

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de fin d'études**

Présenté par :

**Mr. Malaoui Elghani**

**Mme. Ferradj Baya**

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en :

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Matériaux en Génie Civil**

**Thème :**

**Etudes physico-mécaniques de coulis de ciment avec poudre de verre**

**Devant le jury composé de :**

MOUSSAOUI Fahem	MCB	UAMOB	Président
ARIBI Chouaib	MCB	UAMOB	Examineur 1
KENNOUCHE Salim	MCB	UAMOB	Encadreur

**Année Universitaire 2018/2019**

## **Remerciements**

---

On tient en premier lieu à exprimer notre profonde reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés dans l'élaboration de ce travail, en particulier à notre encadreur Monsieur KENNOUCHE Salim, pour sa disponibilité et sa méthode d'ouvrir son esprit à leurs chers étudiants, pour sa confiance d'accepter aisément l'idée de l'autre et pour ses orientations successives.

On tient encore à remercier les membres jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et donné leurs remarques et critiques en à propos.

On tient aussi à remercier les dirigeants responsables de laboratoire matériaux de construction, celle de la faculté des sciences et sciences appliquées pour leur aide et leur disponibilité.

Merci à vous tous.

À mes parents qui ont causé mon existence

À mes cinq grandes sœurs

À mon petit frère

À ma grande mère, oncles et tantes et cousins et à toute ma famille

À tous mes amis et collègues

À toutes les promotions estudiantines qui sont passées et celles qui viennent

À tous les étudiants de ma promotion 2018/2019 et à l'exception la spécialité : Matériaux en Génie Civil

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer et atteindre à ce stade .....

**Malaoui Elghani**

À mes parents

À mon mari

À mes frères et sœurs et à toute la famille Ferradj

À mes amis et à tous les collègues, ceux de ma promotion et exceptionnellement ceux de la spécialité  
matériaux de construction

À tous ceux qui nous ont aidés pour réaliser notre projet

**Ferradj Baya**

Le coulis de ciment est un mélange très fluide de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvant, largement utilisé pour renforcer des sols, les fondations, la réparation des fissures dans les structures.

Les ajouts cimentaires connaissent un développement croissant dans l'industrie de ciment et dans le béton, car leur utilisation apporte une amélioration des propriétés physicomécaniques des matériaux cimentaires, notamment la réduction des quantités de ciment utilisées. L'utilisation des ajouts issus de déchets tels que le verre sous forme de poudre, s'avère comme une solution intéressante, car elle contribue à la réduction des coûts de réalisation ainsi que la prise en charge de ce type de déchet.

Ce travail expérimental étudie l'effet de la substitution partielle du ciment par la poudre de verre à des pourcentages (10%, 20% et 30%) respectivement sur les propriétés physicomécaniques de coulis de ciment.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la substitution des quantités de ciment par la poudre de verre a amélioré le comportement physique des coulis de ciment, à savoir la fluidité et une réduction non significative des masses volumiques (inférieure à 2 % par rapport à celles de témoins), par contre, la substitution de ciment par la poudre de verre a engendré une diminution de résistance mécaniques en compression et en flexion des variantes étudiées.

**Mots clés:** *coulis de ciment, poudre de verre, substitution, caractérisation physicomécanique.*

## Abstract

---

Cement grout is a very fluid mixture of cement, water and uses of adjuvant, widely used to reinforcement of the soil, foundations, repairing cracks in structures.

Cement additions are growing in the cement industry, as their uses bring about an improvement in the physicochemical properties of cement materials, in particular the reduction of the cement quantities used, the use of additions from waste such as glass powder, proves to be an interesting solution, as it contributes to the reduction of the costs of production as well as the reduction of this type of waste.

This experimental work studies the effect of the partial substitution of cement by glass powder at different percentages (10 %, 20 % and 30 %) respectively, and their effect on the physicochemical properties of cement grouts.

The experimental results obtained, it appears that the substitution of the quantities of cement by the glass powder, improved the physical behavior of the cement slurries, namely the fluidity, and a no significant reduction of the densities (less than 2 % against the controls), on the other hand the substitution of cement by the glass powder has decreasing the mechanical resistance in compression of the variants studied.

**Key words:** *Cement grout, glass powder, substitution, physicochemical characterization.*

صلصة الإسمنت هو خليط سائل للغاية من الإسمنت و من زيادات مساعدة ، ويستخدم على نطاق واسع لتدعيم التربة، والأسس، وإصلاح الشقوق في هياكل الهندسة المدنية .

تسعي الإضافات الإسمنتية في تحسين نوعية الإسمنت، حيث أن استخداماتها تؤدي إلى تحسن في الخواص الفيزيائية و الميكانيكية لصلصة الإسمنت، لا سيما تقليل كميات الإسمنت المستخدمة. إستخدام الإضافات من النفايات مثل مسحوق الزجاج يثبت أنه حل مهم، لأنه يساهم في خفض تكاليف الإنتاج وكذلك تقليل هذا النوع من النفايات.

يدرس هذا العمل التجريبي تأثير الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق الزجاج بنسب مختلفة (10 % و 20 % و 30%) على التوالي، وتأثيره على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية لصلصة الإسمنت.

النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها تبين لنا أن استبدال كميات من الإسمنت بمسحوق الزجاج، يحسن الخصائص الفيزيائية لملاط الإسمنت، أي السيولة، دون التأثير على خاصية الكثافة (أقل من 2 % مقارنة بالشاهد). من ناحية أخرى، أدى استبدال الإسمنت بمسحوق الزجاج إلى ملاحظة انخفاض للمقاومة الميكانيكية أثناء تجارب الضغط على أنواع صلصة الإسمنت المدروسة.

**الكلمات المفتاحية:** صلصة الإسمنت، المسحوق الزجاجي، الاستبدال الجزئي، الخصائص الفيزيائية.

# Table de matière

Remerciement.....	I
Dédicace .....	II
Résumé .....	IV
Abstract.....	V
ملخص.....	VI
Introduction générale et problématiques .....	1
Chapitre I : Ciment Portland.....	3
I.1. Introduction .....	4
I.1.1. Définition .....	4
I.2. Fabrication de ciment Portland.....	4
I.2.1. Procédé de fabrication de ciment Portland .....	4
I.2.2. Etapes de fabrication de ciment portland.....	6
I.2.2.1. Les étapes de cuisson .....	6
I.2.2.2. Les étapes de fabrication de ciment portland.....	6
I.2.2.2.1. Extraction et préparation de la matière première.....	7
I.2.2.2.2. Le séchage et broyage.....	7
I.2.2.2.3. L'obtention de clinker .....	7
I.2.2.2.4. L'obtention du ciment.....	7
I.2.2.2.5. Conditionnement en sac et en vrac .....	7
I.3. Composition de ciment portland.....	8
I.3.1. Le clinker .....	9
I.3.1.1. Les silicates de calcium.....	9
I.3.1.2. Les aluminates.....	9
I.3.2. Le gypse .....	9
I.4. Classes de ciment portland .....	9
I.4.1. Classification des ciments portland en fonction de leur composition.....	9
I.4.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale.....	10
I.5. L'hydratation de ciment portland .....	10
I.5.1. Les bilans réactionnels de l'hydratation d'un ciment Portland.....	11
I.5.1.1. L'hydratation des silicates.....	11
I.5.1.2. L'hydratation des aluminates .....	12
I.5.1.2.1. Hydratation de $C_3A$ .....	12
I.5.1.2.2. Hydratation de $C_4AF$ .....	12
I.5.2. Les périodes d'hydratation.....	13
I.5.2.1. Période initiale.....	13

I.5.2.2. Période dormante/d'induction .....	13
I.5.2.3. Période d'accélération .....	13
I.5.2.4. Période de décélération .....	13
I.5.2.5. Réaction lente et continue .....	13
I.6. Les ajouts cimentaires .....	14
I.6.1. Introduction .....	14
I.6.2. Les types des ajouts cimentaires .....	14
I.6.2.1. Les ajouts chimiques .....	14
I.6.2.2. Les ajouts Minéraux .....	15
I.6.2.2.1. Classification des ajouts minéraux .....	15
I.6.2.2.1.1. Principaux ajouts minéraux inertes .....	15
I.6.2.2.1.2. Principaux ajouts minéraux actifs .....	15
I.6.2.2.1.2.1. La pouzzolane .....	15
I.6.2.2.1.2.1.1. Pouzzolane naturelle .....	16
I.6.2.2.1.2.1.2. Pouzzolane artificielle .....	16
I.6.2.2.1.2.2. La fumée de silice .....	16
I.6.2.2.1.2.3. Laitier de haut Fourneau. ....	16
I.7. Conclusion .....	16
Chapitre II : Valorisation des déchets de verre.....	18
II.1. Les déchets solides .....	19
II.1.1. Introduction .....	19
II.1.2. Définition sur les déchets solides .....	19
II.1.3. Les types de déchets solides .....	19
II.1.3.1. Déchets solides non dangereux .....	19
II.1.3.1.1. Déchets solides municipaux .....	19
II.1.3.1.2. Déchets agricoles et animaux .....	19
II.1.3.1.3. Déchets industriels .....	20
II.1.3.1.3.1. Déchets de construction et de démolition.....	20
II.1.3.1.3.2. Déchets biomédicaux.....	20
II.1.3.1.3.3. Déchets inertes.....	20
II.1.3.1.3.4. Les déchets industriels banals (DIB) .....	20
II.1.3.2. Déchets solides dangereux .....	21
II.1.3.2.1. Déchets ménagers dangereux .....	21
II.1.3.2.2. Déchets industriels dangereux.....	21
II.1.3.2.2.1. Déchets universels .....	21
II.1.3.2.2.2. Déchets mélangés .....	22

II.1.3.2.2.3. Déchets caractéristiques .....	22
II.1.4. Destination des déchets solides .....	22
II.1.4.1. Décharges.....	22
II.1.4.2. Combustion ou incinération .....	23
II.1.4.3. Stations de transfert.....	23
II.1.4.4. Récupération et recyclage .....	23
II.1.4.5. Compostage.....	23
II.2. Le verre .....	23
II.2.1. Définition de verre.....	23
II.2.2. Propriétés de verre .....	24
II.2.2.1. Propriétés physiques .....	24
II.2.2.2. Propriétés thermiques.....	24
II.2.2.3. Propriétés chimiques .....	24
II.2.3. Réaction pouzzolanique du verre .....	25
II.2.3.1. Introduction.....	25
II.2.3.2. Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes.....	26
II.2.3.3. L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolane.....	26
II.2.3.4. Étude de la pouzzolanité .....	26
II.3. Déchet de verre.....	27
II.3.1. Introduction .....	27
II.3.2. Source de déchets de verre (chiffre) .....	28
II.3.3. Valorisation de déchet de verre .....	29
II.3.4. Les déchets de verre dans les matériaux de construction .....	30
II.3.4.1. Valorisation de déchets de verre en remplacement partiel avec le ciment .....	31
II.3.4.1.1. L'effet de la granulométrie des déchets de verre .....	31
II.3.4.1.2. Le taux de remplacement du ciment par la poudre de déchet de verre .....	32
II.4. Conclusion.....	32
Chapitre III: Les coulis de ciment.....	34
III.1. L'historique.....	35
III.2. Définition .....	35
III.3. Les propriétés physiques et mécaniques de coulis de ciment .....	35
III.3.1. Les propriétés physiques .....	35
III.3.1.1. Le pouvoir de pénétration.....	35
III.3.1.2. La stabilité .....	36
III.3.2. Les propriétés mécaniques .....	36
III.4. Les types de coulis de ciment .....	37

III.4.1. Les types de coulis selon la composition .....	37
III.4.1.1. Le coulis de scellement.....	37
III.4.1.2. Coulis de comblement (coulis d'injection).....	37
III.4.2. Les types de coulis selon leur rhéologie.....	38
III.4.2.1. Les coulis newtoniens.....	38
III.4.2.2. Les coulis binghamiens.....	38
III.5. Les domaines d'utilisation .....	38
III.5.1. Le comblement des cavités souterrains .....	39
III.5.2. Le renforcement des sols.....	40
III.5.3. La cimentation des puits de forage géométriques .....	41
III.5.3.1. Méthodes de cimentation.....	41
III.6. Conclusion .....	41
Chapitre IV : La partie pratique.....	42
IV.1. Introduction.....	43
IV.2. Matériaux utilisés.....	43
IV.2.1. Le ciment (CPJ) .....	43
IV.2.2. Eau .....	43
IV.2.3. Les adjuvants.....	43
IV.2.4. Poudre de verre ( $D_{MAX}<100\ \mu m$ ).....	44
IV.3. La composition de coulis de ciment .....	44
IV.3.1. L'essai préliminaire.....	44
IV.3.1.1. Éclaircissement sur le calcul .....	44
IV.3.1.2. Mode opératoire.....	45
IV.3.1.2.1. Préparation, confection et conservation des variantes d'études .....	45
IV.3.1.2.2. Résultats d'essai préliminaire .....	47
IV.3.1.2.2.1. Remarques.....	47
IV.3.1.2.2.2. Interprétation des résultats .....	47
IV.3.1.3. Les conditions primaires .....	47
IV.3.2. Les quantités des constituants de coulis de ciment pour une moule ( $4\times 4\times 16$ ) $cm^3$ .....	48
IV.3.2.1. Pour la variante (Témoin).....	48
IV.3.2.2. Pour coulis de ciment avec poudre de verre.....	48
IV.3.2.2.1. Pour la variante (10 % PV).....	48
IV.3.2.2.2. Pour la variante (20 % PV).....	48
IV.3.2.2.3. Pour la variante (30 % PV).....	48
IV.3.3. La quantité globale des constituants .....	48
IV.4. Essais physiques .....	49

IV.4.1. Essai d'étalement au mini cône.....	49
IV.4.1.1. Méthode d'essai.....	49
IV.4.1.2. Résultats .....	50
IV.4.1.2.1. Remarques .....	51
IV.4.1.2.2. Interprétation des résultats .....	51
IV.4.2. Essai de la masse volumique.....	51
IV.4.2.1. La masse volumique apparente des poudres .....	51
IV.4.2.1.1. Principe d'essai .....	52
IV.4.2.1.2. Mode opératoire de l'essai .....	52
IV.4.2.1.3. Les résultats d'essai .....	52
IV.4.2.2. Les masses volumiques apparentes des éprouvettes à 7, 14 et 28 jours (l'état durci).....	52
IV.4.2.2.1. Résultats obtenus .....	53
IV.4.2.2.2. Remarques .....	54
IV.4.2.2.3. Interprétation des résultats .....	54
IV.5. L'essai mécanique .....	54
IV.5.1. Résistance à la traction par flexion .....	54
IV.5.2. Résistance en compression.....	55
IV.5.3. Résultats d'essai .....	55
IV.5.3.1. L'écrasement à 7 jours.....	55
IV.5.3.2. L'écrasement à 14 jours.....	56
IV.5.3.3. L'écrasement à 28 jours.....	57
IV.5.3.4. Résultats d'essai par rapport aux âges (7, 14 et 28 jours) .....	58
IV.5.3.4.1. Remarques .....	59
IV.5.3.4.2. Interprétation des résultats .....	59
IV.6. L'indice de l'activité pouzzolanique .....	60
IV.6.1. Résultats de calcul.....	60
IV.6.1.1. Remarques .....	61
IV.6.1.2. Interprétation des résultats.....	61
IV.6.2. Explication sur l'indice d'activité pouzzolanique : .....	61
IV.7. Etudes statistiques des résultats .....	61
IV.7.1. Corrélation résistance à la compression / masse volumique.....	61
IV.7.2. Corrélation résistance à la flexion / masse volumique.....	62
IV.7.3. Corrélation résistance à la flexion / résistance en compression.....	62
Conclusion générale et perspectives .....	64
Annexes .....	79

## Liste des figures

Figure I. 1 : Schéma représentatif les procédés de fabrication de ciment. ....	5
Figure I. 2 : Les étapes de fabrication de ciment. ....	8
Figure I. 3 : Structure de C-S-H. ....	11
Figure I. 4 : Image MEB des cristaux de Portlandite. ....	12
Figure I. 5 : Les périodes d'hydratation de ciment portland. ....	14
Figure I. 6 : Pouzzolane naturelle. ....	16
Figure II. 1 : Déchets inertes. ....	20
Figure II. 2 : Déchets banals ....	21
Figure II. 3 : Déchets dangereux (déchets ménagers). ....	21
Figure II. 4 : Schéma représentatif les types de déchets solides. ....	22
Figure II. 5 : Bouteilles en verre. ....	24
Figure II. 6 : Schéma représentatif les propriétés de verre. ....	25
Figure II. 7 : Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes. ....	26
Figure II. 8 : Résistances en compression des mortiers avec le verre. ....	27
Figure II. 9 : Déchet de verre en Algérie. ....	28
Figure II. 10 : Transformation de déchets de verre en poudre de verre. ....	29
Figure III. 1 : Pâte et Coulis de ciment. ....	35
Figure III. 2 : Etats d'équilibre d'un coulis cimentaire. ....	36
Figure III. 3 : Coulis de scellement. ....	37
Figure III. 4 : Coulis de comblement. ....	37
Figure III. 5 : Réparation des couches de fondation autoroutières. ....	39
Figure III. 6 : Comblement des lézards et des fissures des barrages et des bâtiments. ....	39
Figure III. 7 : Réparation de chaussés. ....	39
Figure III. 8 : Renforcement des sols par inclusion rigide. ....	40
Figure III. 9 : Synthèse simplifiée de la réalisation d'un puits de forage géothermique. ....	41
Figure IV. 1 : Sika Viscocrette. ....	44
Figure IV. 2 : L'éprouvette (4×4×16) cm <sup>3</sup> . ....	44
Figure IV. 3 : Malaxeur de coulis de ciment. ....	45
Figure IV. 4 : Opération de moulage et de démoulage des éprouvettes. ....	46
Figure IV. 5 : Table de choc. ....	46
Figure IV. 6 : Numérotation des éprouvettes après l'opération de démoulage. ....	46
Figure IV. 7 : Schéma de mini cône. ....	50
Figure IV. 8 : L'étalement de la variante 10 % PV dans la plaquette en verre. ....	50
Figure IV. 9 : Diamètre moyen d'étalement de différentes variantes étudiées. ....	51
Figure IV. 10 : Essai de la masse volumique apparente des poudres. ....	52
Figure IV. 11 : Les masses volumiques apparentes des variantes étudiées à 7, 14 et 28 jours. ....	53
Figure IV. 12 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion. ....	55
Figure IV. 13 : Dispositif pour l'essai de résistance en compression. ....	55
Figure IV. 14 : Moyenne de résistance en flexion des variantes étudiées à 7, 14 et 28 jours. ....	58
Figure IV. 15 : Moyenne de résistance en compression variantes étudiées à 7, 14 et 28 jours. ....	59
Figure IV. 16 : Conservation des éprouvettes. ....	60
Figure IV. 17 : L'indice de l'activité pouzzolanique des trois variantes étudiées en fonction de l'âge. ....	61
Figure IV. 18 : Corrélacion résistance en compression / masse volumique à 7, 14 et 28 jours. ....	62

