, Base documentaire construction et travaux publics.
- [4] **Wikipédia**, « Ciment », consulté le 16 juillet 2004.
- [5] **NF EN 197-1**, AFNOR, 2012.
- [6] **Nigri G.** Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2018
- [7] <https://www.infociments.fr/la-fumee-de-silice-laddition-incontournable-pour-des-betons-durables>.
- [8] **Kaid N** : « Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers Pouzzolaniques », Mémoire de Magistère en Génie civil, USTMB d'Oran, Algérie, 2000.
- [9] **Le site web** : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pouzzolane>, 20/04/2015.
- [10] <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/12795119.1999.9692234>.
- [11] **Sayoud A.** Caractérisation physico-mécanique d'un liant hydraulique à base de poudre de verre, Mémoire de master, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2021.
- [12] **Hammami A.E.** « Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires », Thèse de doctorat de l'Université de La Rochelle, France, 2009.
- [13] **Info ciments**. « Valorisation des déchets dans la fabrication du ciment », <https://www.infociments.fr/composition-et-fabrication-des-ciments-courants/valorisation-des-dechets>.
- [14] **Nigri G.** Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment, Mémoire de Magister, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2005.
- [15] **Meziani S, Yousfi N**, l'évaluation d'impact de l'industrie du ciment sur l'environnement a l'aide de l'analyse de cycle de vie (acv) : cas de la cimenterie de hdjar-soud (schs) aSkikda, Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [16] **Sahri M, Elagoune M**, Caractérisation d'un liant hydraulique à base de la poudre de verre -Etat de l'art-, Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2020.
- [17] **Rédadaa F, Mahamdi S.** Caractérisation physiques et de durabilité des ciments composées à base de brique, Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie, 2018.
- [18] **NOUI S.** " L'influence des granulats artificiels « laitier » sur la résistance mécanique du béton ". Mémoire de master. Département de Génie Civil, université de M'Sila, 2017.

Références Bibliographique

- [19] **Kateb.Med.L.** Utilisation des granulats de verre dans la fabrication des bétons architectural « cas des briques en bétons », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées Université de Sherbrooke, Canada, 2009.
- [20] **Slimani. H.** Elaboration, mesure mécaniques et élastiques Des verres $Sb_2O_3-Li_2O-MoO_3$ (WO_3), Mémoire de Master, Med Khider, Biskra, Algérie, 2014.
- [21] **Malika N.** Effet des oxydes alcalin- terreux et les métaux de transitions sur les propriétés physiques des verres d'oxydes basés sur Sb_2O_3 , Med. Khider, Biskra, Algérie, 2012.
- [22] **Laib M & Merouani A.** « Gestion et modes de traitement des différents types de déchets (gazeux, solide, liquide) générés par le processus de production dans la cimenterie de Hamma Bouziane. » Mémoire de fin d'étude, Université Mentouri de Constantine. 2011.
- [23] **Nano technologie.** L'histoire d'une réussite. Nano Québec, 1 Page ; Designer sur :https://www.nanoquebec.ca/media/hrf1004-3_wbeton.pdf.
- [24] **M. Cyr.** "Les fines minérales dans les matrices cimentaires," Thèse HDR, Université de Toulouse, 2019, p158.
- [25] **Norme NF EN 196-1(2016).** Norme Européenne Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques Paris, Septembre, 2016.
- [26] **Norme NA235.** Liants hydrauliques - Détermination de la perte au feu. Institut Algérien de la normalisation.
- [27] **Norme NA2595.** Granulats - Détermination de la masse volumique absolue des fines Institut Algérien de la normalisation.
- [28] **Norme NF EN 1097-3.** Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire.
- [29] **Norme EN 196-6 SSB.** Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse. Décembre 2018.
- [30] **Norme NA229.** Ciments– Détermination de la consistance normale. Algérien de la normalisation.
- [31] **Norme NA230.** Ciments – Détermination du temps de prise. Institut Algérien de la normalisation.
- [32] **Norme NA234.** Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques. Institut Algérien de la normalisation.
- [33] **Norme NA442.** ciment –partie 1 : composition, spécification et critères de conformités des ciments courants.