Figure IV. 19 : <i>Corrélation résistance en flexion / masse volumique à 7, 14 et 28 jours.</i> .....	62
Figure IV. 20 : <i>Corrélation résistance en compression / résistance en flexion à 7, 14 et 28 jours.</i> .....	63

## **Liste des tableaux**

Tableau I. 1 : <i>La matière première extraite de carrière.</i> .....	6
Tableau I. 2 : <i>Les étapes de cuisson.</i> .....	6
Tableau I. 3 : <i>Notations chimiques et cimentières des principaux constituants du ciment Portland.</i> .....	8
Tableau I. 4 : <i>Notations chimiques et cimentières des phases du ciment Portland.</i> .....	8
Tableau I. 5 : <i>Les différents types de ciment portland en fonction de leur Composition.</i> .....	10
Tableau I. 6 : <i>Les différents types du ciment portland en fonction de résistance normale.</i> .....	10
Tableau I. 7 : <i>Classification des ajouts selon leur réactivité.</i> .....	15
Tableau II. 1 : <i>Quantité de déchets de verre et taux de recyclage dans différents pays.</i> .....	30
Tableau II. 2 : <i>Composition chimique du ciment et différents verre colorés.</i> .....	31
Tableau IV. 1 : <i>Composition chimique du ciment utilisé.</i> .....	43
Tableau IV. 2 : <i>Volume d'une éprouvette mise à l'essai.</i> .....	45
Tableau IV. 3 : <i>Essai préliminaire.</i> .....	47
Tableau IV. 4 : <i>Compositions massiques des variantes étudiées.</i> .....	49
Tableau IV. 5 : <i>Les résultats d'essai d'étalement de différentes variantes étudiées.</i> .....	50
Tableau IV. 6 : <i>La masse volumique apparente des poudres.</i> .....	52
Tableau IV. 7 : <i>Les masses Volumiques apparentes des différentes variantes à 7, 14 et 28 jours.</i> .....	53
Tableau IV. 8 : <i>Tableau récapitulatif des résultats des différentes variantes étudiées à 7 jours.</i> .....	56
Tableau IV. 9 : <i>Tableau récapitulatif des résultats des différentes variantes étudiées à 14 jours.</i> .....	57
Tableau IV. 10 : <i>Tableau récapitulatif des résultats des différentes variantes étudiées à 28 jours.</i> .....	58
Tableau IV. 11 : <i>Les valeurs d'indices de l'activité pouzzolanique.</i> .....	60
Tableau V. 1 : <i>Tableau de bord des résultats obtenus</i> .....	66

## **Introduction générale et problématiques**

Les déchets de verre constituent des problèmes environnementaux graves, en raison de l'augmentation continue des produits d'emballage jetables, ainsi que l'extension de l'industrie du verre. Ces déchets entraînent des dégradations de lourdes conséquences sur l'environnement, (pollution de l'air, de l'eau et du sol) [1]. En Algérie, les déchets de verre se sont accrus et ils ont un impact de plus en plus négatif sur l'environnement. Ils peuvent être collectés de manière rentable dans des couleurs mélangées.

D'autre part, des problèmes économiques et environnementaux sont générés par les industries du ciment en raison des besoins en grande quantités pour répondre aux fortes demandes des sites de construction, des émissions élevées du gaz à l'effet de serre, de l'utilisation intensive de l'énergie et de l'utilisation extrême des ressources naturelles. La production de ciment (liant dans le béton) est un processus à forte intensité énergétique et très polluant, qui contribue d'environ 5-7% aux émissions mondiales de CO<sub>2</sub> [2].

Ces deux problématiques citées respectivement par : Yahya Jani, William Hogland, 2014 [1] et Ali A et al, 2016 [2] peuvent être corrigées en valorisant les déchets industriels inertes et utilisant comme remplacement partiel avec le ciment, dans ce cas, nous avons pu utiliser la poudre de verre issue de déchets de verre pour protéger les ressources naturelles (ciment) d'un côté et protéger l'environnement de l'autre. D'un point de vue économique, l'utilisation de la poudre de verre comme substitution dans le ciment peut réduire le cout du projet à réaliser (la réduction partielle de la quantité du ciment qu'est l'un des matériaux le plus cher dans le domaine de construction).

L'objectif principal de ce travail rentre dans ce contexte de la valorisation des déchets, notamment la recherche d'amélioration des caractéristiques des coulis de ciment, avec la substitution d'une quantité de ciment par le déchet sous forme de poudre, dont plusieurs variantes seront étudiées, qui consiste à préparer des coulis de ciment, en remplaçant une certaine quantité de ciment par la poudre de verre à des taux de [10 % ; 20 % ; 30 %] respectivement, des essais physicomécaniques seront effectués sur l'ensemble des variantes étudiées, tels que les essais de fluidité, de masses volumiques, résistance mécanique en flexion et en compression.

Ce mémoire est organisé comme suite :

Une introduction générale, et une présentation de la problématique. Chapitre 1 : donne un aperçu général sur le ciment, et le chapitre 2, est dédié à la valorisation des déchets de verre dans les matériaux de construction, puis le chapitre 3, on présentera la partie expérimentale, la présentation et la discussion des résultats obtenus. Et enfin une conclusion, puis des perspectives seront présentées.

## **Chapitre I : Ciment Portland**

### ***1.1. Introduction***

Les ciments ont été découverts il y a deux mille ans par les Romains qui ont été les premiers à utiliser les propriétés hydrauliques de la chaux résultante de la décarbonatation des calcaires pour la construction de leur maçonnerie. L'invention du ciment portland est généralement attribuée à JOSEPH ASPDIN, un maçon anglais, celui-ci obtenait en 1824 un brevet pour son produit, qu'il nommait ciment portland parce qu'il produisait un béton qui avait la couleur de l'excellente pierre naturelle extraite de l'île calcaire de Portland située à L'ouest de l'île de Wright en Angleterre, le nom Portland a été conservé et utilisé partout dans le monde [3].

Depuis de nombreuses années, le ciment Portland constitue le matériau de construction le plus utilisé dans le monde à cause de ses performances mécaniques, sa tenue au feu et son coût compétitif. Cependant, sa fabrication est très énergivore et dégage une quantité importante de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) bien connu pour son incidence sur l'effet de serre. Ce  $\text{CO}_2$  provient de la dépense d'énergie pour produire de très hautes températures et de la décarbonatation du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) en chaux ( $\text{CaO}$ ) et en gaz carbonique. Les émissions de ce dernier provenant de l'industrie du ciment ont été estimées à 5-7% des émissions mondiales avec 0,9 tonne émis dans l'atmosphère pour produire une tonne de ciment [4].

#### ***1.1.1. Définition***

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre très fine, composée d'oxydes minéraux dont les deux principaux sont la chaux ( $\text{CaO}$ ) et la silice ( $\text{SiO}_2$ ). Il réagit avec l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation d'une pâte durcissant progressivement à l'air libre.

Le ciment Portland est un ciment hydraulique produit par la pulvérisation du clinker, essentiellement composé de silicates de calcium, avec une faible quantité de sulfate de calcium (qui peut être ajouté sous différentes formes). Les ciments portland sont des liants hydrauliques, c'est-à-dire que leur prise et leur durcissement se fait en se combinant avec l'eau. Cette réaction s'appelle l'hydratation [5].

C'est le matériau le plus utilisé dans le domaine de génie civil, leurs caractéristiques physiques et chimiques, thermiques et mécaniques font de lui le liant numéro 1 dans presque toutes les formulations qui sont au courant avec la construction.

### ***1.2. Fabrication de ciment Portland***

#### ***1.2.1. Procédé de fabrication de ciment Portland***

Le procédé de fabrication du ciment est illustré par la Figure I-1 [6]. Le calcaire et l'argile sont tout d'abord extraits de carrières, puis concassés et dosés avec précision, afin de garantir les performances du produit final.

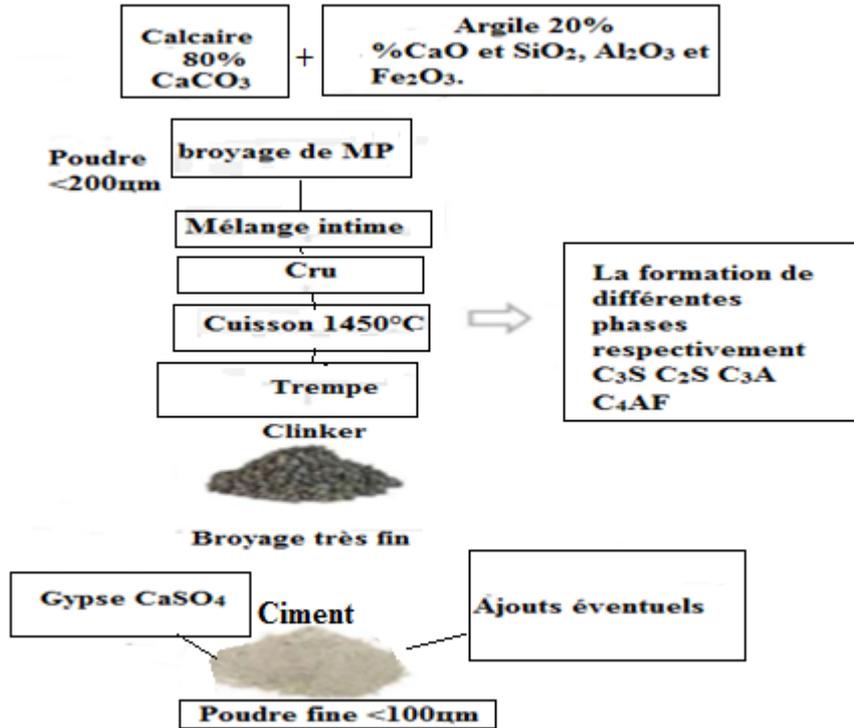


Figure I. 1: Schéma représentatif les procédés de fabrication de ciment.

La plupart des éléments réactifs sont issus de CaO et SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Les particules constituées de ces composés doivent être finement broyées et bien mélangées afin de favoriser la formation des produits de la réaction.

Le mélange obtenu (cru), est ensuite cuit dans un four rotatif et incliné. De cette manière, le cru est chauffé progressivement jusqu'à 1450°C, permettant son passage par les différentes étapes décrites ci-dessous et nécessaires à la formation des différentes phases du ciment [7].

La cristallisation des phases C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF dépend de :

- La composition et de la finesse des grains composant le cru.
- La température de cuisson.
- Le mode et de la durée de refroidissement et le type de combustible utilisé.

Les phases de nature différentes, silicates ou aluminates, ont des propriétés différentes. Les silicates (C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S) représentent 75 à 80 % du ciment et assurent essentiellement la résistance mécanique du ciment hydraté. La phase C<sub>3</sub>S est la plus abondante et présente la plus grande réactivité avec l'eau (hydraulicité). Les aluminates (C<sub>3</sub>A et C<sub>4</sub>AF) sont à l'état liquide à la température de formation du clinker et forment une phase interstitielle autour du solide composé de cristaux de C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S. Lors du refroidissement, cette phase cristallise et forme un squelette assurant la cohésion des silicates [7].

**I.2.2. Etapes de fabrication de ciment portland**

Le ciment portland est obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Il est obtenu en mélangeant dans des proportions calculées, les matières premières extraites de carrière comme indique le tableau I.1 suivant [8] :

**Tableau I. 1 : La matière première extraite de carrière.**

Matières premières extraites	Appellation chimique	Taux
Carbonate de calcium	CaCO <sub>3</sub>	80%
Silice	SiO <sub>2</sub>	14%
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	03%
Oxyde ferrique	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	03%

Le mélange ainsi obtenu est séché et broyé, pour obtenir la « farine/cru ». Celle-ci passe ensuite lentement dans un four rotatif à haute température (1450°C).

Dans la gamme de température comprise entre 800 et 1100°C, interviennent la décarbonatation du carbonate de calcium qui donne de la chaux vive, ainsi que la scission (décomposition) de l'argile en silice et en alumine.

À 1450°C, il y a eu une formation de silicates et d'aluminates de calcium : c'est la clinkérisation. Le clinker obtenu est finement broyé en présence de gypse (3 à 5% en masse) qui joue le rôle d'un régulateur de la prise du ciment. Nous obtenons donc le ciment Portland.

**I.2.2.1. Les étapes de cuisson**

Les étapes de cuisson sont ordonnées en fonction de la température comme suite (Tableau I.2.) [9].

**Tableau I. 2 : Les étapes de cuisson.**

Température (°C)	Phénomène	Explication
T < 200°C	Déshydratation	L'évaporation de l'eau libre
T < 800°C	Préchauffage	
800°C < T < 1100°C	Décarbonatation	Formation de chaux vive (CaO) après la décarbonatation du calcaire (CaCO <sub>3</sub> )
1100°C < T < 1300°C	Formation des silicates et des aluminates	Apparition du mélange fondu Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1300°C < T < 1450°C	Fusion partielle des aluminates	Clinkérisation

- Clinkérisation : processus chimique de formation de matériaux solides sans fusion. C'est lors de cette phase que les éléments argileux dissociés se combinent avec la chaux pour former les différentes phases du ciment, (Tableau I.4) [10].

**I.2.2.2. Les étapes de fabrication de ciment portland**

La fabrication de ciment passe par cinq étapes [11] :

***1.2.2.2.1. Extraction et préparation de la matière première***

Les matières premières sont généralement extraites en présence d'artificiers par havage à l'explosif des parois rocheuses d'une carrière, elles sont conduites à un atelier de concassage afin d'être triées et finement broyées (de 24 à 40 mm). Les blocs sont ensuite acheminés par une bande transporteuse vers le hall de pré-homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement.

La matière première peut varier d'une cimenterie à une autre, en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition de cru reste dans des proportions bien définies.

- Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) : de 77 à 83 %.
- Silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de 16 à 14 %
- Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de 2 à 4 %
- Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : de 1.5 à 3 %

***1.2.2.2.2. Le séchage et broyage***

Pour obtenir une matière première dosée idéalement, le cru doit être séché et finement broyé, puis soigneusement échantillonné afin d'avoir toujours et exactement la même composition et cela pour produire des ciments ayant des qualités constantes.

***1.2.2.2.3. L'obtention de clinker***

Le cru est cuit dans un four rotatif où les flammes atteignent 2000°C, portant ainsi la matière à environ 1450°C. Il existe trois méthodes de cuisson, de la plus ancienne à la plus récente [6].

- **La voie humide** : le cru est transformé en pâte liquide avant la cuisson. Cela implique une grande consommation d'énergie et d'eau. Cette méthode a été abandonnée progressivement dans les années 1970-1980.
- **La voie semi-humide** : le cru est préalablement transformé en granules de 10 à 20 mm avant d'être préchauffé et cuit.
- **La voie sèche** : le cru est préchauffé directement sous forme pulvérulente, puis cuit. Cette dernière méthode est maintenant la plus courante.

***1.2.2.2.4. L'obtention du ciment***

Le clinker doit être finement broyé dans un broyeur à boulets, c'est également lors de cette étape que l'on ajoute au clinker du gypse qui est indispensable à la régulation de prise du ciment (3 à 5%). D'autres constituants secondaires peuvent être ajoutés afin de créer différents types de ciments tels que : le laitier granulé de haut fourneau, cendre volantes, pouzzolanes, tiffes, etc...

***1.2.2.2.5. Conditionnement en sac et en vrac***

Après la fabrication, le ciment est sous sa forme définitive, il est acheminé vers des silos de stockage puis expédié vers les lieux de consommation.

La figure I.2 [7] représente les étapes de fabrication de ciment.

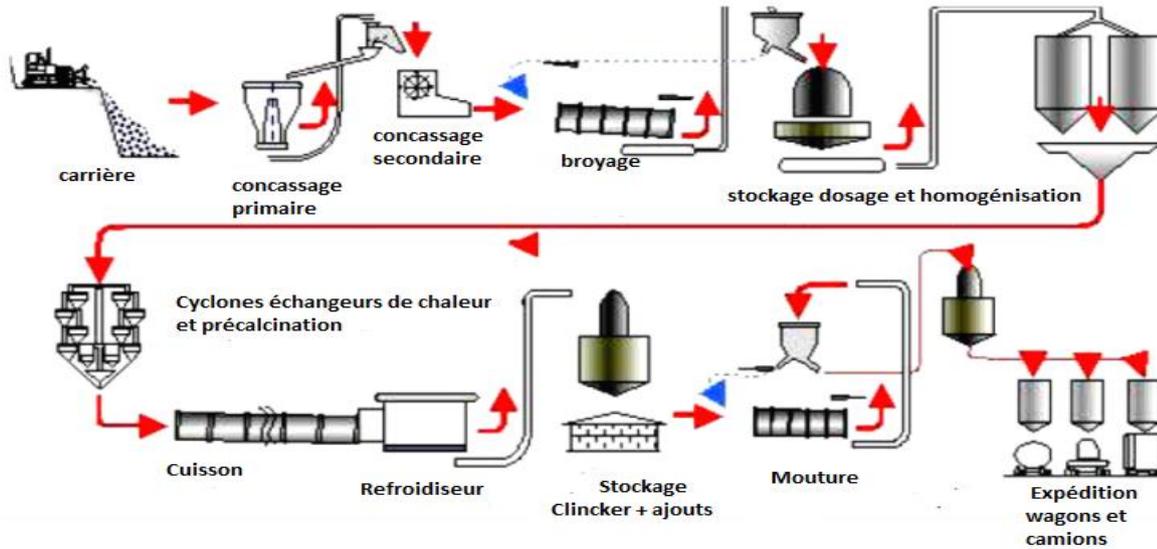


Figure I. 2 : Les étapes de fabrication de ciment.

### I.3. Composition de ciment portland

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker, de gypse, éventuellement d'additions minérales inertes ou actives (fumée de silice, cendre volante...) et de produit minéraux ou organiques (adjuvants). Les abréviations correspondant aux notations normalisées de la chimie de ciment sont présentées dans le Tableau I-3 et le Tableau I-4 [10].

Tableau I. 3 : Notations chimiques et cimentières des principaux constituants du ciment Portland.

Nom	Oxydes	Notation cimentière	Teneurs massiques (%)
Chaux	CaO	C	62-67
Silice	SiO <sub>2</sub>	S	19-25
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	2-9
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	1-5
Oxyde de soufre	SO <sub>3</sub>	Š	1-3
Périclase	MgO	M	0-3

Tableau I. 4 : Notations chimiques et cimentières des phases du ciment Portland.

Nom	Oxyde	Notation cimentière	% massique du clinker
Silicate tricalcique (alite)	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	C <sub>3</sub> S	60-65
Silicate bicalcique (belite)	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> S	10-20
Aluminate tricalcique (célite)	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> A	8-12
Alumino ferrite tetracalcique	Ca <sub>2</sub> (Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> AF	8-10
Gypse	CaO.SO <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O	C-S-H <sub>2</sub>	Ajouté
La chaux	CaO	C	1-3

### ***1.3.1. Le clinker***

C'est le constituant principal du ciment Portland, résultant de la cuisson à 1450°C d'un mélange de 80% de calcaire et de 20% d'argiles (cru). A cette haute température, le calcaire décarbonaté en dioxyde de carbone et en chaux, qui se recombine avec la silice et l'alumine pour former les silicates de calcium et les aluminates [12].

#### ***1.3.1.1. Les silicates de calcium***

Principalement l'alite (silicate tricalcique noté  $C_3S$ ) qui représente 60 à 65% de la masse du ciment. L'alite se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands de l'ordre de 50µm et la belite (silicate bicalcique noté  $C_2S$ ) qui représente environ 10 à 20% de la masse du ciment et possède un aspect de grains légèrement arrondis et rayés (Tableau I-4).

#### ***1.3.1.2. Les aluminates***

La célite (aluminate tricalcique impure noté  $C_3A$ ) et la ferrite (phase alumino-ferritique noté  $C_4AF$ ) représentent chacune moins de 15% du ciment (Tableau I-4). Ces phases sont liquides à la température de formation du clinker et elles cristallisent pendant le refroidissement autour des cristaux de  $C_3S$  et  $C_2S$ . Elles peuvent se trouver sous forme amorphe et impure dans le clinker avec environ 13 % d'éléments en substitution [13].

### ***1.3.2. Le gypse***

Lors du broyage du clinker, le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse ( $CaSO_4, 2H_2O$ ) d'hémihydrate, ou d'anhydrite ( $CaSO_4$ ) (environ 5%) utilisé comme « régulateur de prise » rendant ce dernier moins rapide [14].

Les différents composés du clinker ainsi que le sulfate de calcium représentent plus de 90% des composants du ciment et ne sont pas des composés purs, mais des solutions solides, contenant des impuretés. La pâte durcie finale est le résultat de réactions d'hydratation, entre le clinker et l'eau où les principaux composés du clinker réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps ; les hydrates [15] [16] [17] [18] [19] [20].

### ***1.4. Classes de ciment portland***

Les ciments peuvent être classés en deux parties, en fonction de leur composition et en fonction de leur résistance normale [21].

#### ***1.4.1. Classification des ciments portland en fonction de leur composition***

D'une manière générale, les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par. Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

- 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 (Tableau I.5) représente les différents types de ciment en fonction de leur composition [21].

**Tableau I. 5 : Les différents types de ciment portland en fonction de leur Composition.**

Composition de ciment portland	Ciment portland artificiel	Ciment portland composé	
	CPA- CEM I	CPJ- CEM II/A	CPJ- CEM II/B
Clinker(K)	/95%	80%<94%	65%<79%
Laitier(S)	+	6%< totale <20% (fumée de silice <10%)	21%< totale <35% (fumée de silice <10%)
Pouzzolanes(Z)	+		
Cendre siliceuse (V)	+		
Fumée de silice (D)	+		
Cendre calcique (W)	+		
Schistes (T)	+		
Calcaire (L)	+		
Fillers (F)	+	/	/

#### I.4.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes (32,5, 42,5 et 52,5) sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours. Les sous classes (32,5 R, 42,5 R et 52,5 R) sont associées à ces trois classes principales pour désigner des ciments [21]. Les huit types de ciment portland à établir sont les suivants [5].

**Tableau I. 6 : Les différents types du ciment portland en fonction de résistance normale.**

Les types de ciment portland	Classification
Type I	Normale
Type IA	Normale, à l'air entraîné
Type II	A résistance moyenne aux sulfates
Type IIA	A résistance moyenne aux sulfates, à l'air entraîné
Type III	A haute résistance initiale
Type IIIA	A haute résistance initiale, à air entraîné
Type IV	A faible chaleur d'hydratation
Type V	A haute résistance aux sulfates

#### I.5. L'hydratation de ciment portland

La pâte de ciment hydratée est le résultat des réactions chimiques entre le ciment et l'eau de gâchage. Ces réactions d'hydratation leur forme une pâte qui durcit progressivement et devient un matériau solide à partir de quelques heures puis continue d'évoluer pendant plusieurs mois [13].

**I.5.1. Les bilans réactionnels de l'hydratation d'un ciment Portland**

Les composés du clinker peuvent réagir d'une façon plus ou moins indépendante et certains grains de ciment peuvent rester anhydres. C'est la précipitation des produits hydratés qui forme avec le temps une structure rigide mécaniquement stable. Par ailleurs, certains hydrates possèdent des structures atomiques elles sont aussi évolutives dans le temps et qui ne sont pas totalement éclaircies [22].

**I.5.1.1. L'hydratation des silicates**

La première phase d'hydratation est la recristallisation du gypse et l'hydratation des C<sub>3</sub>S (alite) et C<sub>2</sub>S (bélite) qui se passe en quelques minutes après le contact eau-ciment. Les C<sub>3</sub>S et les C<sub>2</sub>S produisent des silicates de calcium hydratés appelé C-S-H ainsi que de l'hydroxyde de calcium appelé portlandite ; Ca(OH)<sub>2</sub> [23].

- **Les C-S-H**

Il s'agit d'un composé mal cristallisé représentant environ 50 à 60 % du volume total des hydrates ce qui en fait le composé majoritaire de la pâte de ciment hydratée. Les C-S-H ont une structure complexe lamellaire constituée de feuillets comme les argiles (Figure I-3) [24].

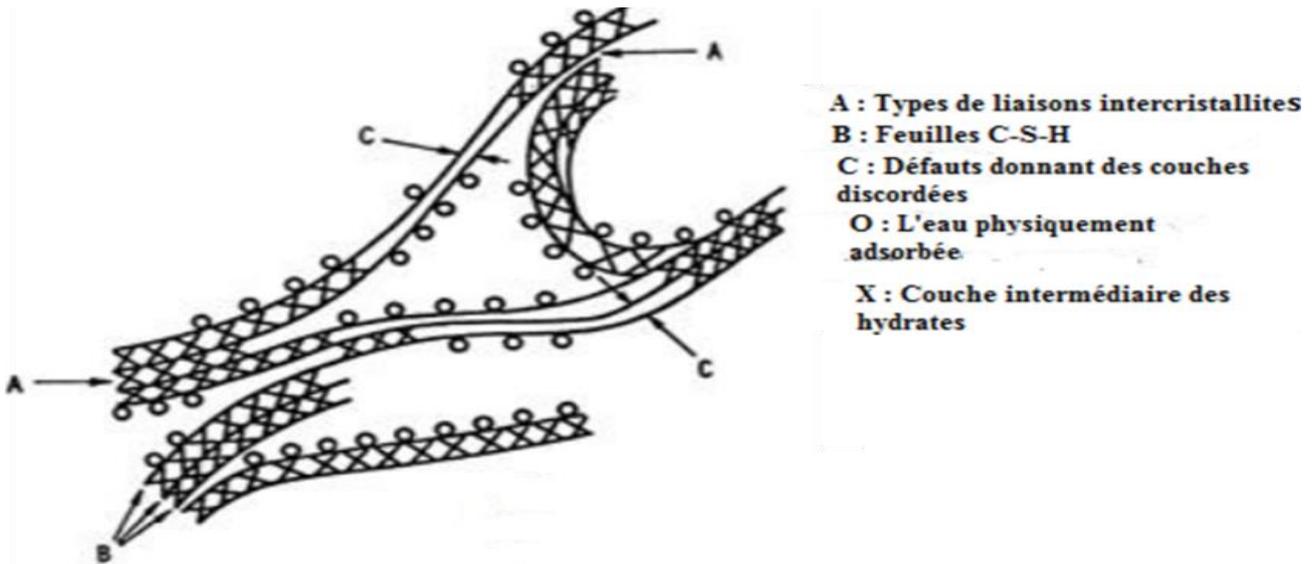


Figure I. 3 : Structure de C-S-H.

- **La portlandite**

La portlandite cristallise sous forme de cristaux hexagonaux prismatiques relativement grands, orientés sous forme de couches (Figure I.4) [25]. Elle occupe de 20 à 25% du volume total de la pâte de ciment hydratée et se forme par précipitation dans l'espace poreux de la pâte de ciment. En raison de la taille de ses cristaux, elle présente une faible surface spécifique et peut, selon les conditions d'hydratation, présenter une structure amorphe [26]; [13]; [25];[27].

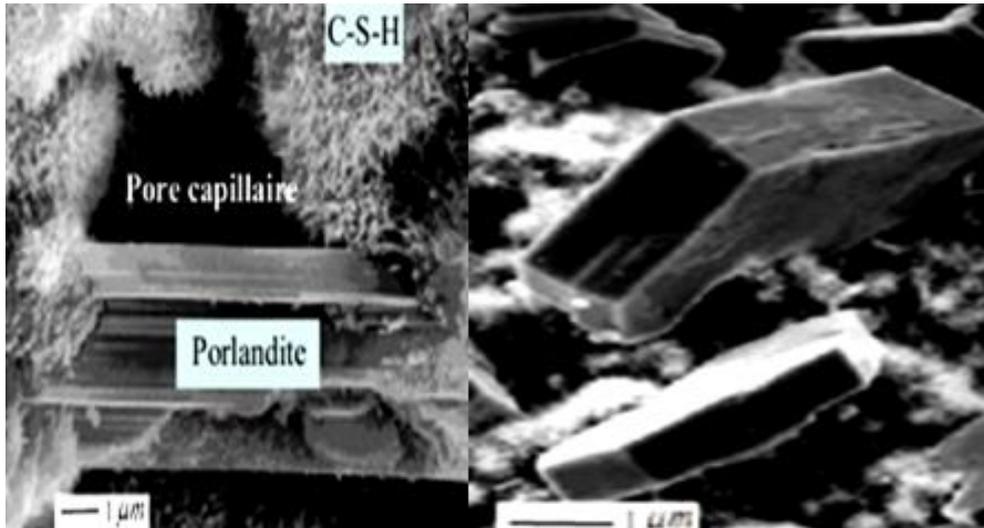


Figure I. 4 : Image MEB des cristaux de Portlandite.

Pour un ciment donné, les quantités de C-S-H et de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formées dépendent essentiellement du rapport eau/ciment noté E/C et du temps de réaction.

En moyenne, une pâte de ciment hydratée ordinaire contient 50 à 70 % de C-S-H et 25 à 27 % de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . La phase C-S-H est donc la phase majoritaire dont dépend l'évolution des caractères physiques et plus particulièrement les propriétés mécaniques du matériau.

La structure des C-S-H n'est pas bien définie mais toutes les observations montrent qu'elle forme un gel peu cristallin. L'aspect structural de cette phase sera étudié ultérieurement.

La Portlandite quant à elle, ne présente que peu d'importance de point de vue résistance mécanique (on lui attribue toutefois un rôle dans la résistance en traction), mais par contre, cet hydrate joue un rôle primordial dans le processus de durabilité [13].

### 1.5.1.2. L'hydratation des aluminates

#### 1.5.1.2.1. Hydratation de $\text{C}_3\text{A}$

Les réactions d'hydratation des aluminates de calcium hydratés se font après les réactions des silicates et sont grandement influencées par le milieu d'hydratation. Elles sont très rapides en l'absence de sulfates et forment directement des aluminates hydratés [28].

C'est pour cette raison que le sulfate sous forme de gypse est ajouté au clinker afin de contrôler les réactions. Le  $\text{C}_3\text{A}$  réagit avec les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  issus de la dissolution du gypse et donne naissance à un sulfoaluminate de calcium hydraté communément appelé ettringite ( $\text{Ca}_3\text{S}_3\text{H}_{32}$  ou Aft). L'ettringite réagit avec le  $\text{C}_3\text{A}$  non hydraté à la fin de la réaction et se transforme en un autre sulfoaluminate de calcium hydraté ( $\text{C}_4\text{ASqH}_{12}$  ou Afm) [29] ; [30].

#### 1.5.1.2.2. Hydratation de $\text{C}_4\text{AF}$

De nombreuses études ont montré que l'hydratation des phases  $\text{C}_4\text{AF}$  est semblable à celle de  $\text{C}_3\text{A}$  lorsque les conditions d'hydratation sont identiques [31]. La cinétique d'hydratation du férroaluminate de

calcium est par contre, beaucoup plus lente que celle de l'aluminate de calcium à température ambiante et s'accélère vers 50°C. Lors de la dissolution de la phase anhydre  $C_4AF$ , l'aluminium est libéré plus facilement que le fer [32].

### ***1.5.2. Les périodes d'hydratation***

Suivant la cinétique des réactions ayant lieu et des produits formés, l'hydratation du ciment peut être divisée en plusieurs périodes [33].

#### ***1.5.2.1. Période initiale***

Dissolution des phases anhydres, début de précipitation de l'ettringite et de quelques hydrates issus des phases silicates.

#### ***1.5.2.2. Période dormante/d'induction***

L'hydratation du  $C_3A$  ralentie et l'ettringite précipite lentement et de façon continue. Les grains de ciment sont recouverts par une fine couche de C-S-H. Les grains sont pour la plupart encore indépendants.

#### ***1.5.2.3. Période d'accélération***

Tous les sulfates ayant été consommés, l'ettringite se dissout et les phases AFm précipitent. La dissolution des phases  $C_3S$  et  $C_2S$  s'accélère avec la formation massive des C-S-H et de la portlandite. La pâte s'épaissit : début de prise.

#### ***1.5.2.4. Période de décélération***

Le taux d'hydratation est contrôlé par :

- La consommation des petites particules :
  - Particules  $< 3\mu\text{m}$  : complètement consommées à  $t = 10\text{h}$
  - Particules  $< 7\mu\text{m}$  : complètement consommées à  $t = 24\text{h}$
- Le manque d'espace entre les grains.
- L'absence de surface anhydre libre.
- La diffusion des ions qui est ralentie au fur et à mesure que la couche d'hydrate d'épaissit.

#### ***1.5.2.5. Réaction lente et continue***

Limitée par la quantité d'eau, continue en induisant un durcissement progressif du matériau.

La Figure I.5 résume les cinq périodes d'hydratation de ciment [41] :

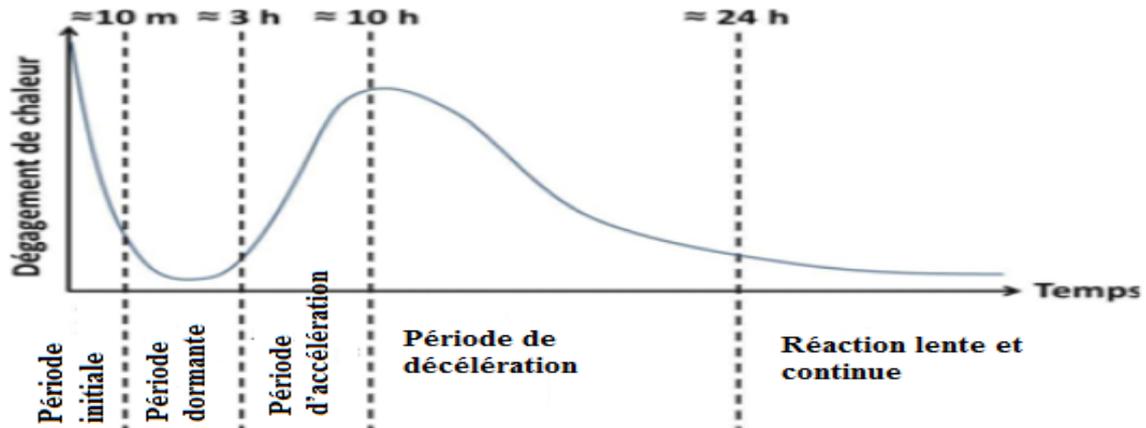


Figure I. 5 : Les périodes d'hydratation de ciment portland.

## 1.6. Les ajouts cimentaires

### 1.6.1. Introduction

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  (30% de la masse anhydre du ciment), cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte de ciment hydraté, il peut même être responsable du problème de la durabilité puisque peut être assez facilement lessivée par l'eau ; ce lessivage et ainsi de suite le seul aspect positif de la présence de la chaux dans un béton est qu'il maintient un PH élevé qui favorise la stabilité de la couche d'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures.

La plupart des ajouts cimentaire ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui en présence d'eau peut se combiner avec la chaux libérée par l'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui de ciment portland [34].

### 1.6.2. Les types des ajouts cimentaires

#### 1.6.2.1. Les ajouts chimiques

On appelle adjuvant tout ingrédient, autre que le ciment portland, l'eau et les granulats, que l'on ajoute au mélange immédiatement avant ou pendant le malaxage. Les grains de ciment présentent sur leur surface un grand nombre de charges électriques, si bien qu'ils ont tendance à flocculer lorsqu'ils sont mis en présence d'un liquide aussi polaire que l'eau, les séquences de cette floculation sont une dispersion des particules non uniformes dans le matériau et une perte de maniabilité du béton causée par un emprisonnement de molécules d'eau à l'intérieur des flocculats formés [35].

Les ajouts chimiques peuvent être divisés en deux types : l'un agit sur le système ciment-eau en influençant la tension superficielle et en s'adsorbant sur les surfaces de ciment alors que l'autre utilise leurs propriétés non ioniques pour affecter la réaction entre le ciment et l'eau [36]. Selon [37], un adjuvant est un produit qui, incorporé à faible dose dans le béton, mortier au moment de leur malaxage, provoque des

modifications recherchées de leurs propriétés rhéologiques leur emploi ne doit pas détériorer les caractéristiques du béton ou du mortier.

### ***1.6.2.2. Les ajouts Minéraux***

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution partielle du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux. Il a été prouvé que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux [38].

#### ***1.6.2.2.1. Classification des ajouts minéraux***

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon [39] en ajouts minéraux inertes et actifs qui se divisent selon leur réactivité comme il est indiqué ci-dessous (le tableau I.7) [40].

**Tableau I. 7 : Classification des ajouts selon leur réactivité.**

Type des ajouts	Réactivité	Matériaux
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium(calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres a diatomées)
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

#### ***1.6.2.2.1.1. Principaux ajouts minéraux inertes***

Ce sont des matériaux inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland: ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau [40].

#### ***1.6.2.2.1.2. Principaux ajouts minéraux actifs***

##### ***1.6.2.2.1.2.1. La pouzzolane***

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes [41].

#### ***1.6.2.2.1.2.1.1. Pouzzolane naturelle***

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et D'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.



**Figure I. 6 : Pouzzolane naturelle.**

#### ***1.6.2.2.1.2.1.2. Pouzzolane artificielle***

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement : argiles, schistes, latérite, bauxite [35].

#### ***1.6.2.2.1.2.2. La fumée de silice***

Les fumées de silice sont des particules très fines (taille moyenne des graines environ 1  $\mu\text{m}$ ) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'argiles Ferro silicium.

#### ***1.6.2.2.1.2.3. Laitier de haut Fourneau.***

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau.

### ***1.7. Conclusion***

Le ciment fait l'objet de plusieurs recherches, qui rentre dans le cadre d'amélioration des caractéristiques techniques à savoir ses propriétés physicomécaniques, et sa durabilité, récemment la recherche s'est penchée sur les différents ajouts, qui présentent des intérêts cernés par les aspects techniques, économiques et environnementaux.

**De point de vue technique**, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée. Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

**De point de vue économique**, le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton. Il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, et sont moins coûteux que le ciment Portland [40].

**De point de vue environnemental**, la production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO<sub>2</sub>. Le taux de substitution de clinker est de même ordre que la diminution de rejet de CO<sub>2</sub>.

## **Chapitre II : Valorisation des déchets de verre**

**II.1. Les déchets solides**

**II.1.1. Introduction**

La pollution d'origine humaine peut avoir un impact très important sur la santé et dans la biosphère comme en témoigne l'exposition aux polluants et le réchauffement climatique qui transforme le climat de la terre et son écosystème, en entraînant l'apparition de maladies inconnues jusqu'alors dans certaines zones géographiques, des migrations de certaines espèces, voire leur extinction si elles ne peuvent s'adapter à leur nouvel environnement biophysique [42].

Un déchet en général, est un matériau qui est rejeté après qu'il ait accompli un travail ou qu'il ait rempli sa mission. C'est donc quelque chose qui a devenue inutile. Désormais, elle est jetée à la poubelle, et qui n'a aucune valeur économique pour la plupart des personnes. Un résidu qui peut être éliminé (lorsqu'il est destiné à l'enfouissement dans les décharges ou à être enterré) ou recyclé (obtenant ainsi un nouvel usage).

**II.1.2. Définition sur les déchets solides**

Les déchets solides est l'accumulation de matériaux à l'état solide résultant de diverses activités humaines dans différents domaines de la même taille et occupant l'espace, pour cela devrait toujours travailler sur la recherche d'endroits pour se débarrasser de ces déchets. Auparavant, les déchets solides ne causaient pas de tout problème environnemental et qu'ellesont été exploité par certaines créatures vivantes et des objets qui sont exploités dans leur vie et dans cette forme, ils sont la récupération et le recyclage de ces matériaux dans la nature du processus [42].

**II.1.3. Les types de déchets solides**

L'adjectif solide, d'autre part, mentionne ce qui est massif ou ferme. Un corps solide conserve son volume (ou sa taille) et sa forme constante, grâce à la grande cohésion des molécules. De cette façon, il se distingue des autres états d'agrégation de la matière, tels que l'état liquide ou l'état gazeux [42].

**II.1.3.1. Déchets solides non dangereux**

Les déchets solides non dangereux peuvent être devisés en trois parties, comme indique la figure II.4 ci-dessous, comme suite :

**II.1.3.1.1. Déchets solides municipaux**

Comprend tous les objets quotidiens jetés des ménages, des entités commerciales et institutionnelles, l'horticulture et le balayage des routes. Cela comprend des articles tels que l'emballage, le papier, le carton, les déchets alimentaires, les sacs en plastique et les conteneurs, les bouteilles en verre, les coupures de gazon, les meubles, les pneus, les articles électriques et électroniques et les métaux.

**II.1.3.1.2. Déchets agricoles et animaux**

Les déchets agricoles comprennent les résidus de cultures primaires qui restent dans les champs après la récolte et les résidus de transformation secondaires provenant des récoltes des cultures pendant la production des aliments, des aliments pour animaux. Cela est généré au cours de la production et de la

distribution par décomposition de denrées alimentaires, de légumes ou de viande, d'enlèvement de pièces non utilisables [42].

#### **II.1.3.1.3. Déchets industriels**

Comprend les déchets issus de produits chimiques organiques, de produits chimiques inorganiques, de fer et d'acier, de matières plastiques et de résines, de pierre, d'argile, de verre, de béton, de pâtes et papiers, d'aliments et de produits apparentés [42]. Les déchets industriels ne pénètrent pas dans le flux de déchets solides municipaux et sont donc mis en décharge ou traités séparément.

##### **II.1.3.1.3.1. Déchets de construction et de démolition**

Les déchets comprennent les débris générés pendant la construction, la rénovation et la démolition des bâtiments, de routes et de ponts. Il peut s'agir de matériaux de construction encombrants et lourds composés de béton, de déchets de bois de construction, d'asphalte de routes et de bardeaux de toit, de gypse de plâtre, de métaux, de briques, de blocs, de verre, de matières plastiques, Souches, terre [33].

##### **II.1.3.1.3.2. Déchets biomédicaux**

Les déchets biomédicaux se composent de tous les déchets produits dans les établissements de santé, y compris les hôpitaux, les cliniques, les cabinets de médecins, les dentistes et les vétérinaires, les banques de sang, les établissements de soins à domicile, les salons funéraires, les installations de recherche médicale et les laboratoires [33].

##### **II.1.3.1.3.3. Déchets inertes**

Les déchets inertes sont les déchets les plus stables, les déchets issus de démolition (les bétons, briques, parpaings, tuiles et céramiques, granulats...) comme montre la figure II.1 [42]. En cas de stockage en décharge, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante et ne posent pas de danger pour l'homme et pour l'environnement.



**Figure II. 1 : Déchets inertes.**

##### **II.1.3.1.3.4. Les déchets industriels banals (DIB)**

Sont non inertes et non dangereux générés par les activités ; figure II.2, publiques ou privées, du commerce, de l'artisanat, de l'industrie ou du service. Ce sont des déchets qui ne présentent pas de danger particulier vis-à-vis des personnes ou de l'environnement et qui peuvent être éliminés dans les mêmes conditions que les ordures ménagères. Il s'agit notamment des cartons, des papiers, des plastiques, de plâtre, de verre, de bois d'ouvrage, des métaux.....etc [42].



**Figure II. 2 : Déchets banals**

### ***II.1.3.2. Déchets solides dangereux***



**Figure II. 3 : Déchets dangereux (déchets ménagers).**

Les déchets solides dangereux peuvent être classés en cinq parties comme indique la figure II.4, on distingue :

#### ***II.1.3.2.1. Déchets ménagers dangereux***

Cela comprend les produits ménagers usagés et les restes contenant des composants corrosifs, toxiques, inflammables ou réactifs. Les exemples sont les déchets médicaux, l'huile usée, les peintures, les nettoyants, les batteries, les pesticides et les ampoules lampes. Puisqu'ils contiennent des ingrédients potentiellement dangereux, une élimination inappropriée peut entraîner des risques pour la santé humaine et la pollution de l'environnement, comme montrés dans la figure ci-dessus (Figure II.3)

#### ***II.1.3.2.2. Déchets industriels dangereux***

Les principaux générateurs de déchets dangereux dans toute région sont les installations industrielles, les unités de fabrication et de traitement, les ateliers et les unités de maintenance, les installations nucléaires, les unités chimiques, etc...

##### ***II.1.3.2.2.1. Déchets universels***

Les déchets dangereux désignés tels que les batteries, les pesticides, le matériel contenant du mercure et les ampoules / lampes comme déchets universels. C'est un moyen de les rationaliser séparément et de contrôler et de faciliter la collecte, le stockage, la récupération ou le traitement appropriés

II.1.3.2.2. Déchets mélangés

Il s'agit de déchets qui contiennent à la fois des déchets radioactifs et des déchets dangereux, ce qui les rend complexes à réguler. Les déchets mixtes à faible niveau proviennent de sources telles que les usines industrielles, les hôpitaux et les centrales nucléaires, ainsi que de procédés tels que les tests et la recherche en diagnostic médical, le développement pharmaceutique et biotechnologique, la recherche sur les pesticides.

II.1.3.2.2.3. Déchets caractéristiques

Les déchets caractéristiques sont les déchets qui définissent en fonction de leurs caractéristiques spécifiques d'inflammabilité, de corrosivité, de réactivité et de toxicité. Constitués d'huiles usées et de solvants. Les déchets corrosifs comme les acides de batterie sont caractérisés. Les déchets réactifs comprennent des batteries au lithium-soufre et des explosifs qui peuvent provoquer des explosions, Les exemples de déchets toxiques comprennent le mercure et le plomb [43].

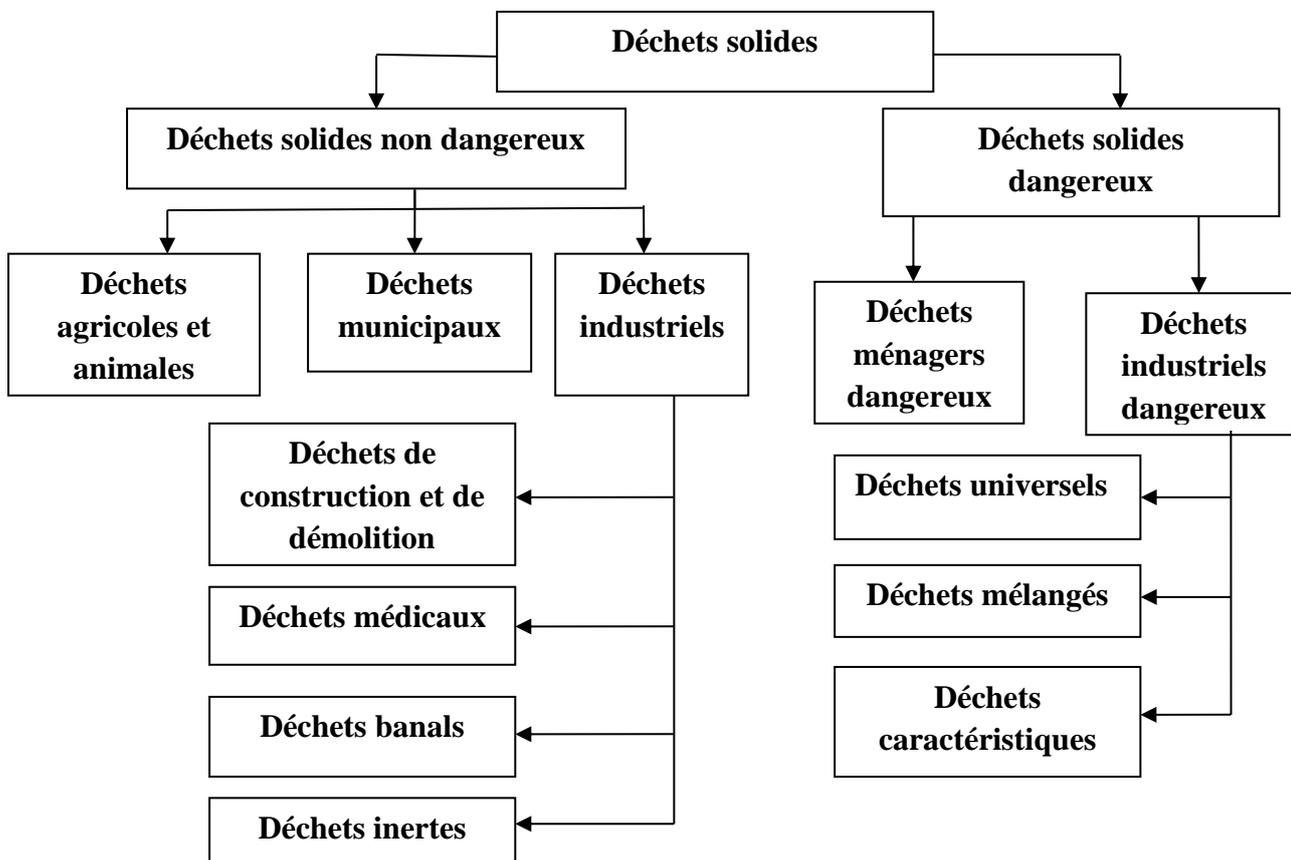


Figure II. 4 : Schéma représentatif les types de déchets solides.

II.1.4. Destination des déchets solides

II.1.4.1. Décharges

Ce sont des zones conçues techniquement où les déchets sont disposés scientifiquement. Ils sont caractérisés par des doublures qui empêchent les infiltrations des matériaux candidats aux eaux souterraines. Il existe différentes conceptions pour les décharges [42].

**II.1.4.2. Combustion ou incinération**

La combustion ou l'incinération des déchets réduisent la quantité d'espace d'enfouissement nécessaire à la combustion des déchets de manière contrôlée.

**II.1.4.3. Stations de transfert**

Les stations de transfert sont des installations intermédiaires où les déchets solides municipaux collectés sont déchargés des camions de collecte, compactés pour réduire le volume des déchets, et conservés pendant une courte période avant de les recharger sur des camions ou des conteneurs plus larges ou à grande distance pour l'expédition aux décharges ou à d'autres installations de traitement et d'élimination.

**II.1.4.4. Récupération et recyclage**

Les déchets sont également de bonnes sources de matières premières. La récupération et le recyclage des déchets peuvent aider à réduire l'utilisation de matériaux vierges pour la production de nouveaux produits (ciment portland dans notre travail pratique). Le recyclage des déchets de construction et de démolition peut également conserver l'espace dans les décharges et de grandes quantités de matériaux comme les métaux, le verre, les plastiques et les cartons peuvent être récupérés [43].

**II.1.4.5. Compostage**

Le compostage est un moyen de ramener les nutriments dans l'environnement en permettant aux microorganismes de transformer les déchets en fumier. L'application de ce fumier à des terres agricoles peut améliorer la fertilité du sol en lui fournissant des éléments nutritifs essentiels [42].

**II.2. Le verre**

**II.2.1. Définition de verre**

Matériau transparent, brillant, solide, tel que ceux utilisés dans les fenêtres, flacon, ou des lunettes. Verre scientifique sur toute structure de matière solide ne possède pas un cristal montre un décalage de verre lorsqu'il est chauffé vers la composition liquide.

Le verre 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 [44].



Figure II. 5 : Bouteilles en verre.

### II.2.2. Propriétés de verre

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence [45]. La figure II.6 résume les propriétés de verre.

#### II.2.2.1. Propriétés physiques

- **La transparence.**
- **La dureté.**
- **La densité** : elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg.
- **La résistance et l'élasticité** : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.
- **L'imperméabilité** : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue ».

#### II.2.2.2. Propriétés thermiques

- **La dilatation** : c'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps.
- **La conductivité** : il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C.
- **Il est ininflammable et incombustible**

#### II.2.2.3. Propriétés chimiques

- **L'action de l'eau** : l'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.
- **L'action de l'air** : les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce qui donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.
- **L'action de la lumière** : exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent

- **L'action des acides** : ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre peut donc être dissout.

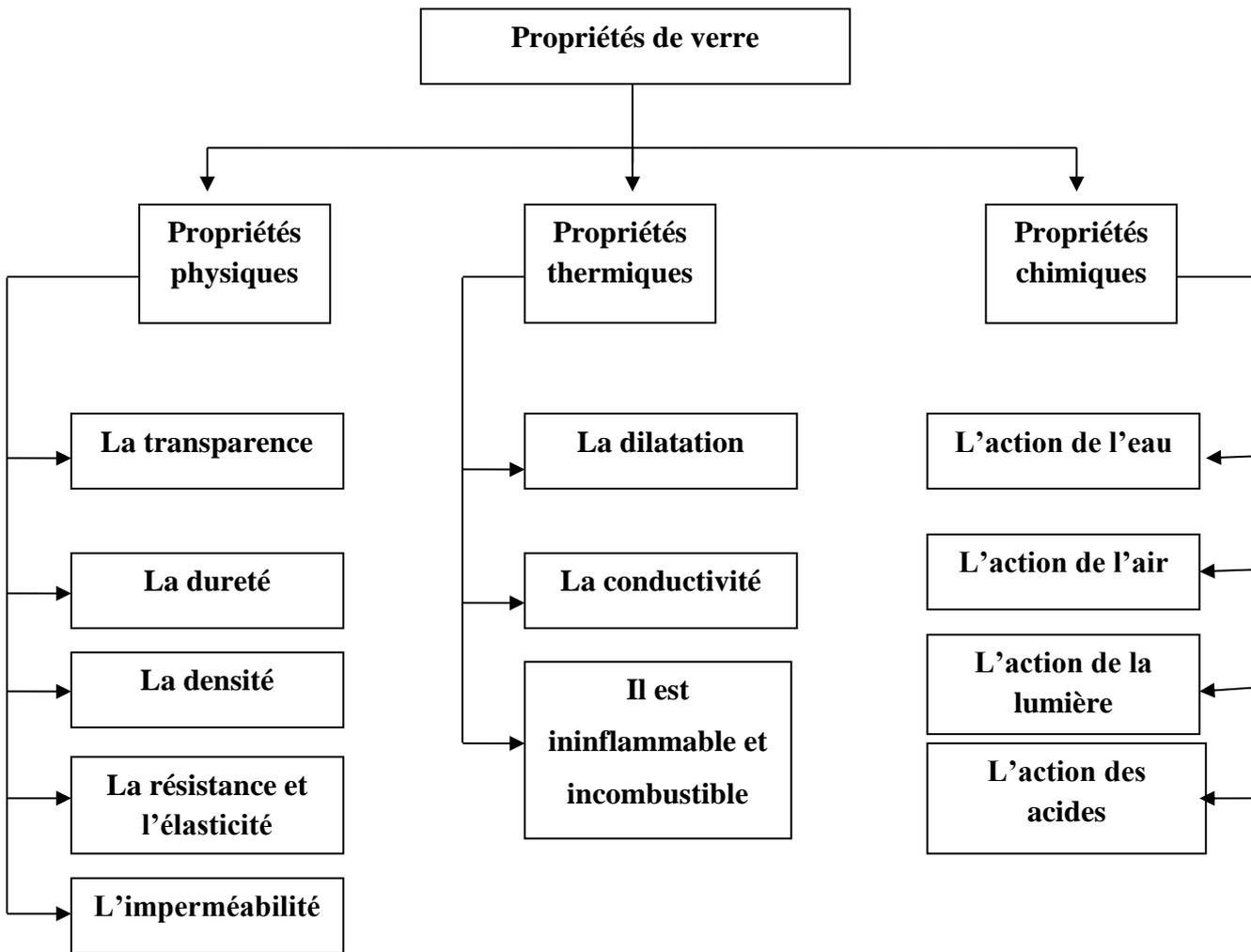


Figure II. 6 : Schéma représentatif les propriétés de verre.

### II.2.3. Réaction pouzzolanique du verre

#### II.2.3.1. Introduction

L'activité pouzzolanique du verre peut être évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai Chapelle, ATG et DRX [45].

La Figure (II-7) rassemble les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec ajout de verre à la résistance du mélange témoin [46].

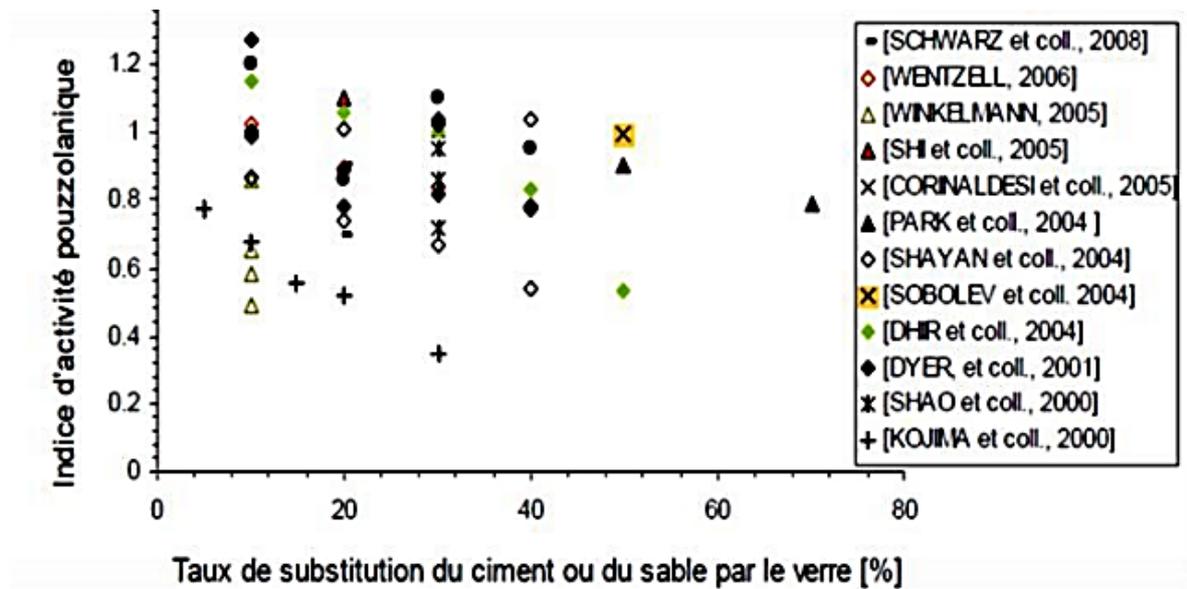


Figure II. 7 : Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes.

Il a été difficile, voire impossible, de rassembler tous les travaux élaborés dans les mêmes conditions.

Toutefois les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

1. La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique : plus les grains de verre sont fins, meilleure est son activité pouzzolanique.
2. La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente.
3. L'activité pouzzolanique varie d'un verre à un autre, selon leurs couleurs, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable [46].

### II.2.3.2. Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes

La cinétique de la réaction du verre est plus rapide que celle des cendres volantes qui ne réagissent qu'après une à plusieurs semaines. Par exemple, une substitution de 30 % du ciment dans les bétons affiche une meilleure résistance en compression que ceux confectionnés avec de la cendre volante.

Ces auteurs ont montré qu'à trois jours de cure, la résistance des mortiers comportant 20 % de verre en remplacement de ciment est 70 % plus importante que celle de mortiers confectionnés avec de la cendre volante [47].

### II.2.3.3. L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolane

Concernant ce point, plusieurs études en laboratoire ont été conduites. L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane notamment la fumée de silice, la cendre volante ou même le méta-kaolin en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel [46].

### II.2.3.4. Étude de la pouzzolanité

La figure suivante (La figure II. 7) présente les résistances en compression des mortiers contenant les différentes classes de verre [48]. Comme on peut le constater, les résistances dépendent de la finesse et de la teneur en verre. Des résistances importantes sont obtenues pour les particules les plus fines ( $C_8$ ), avec

des valeurs dépassant parfois celles de la référence sans verre quel que soit le taux de remplacement utilisé (jusqu'à 40 %). Néanmoins, la tendance générale est que le remplacement du ciment par le verre conduit à une baisse de résistance en compression.

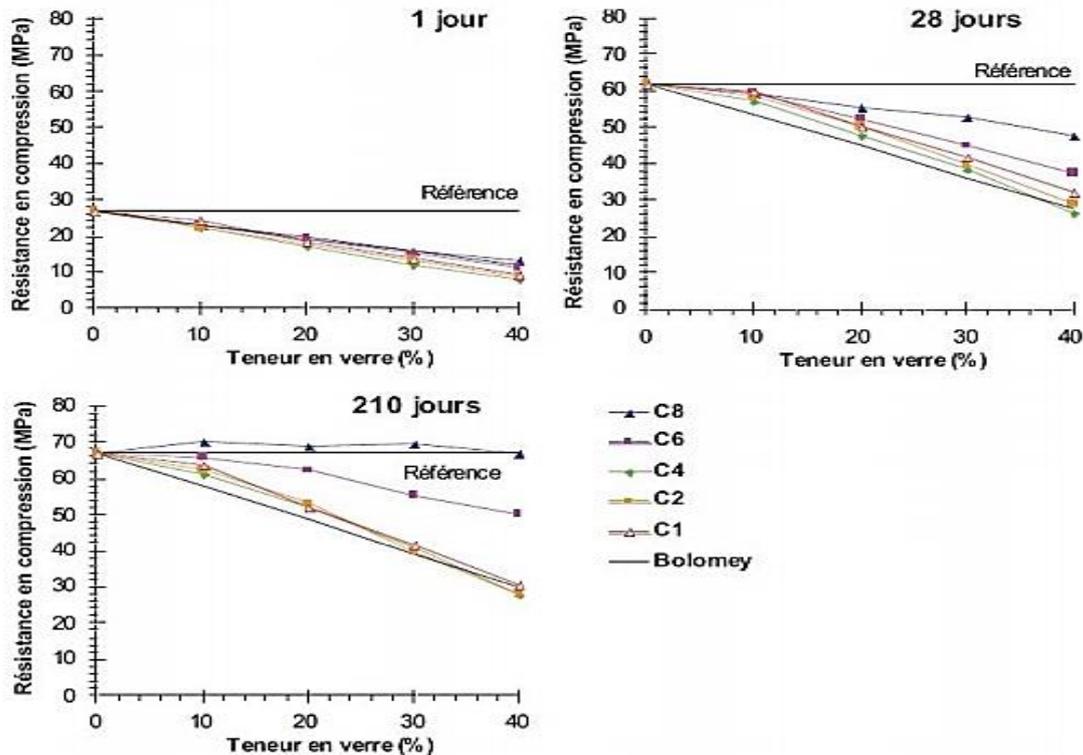


Figure II. 8 : Résistances en compression des mortiers avec le verre.

### II.3. Déchet de verre

#### II.3.1. Introduction

Les déchets de verre générés nécessitent des solutions de traitement efficaces. Plusieurs voies de valorisation se développent afin de trouver des débouchés aux déchets de verre.

Des opérations de broyage et de tamisage permettent d'obtenir une poudre de verre qui se trouve de nombreuses applications comme additifs (peintures, matériaux plastiques, béton, carrelage, tuiles...) ou pour élaborer de nouveaux matériaux pour le bâtiment comme les mousses de verre isolantes ou les billes de verre expansé.

L'utilisation de déchet dans la production de ciment et de béton s'avère une voie prometteuse et peut contribuer à sauver les ressources naturelles de la terre, économiser l'énergie et réduire le coût de la production de ciment et le prix du ciment, ainsi que la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'impact environnemental.

En plus, cette utilisation aide à surmonter les multiples challenges environnementaux, économiques et sociaux qui entravent la production du ciment. Cette industrie devra répondre à des exigences commerciales c'est-à-dire, satisfaire le marché mondial en quantités suffisantes, sauvegarder les ressources naturelles avec une utilisation rationnelle et protéger l'environnement en réduisant les pollutions qui menacent la faune et la flore [49].



**Figure II. 9 : Déchet de verre en Algérie.**

### **II.3.2. Source de déchets de verre (chiffre)**

Statistiquement, Les quantités exactes des déchets de verre dans le monde, ne sont connues d'une façon claire et précise à cause d'un manque d'informations de différents pays, comme le Moyen-Orient par exemple. Selon l'estimation des déchets solides des Nations Unies, en 2004, il y avait 200 millions de tonnes de déchets solides dont 7 % des déchets de verre, soit 14 millions de tonnes de déchets de verre [50].

Une énorme quantité de ressources naturelles est utilisée par les industries du verre comme matières premières. On a estimé que chaque 1 kg de verre en feuille, consommait 1,73 kg de matières premières et 0,15 m<sup>3</sup> d'eau [1]. En outre, il a été constaté que la production de chaque tonne de verre container consommé 1,2 tonne des matières premières coûteuses [51].

En plus, l'industrie du verre est considérée comme l'une des industries les plus intensives en énergie, en raison de la nécessité d'une température élevée jusqu'à 1600 ° C pour faire fondre les matières premières. On a estimé que chaque 1 kg de feuille de verre produisait 16,9 MJ de déchets de chaleur [52]. Tandis que la production de chaque tonne de verre européen consommait 7,8 GJ d'énergie.

La consommation totale d'énergie de l'industrie européenne du verre a été de 352 PJ en 2007, soit environ 13-17 % de la consommation totale d'énergie industrielle en Europe [53].

D'autre part, l'utilisation intensive de l'énergie est rencontrée avec une forte émission de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre. En 2007, on a constaté que la production de chaque tonne de verre européen produisait 0,57 tonne de CO<sub>2</sub>. L'étape de fusion ne peut libérer que 0,2 tonne de CO<sub>2</sub> pour chaque tonne de verre d'emballage produit [51].

La production totale mondiale de verre a été d'environ 89,4 millions de tonnes en 2007. Les pays de l'UE ont produit environ 38,3 millions de tonnes dans la même année, ce qui représente environ 30 % de la production mondiale totale, a fait de l'UE le plus grand producteur de verre en 2007.

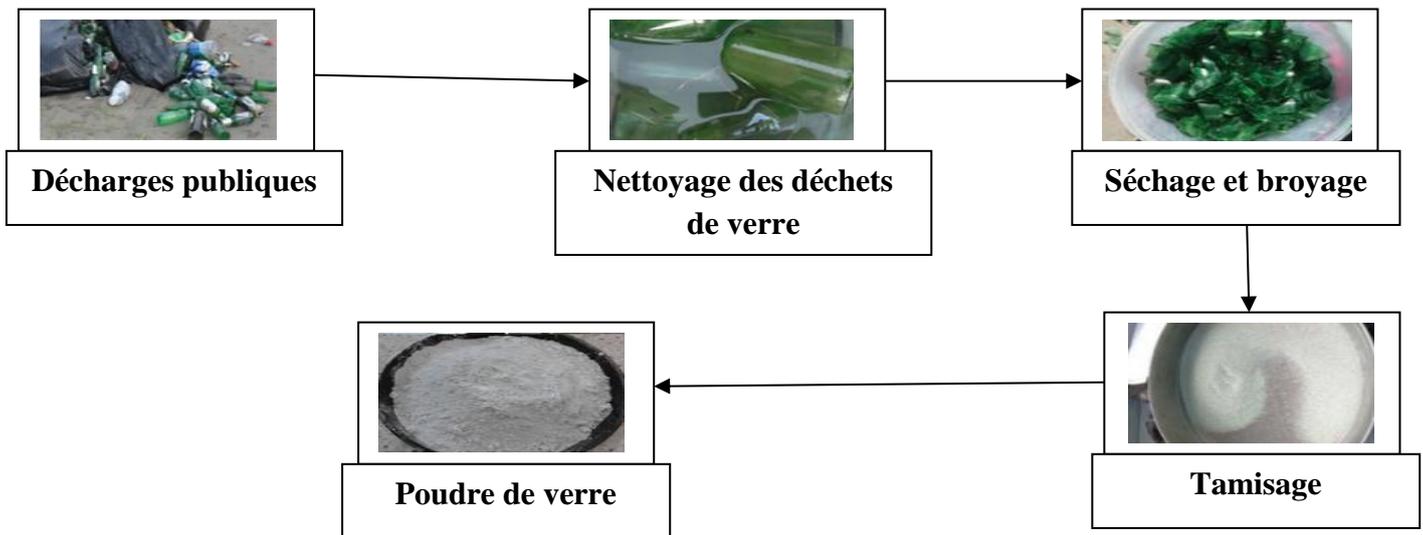
Environ 83 % de la production de verre de l'UE était le verre des conteneurs et le verre plat, c'est-à-dire le verre sodocalcique [53].

On s'attend à ce que la production totale de verre augmente en raison de l'augmentation de l'industrialisation et de l'amélioration du niveau de vie, c'est-à-dire que le déchet de verre augmentera

également. À titre d'exemple, le total des déchets de verre de l'UE en 2002 était de 3 millions de tonnes, alors que le total des déchets de verre de l'UE en 2008 était de 4,1 millions de tonnes [49].

**II.3.3. Valorisation de déchet de verre**

Tout le traitement où l'utilisation des déchets qui permet de leur trouver un débouché ayant une valeur économique positive. Le terme général de valorisation englobe réemploi, recyclage et réutilisation. La figure II.10 ci-dessous représente un schéma représentatif la transformation de déchets de verre en poudre de verre :



**Figure II. 10 : Transformation de déchets de verre en poudre de verre**

L'intérêt qui est porté de plus en plus à la valorisation des déchets de verre est lié à la fois à la crise de l'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matières premières et enfin la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement. Les arguments peuvent être résumés en :

- Augmentation de la production.
- Le coût de stockage ou de traitement est de plus en plus élevé.
- Une législation de plus en plus sévère.
- Une meilleure gestion de la recherche.

Le taux de recyclage des déchets de verre est faible dans le monde entier et il est principalement concentré sur les containers et le secteur d'emballage [54].

Tableau II. 1 : *Quantité de déchets de verre et taux de recyclage dans différents pays.*

Pays	Déchets de verre (tonnes)	Taux de recyclage (%)	Année	Référence
Etats-Unis	11 500000	27	2010	[55]
Canada	116 000	68	2009	
Suède	195 000	93	2010	
Singapour	72 800	29	2010	[56]
Portugal	493 000	25	2001	[57]
Turquie	120 000	66	2004	[50]
Allemagne	3 200 000	94	2003	
UE	4100000	60	2008	[49]

La pratique de gestion des déchets des verres non recyclables est de les jeter dans les décharges. Le dépôt de ces déchets dans des sites d'enfouissement de nature non biodégradable n'offre pas une bonne solution environnementale.

Par conséquent, les déchets de verre représentent un défi pour les systèmes de gestion des déchets solides dans le monde entier en raison du faible taux de recyclage, d'un manque ou absence d'espaces dans les décharges [58].

L'industrie de la construction, en particulier l'industrie du ciment et du béton, peut fournir une solution très intéressante et utile pour l'impact environnemental des déchets de verre, en raison de la composition chimique et des propriétés physiques du verre semblables à celles du sable et du ciment, [51] comme reporté sur le Tableau II.2.

L'utilisation de déchets de verre dans la production de ciment et de béton conserve les ressources naturelles de la terre, économise de l'énergie et de l'argent et réduit les émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre.

#### **II.3.4. Les déchets de verre dans les matériaux de construction**

Différents déchets ont été utilisés dans la production du ciment et de béton tels que les laitiers de haut fourneau [59], l'argile [60], les déchets de tubes cathodiques [61], les cendres volantes et les déchets de verre [62].

Cependant, de grandes quantités de déchets solides qui peuvent être utilisées dans la fabrication du ciment et de béton sont encore jetées dans des décharges. Deux milliards de tonnes de déchets solides industriels, qui peuvent être utilisés dans la fabrication de ciment et de béton, Chine en 2010 [58].

Tableau II. 2 : Composition chimique du ciment et différents verre colorés.

Elément Chimique	Ciment (%)	Verre clair (%)	Verre gris (%)	Verre verts (%)	Verre concassé (%)	Poudre de verre (%)	Poudre de verre (%) ( $D_{MAX}<100\mu m$ )
SiO <sub>2</sub>	20,20	72,42	72,21	72,38	72,61	72,20	70,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	04,70	01,44	01,37	01,49	01,38	01,54	01,42
CaO	61,90	11,50	11,57	11,26	11,70	11,42	08,43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	03,00	00,07	00,26	00,29	00,48	00,48	00,10
MgO	02,60	00,32	00,46	00,54	00,56	00,79	04,01
Na <sub>2</sub> O	00,19	13,64	13,75	13,52	13,12	12,85	15,28
K <sub>2</sub> O	00,82	00,35	00,20	00,27	00,38	00,43	/
SO <sub>3</sub>	03,90	00,21	00,10	00,07	00,09	00,09	00,25
Perte au feu	01,90	/	/	/	00,22	00,36	00,22

La composition chimique des différentes couleurs et des déchets de verre broyé montre que le verre contient une grande quantité de silicium et de calcium et avec la structure amorphe [58]. Dans ce tableau, on a aussi saisi la composition chimique de poudre de verre dont  $D_{MAX}<100\mu m$  [63].

Plusieurs études ont été réalisées sur l'utilisation des déchets de verre dans les industries du ciment et du béton. Certaines de ces études utilisaient des déchets de verre comme agrégat [64] ; [65], D'autres l'utilisaient comme un remplacement de ciment [66] ; [67] et certaines études en utilisaient comme agrégat et remplacement de ciment dans le même mélange [68].

#### II.3.4.1. Valorisation de déchets de verre en remplacement partiel avec le ciment

Les propriétés pouzzolaniques du verre ont suscité l'idée d'utiliser des déchets de verre comme matériau de ciment ou comme un remplacement partiel de ciment dans la production de béton. Les propriétés pouzzolaniques du verre sont fortement affectées par la taille des particules du verre [66]. Cependant, dans toutes les études concernant les propriétés pouzzolaniques des déchets de verre, personne n'a réussi à identifier les produits de la réaction pouzzolanique ni à en proposer le mécanisme [69].

##### II.3.4.1.1. L'effet de la granulométrie des déchets de verre

Shao et al [66] ont étudié l'effet de la granulométrie des déchets de verre sur les propriétés du ciment et du béton en utilisant 30 % de déchets de verre comme remplacement partiel avec ciment dans le béton. Les lampes fluorescentes de déchets de verre (sodocalcique) ont été utilisées avec différentes tailles de particules, 150  $\mu m$ , 75  $\mu m$  et 38  $\mu m$ . Les déchets d'une taille de 150  $\mu m$  ne sont pas considérés comme un matériau pouzzolanique en raison de la granulométrie grossière, mais seuls les 38  $\mu m$  satisfont l'exigence d'être un matériau pouzzolanique.

Les résultats montrent que la résistance à la compression a augmenté à fur et à mesure de la diminution de la taille des particules des déchets de verre.

Après 90 jours de durcissement, la résistance à la compression du béton de verre de 38  $\mu m$  a été supérieure à celle du ciment Portland de 8 %.

Shao et al ont conclu que l'utilisation de 30 % de déchets de verre avec une granulométrie de 38 µm pourrait améliorer les propriétés du ciment Portland.

Khmiri et al ont étudié l'effet des granulométries des déchets de verre sur les propriétés pouzzolanique du verre et sur les propriétés du béton lors d'un remplacement partiel constant du ciment par 20 % de déchets de verre. Quatre granulométries différentes de verre sodocalcique ont été utilisées en remplacement partiel du ciment (moins de 100 µm, moins de 80 µm, moins de 40 µm et moins de 20 µm) [69] ; [70].

Les résultats expérimentaux ont montré que la résistance à la compression augmentait au fur et à mesure que la taille des particules des déchets de verre diminue.

La résistance à la compression du béton de 20 % du verre de 20 µm a été plus élevée que celle du béton témoin après 90 jours de durcissement.

Les résultats ont prouvé que les déchets de verre ont montré des propriétés pouzzolaniques lorsqu'ils sont à moins de 20 µm et le déchet de verre a amélioré les propriétés du béton lorsque 20 % du verre de 20 µm utilisé comme remplacement partiel au ciment. Ces résultats concordent avec ceux de Shi et al [54].

### ***II.3.4.1.2. Le taux de remplacement du ciment par la poudre de déchet de verre***

Différentes études ont été réalisées pour étudier le pourcentage optimal de déchets de verre qui peut être utilisé comme un remplacement partiel de ciment pour produire du béton.

Nassar et Soroushian, [71] ont examiné trois pourcentages (15, 20 et 23 %) de déchet de verre avec une granulométrie moyenne de 25 µm en remplacement partiel du ciment dans deux projets à l'Université d'Etat du Michigan.

Les résultats de résistance à la compression ont montré que le béton avec 15 et 20 % de remplacement de déchets de verre présentait une résistance à la compression supérieure à celle du béton témoin. Alors que le béton avec 23 % de verre de remplacement a montré la même résistance en compression du béton témoin.

Les résultats de résistance à la flexion ont montré le même comportement que celui de la résistance à la compression.

## ***II.4. Conclusion***

Ce chapitre est un aperçu général sur les déchets solides, tandis que le verre et leur impact sur l'environnement.

La prise en charge des déchets de verre, qui constitue une source intéressante, vue la croissance des déchets d'emballage en verre avec le développement du secteur industriel dans le domaine alimentaire et autres, justifié par l'augmentation de la consommation de la population, après l'usage, l'emballage devient un déchet abandonné dans la nature, provoquant ainsi la défiguration d'environnement et la longue durée de dégradation, ceci pose des difficultés de sa prise en charge par les autorités.

Le déchet de verre est une source qui peut intéresser le secteur des matériaux de construction, vu sa disponibilité, son cout, notamment ses propriétés à savoir :

- L'absorption d'eau dans le verre est négligeable voire nulle. C'est un avantage pour la formulation de coulis de ciment.
- Le verre (déchet) sous forme de poudre fine, et sa richesse riche en silice ( $\text{SiO}_2 = 70,50 \%$ ) par rapport au ciment ( $\text{SiO}_2 = 20,20 \%$ ), son utilisation comme substitution partielle avec le ciment est bénéfique pour sa réaction pouzzolanique, participant ainsi à la l'amélioration de la durabilité des matériaux cimentaires.

## **Chapitre III : Les Coulis de ciment**

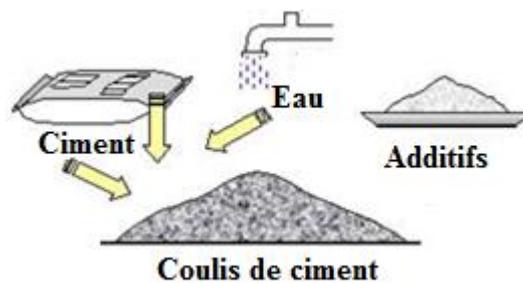
### **III.1. L'histoire**

L'histoire moderne de l'injection avec le coulis de ciment comme méthode de réparation ne débute néanmoins qu'au 19<sup>ème</sup> siècle avec la consolidation des murs en maçonnerie du port de Dieppe par l'ingénieur français Charles Bérigny. Les progrès réalisés depuis lors, tant au niveau des matériaux qu'à celui des équipements d'injection sous pression, ont permis un rapide développement de ces techniques.

Les coulis utilisés sont réalisés soit avec des liants hydrauliques ou pouzzolaniques, soit avec des polymères ; ces derniers étant apparus dans les techniques d'injection à partir des années 1950 [72].

### **III.2. Définition**

Un coulis de ciment est une suspension de ciment dans l'eau. C'est un système bi-phasique liquide-solide (tri-phasique si l'on tient compte de l'air occlus), de structure plus ou moins complexe en fonction de ses paramètres de composition. Les propriétés mécaniques et le comportement rhéologique de ces coulis de ciment peuvent être modifiés par l'ajout d'additifs (poudre de verre+ adjuvant dans notre expérience) [73].



**Figure III. 1 : Pâte et Coulis de ciment.**

### **III.3. Les propriétés physiques et mécaniques de coulis de ciment**

Dans notre travail, nous avons basé sur deux propriétés, physiques et mécaniques

#### **III.3.1. Les propriétés physiques**

##### **III.3.1.1. Le pouvoir de pénétration**

La première condition que doit satisfaire un coulis d'injection porte tout naturellement sur son aptitude à pénétrer dans le milieu à injecter. Deux paramètres prépondérants vont influencer la pénétrabilité d'un coulis :

- la granularité de sa phase solide.
- Les caractéristiques rhéologiques (fluidité).

Les caractéristiques d'injectabilité sont fortement conditionnées par les propriétés rhéologiques du coulis. La fluidité doit en particulier être telle que l'injection, peut être réalisée sous faible pression de telle sorte que l'on ne dégrade pas davantage la structure à réparer [73].

III.3.1.2. La stabilité

La stabilité traduit l'aptitude d'un coulis à garder son homogénéité pendant la durée de l'injection et jusqu'à la fin de la prise. Lorsque l'on remplit un récipient avec un coulis les grains de la phase solide, plus dense que l'eau ont tendance à sédimenter. En outre, cet effet de la pesanteur, les particules solides sont également soumises à des forces d'origines diverses. Notons en particulier les forces de frottement et les forces d'origine électrostatiques. Cet ensemble de sollicitations va entraîner le coulis vers l'un des trois états d'équilibre schématisés par la figure III.2.

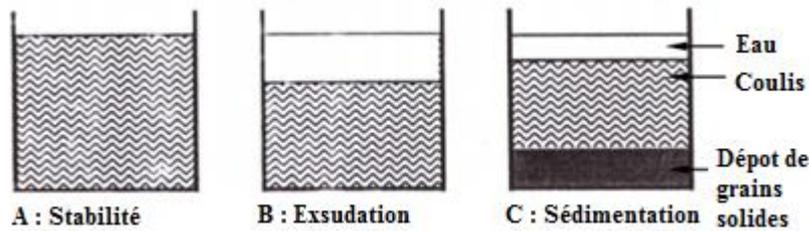


Figure III. 2 : Etats d'équilibre d'un coulis cimentaire.

Dans le cas de la figure (A), le coulis reste homogène. Nous dirons alors qu'il est parfaitement stable. Dans le cas (B), le contenu du récipient est composé de deux phases distinctes. La suspension, restée homogène, est ici surmontée d'une couche d'eau exsudée. Cette couche représente la quantité d'eau qui n'a pu être retenue par la suspension. Cette eau excédentaire ne peut avoir que des conséquences négatives sur le maintien de l'homogénéité du coulis en cours d'utilisation. Une formulation de coulis ne sera ainsi considérée comme stable que si la quantité d'eau exsudée reste inférieure à une valeur limite.

Dans le cas schématisé par la figure (C), la suspension n'est pas homogène. Nous pouvons constater ici dans le fond du récipient un dépôt constitué par les grains les plus lourds de la phase solide. Cette sédimentation, survenant le plus souvent de manière relativement rapide, n'est pas acceptable pour un coulis d'injection.

Un coulis est ainsi généralement dit stable s'il présente une exsudation faible et une absence de sédimentation.

III.3.2. Les propriétés mécaniques

L'objectif essentiel d'une injection de coulis est le plus souvent la restauration, voir l'amélioration de la capacité d'une structure à résister aux sollicitations qu'elle reçoit. L'aptitude du coulis à renforcer les caractéristiques mécaniques du milieu traité constitue ainsi un point particulièrement important. Elle sera conditionnée par les caractéristiques mécaniques intrinsèques du coulis et par ses propriétés d'adhérence au milieu injecté [73].

**III.4. Les types de coulis de ciment**

**III.4.1. Les types de coulis selon la composition**

Dans notre recherche, nous allons mentionner de types de coulis de ciment : le coulis de scellement et le coulis de comblement.

**III.4.1.1. Le coulis de scellement**

Cyna a défini le coulis de scellement : « Les coulis de scellement traditionnels, sont des mélanges de ciment et d'eau. Ils contiennent éventuellement des additions minérales et des adjuvants chimiques dans le but d'améliorer certaines de leurs propriétés rhéologiques. Ce coulis est réalisé le plus souvent à l'aide d'un turbo-malaxeur, ce qui permet d'assurer une défloculation efficace des grains de ciment. »

De par leur fort dosage en ciment, les coulis de scellement ont une forte résistance mécanique. Celle-ci n'est souvent pas nécessaire dans les injections et une diminution du dosage en ciment peut être envisagée (Figure III.3) [72].



**Figure III. 3 : Coulis de scellement.**

**III.4.1.2. Coulis de comblement (coulis d'injection)**

De manière générale, un coulis de comblement (ou coulis d'injection) contient de l'eau, avec une très faible quantité du ciment, dépendant des performances souhaitées, de la bentonite et/ou des charges. Il doit être suffisamment fluide pour s'écouler sous pression dans les fissurations du rocher, du sol jusque dans le volume de destination où il doit, après durcissement, avoir les propriétés souhaitées. (Figure III.4) [72].



**Figure III. 4 : Coulis de comblement.**

### III.4.2. Les types de coulis selon leur rhéologie

Selon la rhéologie ZIED SAADA, 2003 a décrit les coulis en deux types : les coulis newtoniens et les coulis binghamiens.

#### III.4.2.1. Les coulis newtoniens

Il s'agit des coulis qui ne contiennent aucune particule de dimension mesurable. La viscosité de ces coulis est indépendante de la vitesse d'écoulement.

En régime laminaire, l'écoulement de ces liquides est régi par la loi de Newton

$$\eta = \frac{\tau}{dV/dn}$$

- $dV/dn$  : le gradient de la vitesse.
- $\eta$  : la viscosité dynamique.
- $\tau$  : la contrainte de cisaillement.

Afin d'être injectés, les coulis chimiques (newtoniens) doivent avoir certaines caractéristiques :

- Viscosité initiale faible (viscosité lors de l'injection)
- Faible toxicité
- Bonne résistance au délavage [74].

#### III.4.2.2. Les coulis binghamiens

Il s'agit des coulis qui contiennent des particules de dimensions mesurables telles que les particules de ciment ou d'argile.

Ces coulis présentent une viscosité plastique donnée par la relation de Bingham :

$$\eta_{pl} = \frac{\tau - \tau_f}{dV/dn}$$

- $\eta_{pl}$  : la viscosité plastique.
- $\tau_f$  : le seuil de cisaillement.

Les coulis binghamiens peuvent être classés en trois catégories :

- **Les coulis instables** à base de ciment (il s'agit de suspensions de grains de ciment dans l'eau, ces coulis sont caractérisés par le rapport C/E qui varie entre 0,7 et 3.
- **Les coulis stables** à base d'argile ou bentonite ciment (c'est le coulis dont le ciment est mélangé avec le mélange bentonite-eau ou argile eau).
- **Les coulis spéciaux** (Il s'agit des gels de bentonite, des mortiers et des coulis expansés ou expansifs) [74].

### III.5. Les domaines d'utilisation

D'après Poupelloz, 1979, cité par : [72], ce procédé peut être utilisé dans diverses situations :

**III.5.1. Le comblement des cavités souterraines**

Dispose des moyens matériels et du savoir-faire nécessaires pour traiter tous types de chantier d'injection de coulis de ciment pour comblement de vide. A notre actif, réparation et traitement de fuite sur des berges, des maçonneries d'écluse, des couches de fondations autoroutières, des bétons étanches, des maisons.



**Figure III. 5 : Réparation des couches de fondation autoroutières.**



**Figure III. 6 : Comblement des lézards et des fissures des barrages et des bâtiments.**



**Figure III. 7 : Réparation de chaussés.**

**III.5.2. Le renforcement des sols**

Avec l'augmentation de la population et l'augmentation des infrastructures diverses, l'accessibilité de bons terrains diminue, ce qu'il oblige le recours à la construction sur les terrains possédants des caractéristiques géométriques médiocres. Pour construire sur les sols médiocres, des entrepreneurs spécialisés ont développé une nouvelle technique d'amélioration des sols en place, s'appelle l'injection. Elle permet :

- L'amélioration de la stabilité du terrain.
- L'amélioration de la qualité du terrain afin de faire des travaux miniers.
- La consolidation des sols situés sous les fondations.
- Stockages souterrains... etc.
- Consolidation des sols instables.

On distingue généralement trois types d'injection :

- **L'injection par fracturation** : elle consiste à remplir des vides et des fissures naturelles ou créées par la pression d'injection. Elle s'accompagne donc d'une modification de la structure du terrain.
- **L'injection par imprégnation** : le traitement s'effectue sans altération de la structure du sol par circulation du coulis dans les espaces interstitiels.
- **L'injection de compactage** : le coulis remplit une cavité artificielle qui se développe et entraîne un compactage du terrain. On ne peut pas parler de sol injecté dans ce cas [75].



**Figure III. 8 : Renforcement des sols par inclusion rigide.**

### III.5.3. La cimentation des puits de forage géométriques

Selon Elodie Nauleau, 2013, cité par : [22]. La cimentation est une étape essentielle de la construction des puits géothermiques et elle sert à :

- Protéger (contre la corrosion) et soutenir le tubage (éviter tout déplacement durant la phase de réalisation de forage).
- Assurer la tenue mécanique du tubage.
- Empêcher les échanges de fluide à travers l'espace annulaire et avec l'extérieur du tubage.
- Stopper le mouvement du fluide dans les formations régulières ou fracturées.
- Boucher une partie abandonnée du puits.

#### III.5.3.1. Méthodes de cimentation

La figure suivante [81] résume les différentes méthodes de cimentation d'un puits de forage géométrique :

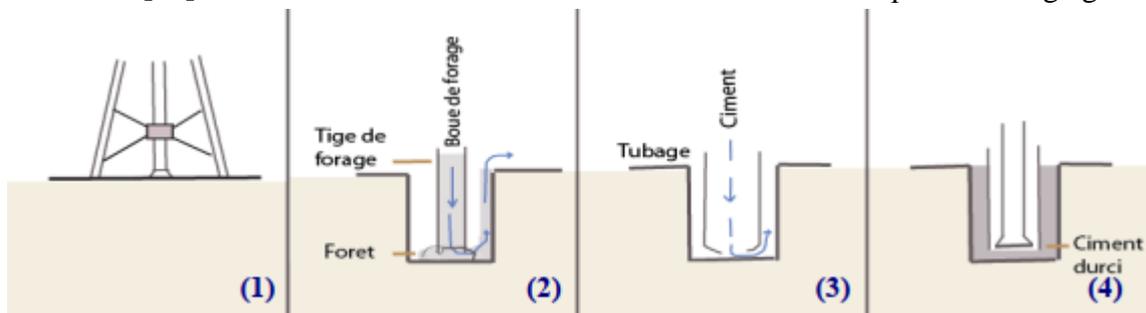


Figure III. 9 : Synthèse simplifiée de la réalisation d'un puits de forage géothermique

Avec :

- (1) : La distribution de l'espace dont on réalise le projet.
- (2) : Un ensemble de tige transporte sous pression les boues de forage (mélange d'eau et de bentonite) emportant les débris vers la surface grâce au courant ascensionnel.
- (3) : Des tubages en acier dont le diamètre décroît avec la profondeur sont ensuite descendus dans le trou de forage. Et puis, la cimentation primaire : consiste à remplacer la boue de forage par un ciment gâché avec de l'eau (coulis de ciment) avec un rapport eau/ciment défini.
- (4) : Une fois le coulis mis dans le foret se durcit, sert à empêcher les fluides de percoler d'une formation géologique à une autre.

### III.6. Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons présenté les différents coulis de ciment, ainsi leurs propriétés importantes. Ces coulis doivent être facilement mis en œuvre (fluides), stables, résistants et durables.

## **Chapitre IV : La partie pratique**

### IV.1. Introduction

Dans cette partie, une étude expérimentale est effectuée sur trois variantes élaborées en fonction du pourcentage de substitutions des quantités de ciment par la poudre de verre à des taux de (10 %, 20 % et 30 %), qui seront comparées avec la variante témoin sans substitutions de ciment (0 % de poudre de verre), il est important de mentionner que la poudre de verre est issue de la récupération des déchets de verre, qu'ont subi un broyage à une finesse inférieure à 100 µm, sans tenir compte de la forme géométrique de cette dernière.

Nous allons exposer dans cette partie, les matériaux utilisés et leurs caractérisations, aussi l'ensemble des variantes étudiées (formulation et quantités), ainsi que les méthodes d'essais physicomécaniques, dont on a déduit les indices d'activité pouzzolanique, puis présentation des résultats obtenus suivi de leurs interprétations.

### IV.2. Matériaux utilisés

#### IV.2.1. Le ciment (CPJ)

Le ciment utilisé est un ciment portland composé (CEM II/A-M (P-L) 42.5N). Provenant de la cimenterie de Sour el Ghozlane. Les caractéristiques techniques sont données par la fiche technique de contrôle de qualité du ciment récupérée du laboratoire de contrôle de qualité de l'entreprise (Voir l'annexe).

**Tableau IV. 1 : Composition chimique du ciment utilisé.**

Composés (%)										
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	CaO	PAF à 1000 C°
20,06	03,99	03,04	61,57	01,62	0,54	0,26	0,06	< 0,001	01,56	07,16

#### IV.2.2. Eau

L'eau utilisée c'est l'eau usée, celle du robinet de laboratoire de génie civil du pôle universitaire AMOB. L'eau est un paramètre essentiel pour l'hydratation du ciment. Dès que l'eau rentre en contact avec le ciment anhydre, réagit pour se combiner et former les hydrates de ciments.

- E/C donne la quantité d'eau utilisée par rapport à la quantité de ciment, sans tenir compte le dosage de la poudre de verre de variantes étudiées ; (0, 10, 20 et 30) %

#### IV.2.3. Les adjuvants

Le groupe « SIKA-Algérie » nous a fourni un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent pour béton prêts à l'emploi de nouvelle génération [76], (Figure IV.1). Cet adjuvant est fait pour assurer la fluidité du mélange, (Voir l'annexe), le pourcentage du superplastifiant est choisi selon les essais préliminaires sur les coulis ayants donner une meilleure fluidité, on a retenu le pourcentage de 0,2 % par rapport au dosage du ciment, il est important de signaler que l'adjuvant est rajouté après dilution dans l'eau, afin d'assurer une bonne dissolution et une meilleure homogénéisation.



Figure IV. 1 : Sika Viscocrette.

#### IV.2.4. Poudre de verre ( $D_{MAX} < 100 \mu m$ )

Cette poudre est issue de la récupération de bouteilles de boissons alcooliques ramassées, vu leur disponibilité et gêne dans la nature (Figure II.9). Ces bouteils sont nettoyées afin d'éliminer les étiquettes en papier, séchées, concassées et finement broyées, (voir la figure II.10). La poudre de verre obtenue est passée sur le tamis dont  $D_{max} < 100 \mu m$  [77].

Selon, Arab B et all, 2007, La composition chimique de la poudre de verre dont  $D_{max} < 100 \mu m$  est présentée dans le tableau II.2 [63].

Le dosage en PV (00 %, 10 %, 20 % et 30 % par rapport au dosage du ciment).

### IV.3. La composition de coulis de ciment

#### IV.3.1. L'essai préliminaire

Essai préliminaire consiste à fixer le rapport E/C en variant le dosage de Ciment dans deux cas. Dans cette partie, nous avons réalisé quatre essais pour le but de déterminer la composition de coulis de ciment.

##### IV.3.1.1. Éclaircissement sur le calcul

- Adjuvant = 0,2 % du poids de ciment
- Volume d'une seule éprouvette :  $(4 \times 4 \times 16) = 256 \text{ cm}^3 = 0,000256 \text{ m}^3$  (Forme prismatique).
- Volume d'un moule :  $4 \times (4 \times 4 \times 16) = 1024 \text{ cm}^3 = 0,001024 \text{ m}^3$

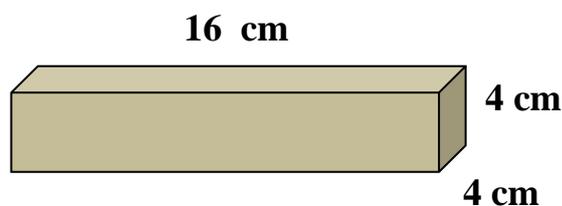


Figure IV. 2 : L'éprouvette ( $4 \times 4 \times 16$ )  $\text{cm}^3$ .

Tableau IV. 2 : Volume d'une éprouvette mise à l'essai.

	Volume d'une éprouvette (cm <sup>3</sup> )	Volume d'une éprouvette (m <sup>3</sup> )	Volume d'un moule (m <sup>3</sup> )
4x4x16	256	0,000256	0,001024

### IV.3.1.2. Mode opératoire

#### IV. 3.1.2.1. Préparation, confection et conservation des variantes d'études

Préparation des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm<sup>3</sup> dans un malaxeur automatique [80]. (Voir la figure IV.3).



Figure IV. 3 : Malaxeur de coulis de ciment.

Le mode opératoire a été réalisé au moyen d'un malaxeur automatique, axe verticale, à trois vitesses et de capacité de cinq (5) litres.

La confection du ciment, poudre de verre et le superplastifiant est comme suite :

- Mettre le malaxeur en marche sur la première vitesse.
- Verser la quantité d'eau (80 % de quantité d'eau).
- Verser le ciment + poudre de verre.
- Malaxer une minute et verser la quantité d'adjuvant +20 % quantité d'eau qui reste dans les 30 dernières secondes.
- Arrêter le malaxage et racler les cotés
- Mettre le malaxeur en deuxième vitesse et malaxer pendant 2 minutes
- Arrêter le malaxage et racler les cotés
- Reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 2 minutes
- Arrêter et terminer le malaxage
- Verser le coulis de ciment dans des moules prismatiques (4x4x16) cm<sup>3</sup>, (Voir figure VI.4).
- Utiliser la table vibrante (table des chocs) pendant 10 seconds, (voir Figure VI.5).

- A la fin d'essai, les moules sont conservés dans les conditions du laboratoire ( $T=30\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) et une humidité relative (HR) de  $(65\pm 5 \%)$  durant 48h, on effectue après l'opération de démoulage de 36 éprouvettes, 09 éprouvettes pour chaque variante (voir Figure VI.4).



**Figure IV. 4 : Opération de moulage et de démoulage des éprouvettes.**



**Figure IV. 5 : Table de choc.**

- Les éprouvettes seront numérotées par rapport aux jours des essais physico-mécaniques prévus (7, 14 et 28 jours après le démoulage différentes variantes, voir la figure IV.6).



**Figure IV. 6 : Numérotation des éprouvettes après l'opération de démoulage.**

IV. 3.1.2.2. Résultats d'essai préliminaire

Tableau IV. 3 : Essai préliminaire.

E/C	Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Quantité en (Kg) pour un 1 m <sup>3</sup>		Quantité en (g) pour une éprouvette de (4×4×16) cm <sup>3</sup>	
0,35	400	Ciment	400	Ciment	102,40
		Eau	140	Eau	35,84
		Adjuvant	0,80	Adjuvant	0,20
	450	Ciment	450	Ciment	115,20
		Eau	157,50	Eau	40,32
		Adjuvant	0,90	Adjuvant	0,23
0,4	400	Ciment	400	Ciment	102,40
		Eau	160	Eau	40,96
		Adjuvant	0,80	Adjuvant	0,20
	450	Ciment	450	Ciment	115,20
		Eau	180,20	Eau	46,08
		Adjuvant	0,90	Adjuvant	0,23

IV.3.1.2.2.1. Remarques

- Selon l'étalement à mini cône (voir la partie IV. 4) On a noté que :
  - E/C=0.35 avec dosage de ciment = 400 Kg/m<sup>3</sup> → Mélange ferme (Dmax = 15 cm)
  - E/C=0.35 avec dosage de ciment = 450 Kg/m<sup>3</sup> → Coulis de ciment (Dmax = 20 cm)
  - E/C=0.4 avec dosage de ciment = 400 Kg/m<sup>3</sup> → Mélange fluide (Dmax = 25 cm)
  - E/C=0.4 avec dosage de ciment = 450 Kg/m<sup>3</sup> → Mélange très fluide (Dmax = 36 cm)

IV.3.1.2.2.2. Interprétation des résultats

- La variation d'étalement au mini-cône des coulis cimentaires en fonction du dosage en superplastifiant est de 20 cm pour E/C = 0,35 avec un dosage de superplastifiant égale à 0,2 %. Cela est mentionné par : Quoc Gia Hoang, 2015, cité par : [78].
- Selon sa composition (ciment + eau + adjuvant+ additifs), le coulis à réaliser c'est le coulis de scellement, cela est mentionné par Cyna, cité par : [72].
- Selon la rhéologie, le coulis à réaliser c'est de type binghamiens, tandis que :  $0,7 < C/E < 3$ , cela est mentionné par ZIED SAADA, 2003, cité par : [74].

IV.3.1.3. Les conditions primaires

- $\frac{E}{C} = 0,35$ .
- Ciment : 450 Kg/m<sup>3</sup>.

- Eau :  $157,5 \text{ Kg/m}^3$ .
- Adjuvant :  $0,2 \%$  de poids de ciment =  $0,9 \text{ Kg/m}^3$

**IV.3.2. Les quantités des constituants de coulis de ciment pour une moule ( $4 \times 4 \times 16$ )  $\text{cm}^3$**

**IV.3.2.1. Pour la variante (Témoin)**

- Ciment :  $450 \text{ Kg/m}^3 \longrightarrow 1 \text{ m}^3$
- C  $\longrightarrow 0,001024 \text{ m}^3$
- C =  $460,8 \text{ gr}$
- Eau :  $E/C=0,35$  donc :  $E = 0,35 \times C = 0,35 \times 460,8 = 161,28 \text{ gr}$
- Adjuvants :  $460,8 \times 0,2 \% = 0,92 \text{ gr}$

**IV.3.2.2. Pour coulis de ciment avec poudre de verre**

**IV.3.2.2.1. Pour la variante (10 % PV)**

- Poudre de verre :  $X_1 = 460,8 \times 10 \% = 46,08 \text{ gr}$
- Ciment =  $460,8 - 46,08 = 414,72 \text{ gr}$
- Eau :  $145,15 \text{ gr}$
- Adjuvant :  $414,72 \times 0,2 \% = 0,83 \text{ gr}$

**IV.3.2.2.2. Pour la variante (20 % PV)**

- Poudre de verre :  $X_2 = 460,8 \times 20 \% = 92,16 \text{ gr}$
- Ciment :  $368,64 \text{ gr}$
- Eau :  $129,03 \text{ gr}$
- Adjuvant :  $0,74 \text{ gr}$

**IV.3.2.2.3. Pour la variante (30 % PV)**

- Verre :  $X_3 = 460,8 \times 30 \% = 138,24 \text{ gr}$
- Ciment :  $322,56 \text{ gr}$
- Eau :  $112,90 \text{ gr}$
- Adjuvant :  $0,64 \text{ gr}$

**IV.3.3. La quantité globale des constituants**

Tableau IV. 4 : Compositions massiques des variantes étudiées.

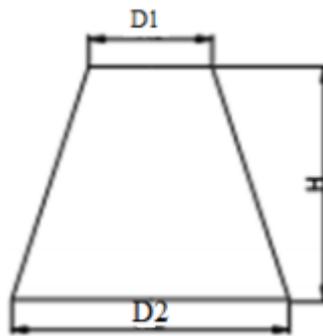
Les variantes	Constituant	Les quantités en (gr)				
		Pour 1 éprouvette	Pour 1 moule	Pour 1 batterie	Pour 2 batteries	Pour 3 batteries
Témoin	Ciment	115,2	460,8	1382,4	2764,8	4147,2
	Eau	40,32	161,28	483,84	967,68	1451,52
	Adjuvant	0,23	0,92	2,76	5,53	8,28
	PV	/	/	/	/	/
10 % PV	Ciment	103,68	414,72	1244,16	2488,32	3732,48
	Eau	36,29	145,15	435,45	870,91	1306,37
	Adjuvant	0,21	0,83	2,49	4,98	7,46
	PV	11,52	46,08	138,24	276,48	414,72
20 % PV	Ciment	92,16	368,64	1105,92	2211,84	3317,76
	Eau	32,26	129,03	387,10	774,2	1161,3
	Adjuvant	0,18	0,74	2,22	4,42	49,76
	PV	23,04	92,16	276,48	552,96	829,44
30 % PV	Ciment	80,64	322,56	967,68	1935,36	2903,04
	Eau	28,23	112,90	338,70	677,4	1016,1
	Adjuvant	0,16	0,64	1,92	3,87	43,54
	PV	34,56	138,24	414,72	829,44	1244,16

#### IV.4. Essais physiques

##### IV.4.1. Essai d'étalement au mini cône

###### IV.4.1.1. Méthode d'essai

C'est un essai de caractérisation empirique courant, qui s'appuie sur le principe du cône d'Abrams. L'essai consiste à mesurer le diamètre d'étalement de différentes variantes étudiées (Témoin, 10 %, 20 % et 30 % de PV) sur une plaque horizontale en verre préalablement humidifiée. Le mini cône (Figure IV. 7) est placé au centre de la plaque et rempli de coulis cimentaire, ensuite, soulevé et le coulis s'écoule sur la table (figure IV. 8), on mesure après le diamètre de la galette d'étalement dans deux directions perpendiculaires et on détermine la valeur moyenne. Les résultats d'essai sont montrés dans le tableau IV.5 et la figure IV. 9 ci-dessous :



**D1** : 40mm, **D2** : 90 mm, **H** : 75mm

**Figure IV. 7 : Schéma de mini cône.**



**Figure IV. 8 : L'étalement de la variante 10 % PV dans la plaquette en verre.**

**IV.4.1.2. Résultats**

**Tableau IV. 5 : Les résultats d'essai d'étalement de différentes variantes étudiées.**

N°	Variantes	Diamètre	Valeur d'étalement (cm)	La moyenne d'étalement (cm)
01	Témoin	Horizontal	22	20,5
		Vertical	19	
02	10 % PV	Horizontal	18	17,5
		Vertical	17	
03	20 % PV	Horizontal	15	14,5
		Vertical	14	
04	30 % PV	Horizontal	10	9,5
		Vertical	09	

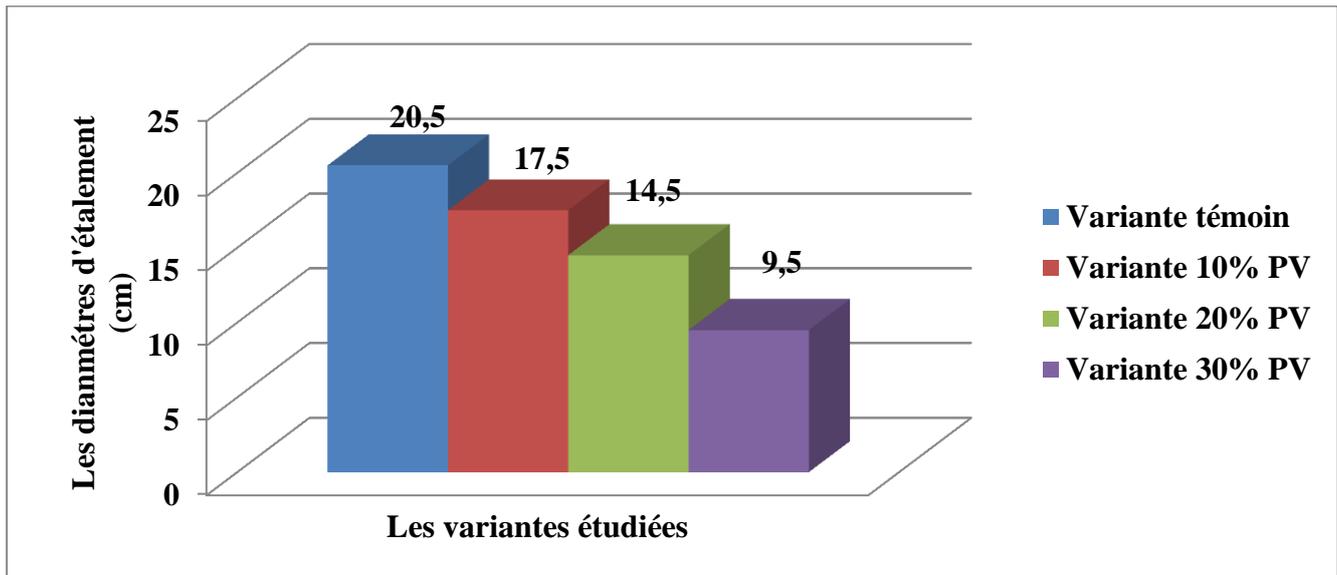


Figure IV. 9 : Diamètre moyen d'étalement de différentes variantes étudiées.

#### IV.4.1.2.1. Remarques

- On a noté une diminution de diamètre d'étalement en fonction de l'augmentation du taux de substitution de poudre de verre avec le ciment, respectivement (0 %, 10 %, 20 %, 30 %).

#### IV.4.1.2.2. Interprétation des résultats

- La diminution du diamètre d'étalement des variantes (10 % PV, 20 % PV, 30 % PV) par rapport à la variante témoin et par rapport à l'augmentation du taux de substitution de poudre de verre avec le ciment, respectivement (0 %, 10 %, 20%, 30 %) est expliquée par l'absorption d'eau par la poudre de verre qui est négligeable. Cela est mentionné par Mamery Serifou, 2013. Cité par Castro [44].
- La diminution du diamètre d'étalement des variantes (10 % PV, 20 % PV, 30 % PV) par rapport à la variante témoin est due à la fixation du rapport E/C des différentes variantes.
- L'augmentation du rapport E/C et le taux d'ajout de superplastifiant peut corriger le problème.

#### IV.4.2. Essai de la masse volumique

L'essai consiste de déterminer la masse volumique apparente des poudres (de verre et de ciment) d'un côté, les masses volumiques apparentes à l'état durci des éprouvettes par rapport à leur volume (4×4×16) cm<sup>3</sup>, par rapport aux âges (7, 14 et 28 jours). La relation suivante définit l'équation générale de la masse volumique.

$$Mv = \frac{M}{V}. \text{ Avec } Mv : (\text{Kg/m}^3)$$

#### IV.4.2.1. La masse volumique apparente des poudres

L'essai de la masse volumique apparente des poudres est selon [79]. C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

IV.4.2.1.1. Principe d'essai

Savoir la différence de la masse volumique de ciment et de poudre de verre utilisés en tenant compte le volume des vides qui se trouvent dans les deux poudres étudiées.

IV.4.2.1.2. Mode opératoire de l'essai

- Prendre l'échantillon dans les deux mains.
- Verser l'échantillon toujours au centre du récipient, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône, raser à la règle et Peser le contenu.
- Calculer la masse volumique apparente à partir de la formule suivante :

$$M_{V\text{ app}} = (M_T - M_0)/V$$

Avec :

- $M_0$ : La masse du récipient de mesure vide.
- $M_T$ : La masse du récipient avec la poudre.
- $V$  : le volume du récipient de mesure.



Figure IV. 10 : Essai de la masse volumique apparente des poudres.  
(Laboratoire matériaux de construction)

IV.4.2.1.3. Les résultats d'essai

Les résultats sont résumés dans le tableau IV. 6 comme suite :

Tableau IV. 6 : La masse volumique apparente des poudres.

Les poudres étudiées	$M_{\text{app poudres}} \times 10^{-3}$ (kg)	Volume de récipient $\times 10^{-6}$ (m <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )
Poudre de verre	105	50	2100
Ciment portland	152	50	3040

IV.4.2.2. Les masses volumiques apparentes des éprouvettes à 7, 14 et 28 jours (l'état durci).

L'essai consiste à mesurer les masses volumiques apparentes de différentes variantes étudiées des éprouvettes réalisées selon leur numérotation, obtenues à 7, 14 et à 28 jours. Dont on mesure le poids de

chaque éprouvette par rapport à son volume (Volume d'éprouvette =  $265 \times 10^{-6} \text{m}^3$ ). Les résultats sont résumés dans le tableau IV. 7 et la figure IV.11 ci-dessous :

IV.4.2.2.1. Résultats obtenus

Tableau IV. 7 : Les masses Volumiques apparentes des différentes variantes à 7, 14 et 28 jours.

Variantes	Pour 7 jours			Pour 14 jours			Pour 28 jours					
	N°	La masse $\times 10^{-3}$ (Kg)	Mv ( $\text{kg/m}^3$ )	N°	La masse $\times 10^{-3}$ (Kg)	Mv ( $\text{kg/m}^3$ )	N°	La masse $\times 10^{-3}$ (Kg)	Mv ( $\text{kg/m}^3$ )	Mv moy ( $\text{kg/m}^3$ )		
Témoïn	1	520	2031,25	1'	523	2042,97	1''	528	2062,50	2076,82		
	2	521	2035,16		2'	528		2062,50	2''		538	2101,56
	3	519	2027,34		3'	527		2058,59	3''		529	2066,41
10 % PV	4	517	2019,53	4'	520	2031,25	4''	524	2046,88	2061,20		
	5	518	2023,44		5'	520		2031,25	5''		527	2058,59
	6	519	2027,34		6'	521		2035,16	6''		532	2078,13
20 % PV	7	516	2015,63	7'	519	2027,34	7''	523	2042,97	2045,57		
	8	517	2019,53		8'	519		2027,34	8''		523	2042,97
	9	516	2015,63		9'	520		2031,25	9''		525	2050,78
30 % PV	10	515	2011,72	10'	520	2031,25	10''	521	2035,16	2037,76		
	11	512	2000,00		11'	518		2023,43	11''		522	2039,06
	12	514	2007,81		12'	519		2027,34	12''		522	2039,06

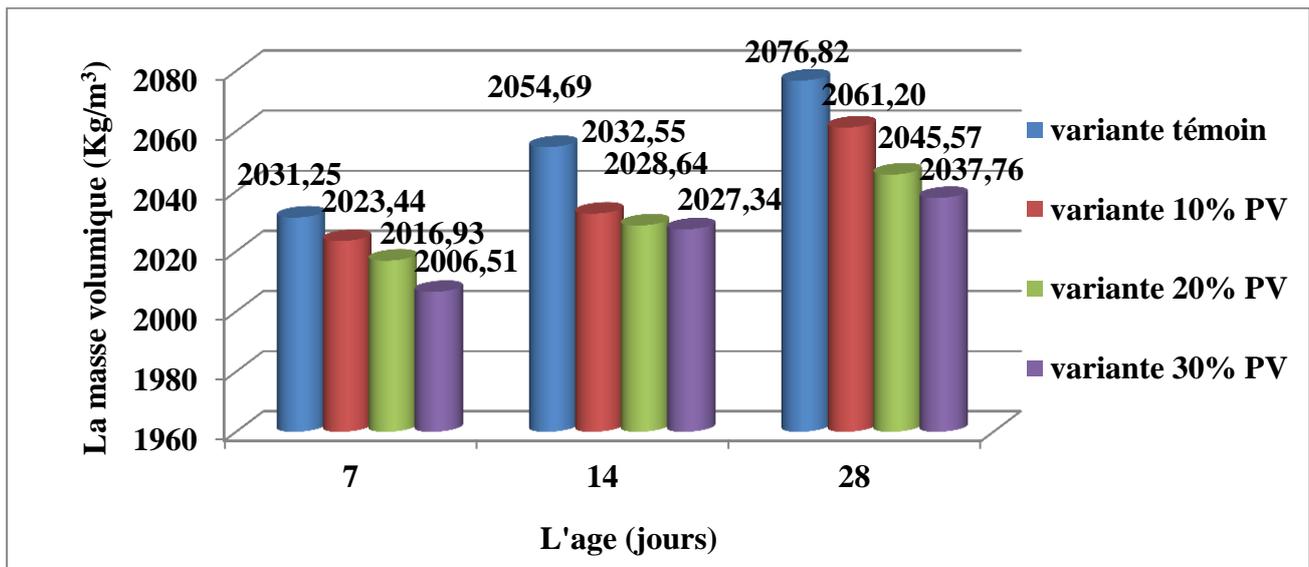


Figure IV. 11 : Les masses volumiques apparentes des variantes étudiées à 7, 14 et 28 jours.

**IV.4.2.2.2. Remarques**

- a) Les résultats obtenus dans la figure IV.11 montrent une diminution des masses volumiques des variantes (10%, 20 % et 30 %) par rapport à la variante témoin.
- b) Les résultats de la figure IV.11 montrent une augmentation des masses volumiques dans les mêmes variantes en fonction de l'âge.

**IV.4.2.2.3. Interprétation des résultats**

- a) La diminution de la masse volumique est notée dans les variantes ; 10 %, 20 % et 30 % de poudre de verre par rapport à la variante témoin est due la masse volumique de la poudre de verre, qu'a apporté une certaine légèreté aux variantes étudiées (Tableau IV.6).
- b) L'augmentation des masses volumiques dans les mêmes variantes étudiées en fonction des âges (7, 14 et 28 jours) est due à l'avancement de l'hydratation du ciment et à la production des S-C-H dans les mélanges qui représente environ 50 à 70 % de la structure cimentaire. Cela est mentionné par : Baroghel- Bouny, 1994. Cité par [13].

**IV.5. L'essai mécanique**

L'essai de résistance à la traction par flexion (trois points) et de la résistance en compression [80].

**IV.5.1. Résistance à la traction par flexion**

Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci. Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter de 50 N/s ± 10 N/s, jusqu'à rupture.

Conserver les demi-prismes humides jusqu'au moment des essais en compression. La résistance en flexion  $R_f$  (en N/mm<sup>2</sup>) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = \frac{1,5 Pl}{b^3}$$

D'où :

- $R_f$  : la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.
- $B$  : le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.
- $F_f$  : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.
- $I$  : est la distance entre les appuis, en millimètres.

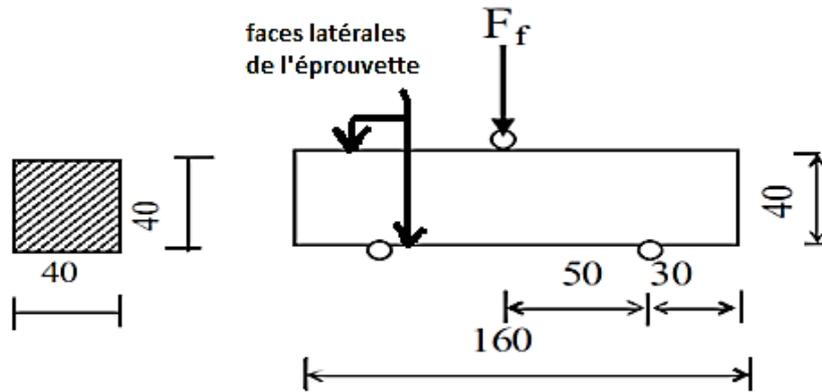


Figure IV. 12 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

**IV.5.2. Résistance en compression**

Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à  $\pm 0.5$  mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm

Augmenter la charge avec une vitesse providence durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture).

La résistance en compression  $R_c$  (en  $N/mm^2$ ) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

D'où :

$R_c$ : Résistance en compression (MPa).

$F_c$ : Charge de rupture (N).

$b^2$ : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

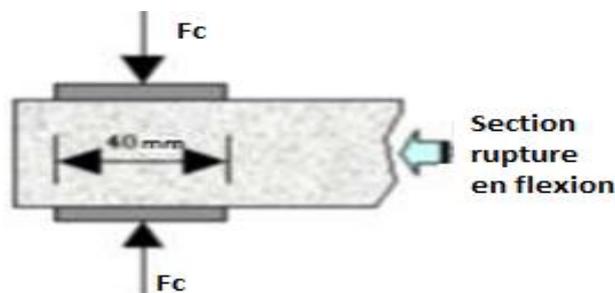


Figure IV. 13 : Dispositif pour l'essai de résistance en compression.

**IV.5.3. Résultats d'essai**

**IV.5.3.1. L'écrasement à 7 jours**

Les résultats de l'essai de résistance à la flexion et en compression de différentes variantes étudiées à 7 jours sont résumés dans le tableau IV. 8 montré ci-dessous :

Tableau IV. 8 : Tableau récapitulatif des résultats des différentes variantes étudiées à 7 jours.

Variantes	Quantité de ciment $\times 10^{-3}$ (kg)	Quantité d'eau $\times 10^{-3}$ (kg)	Quantité de poudre de verre $\times 10^{-3}$ (kg)	N°	La masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Rf (MPa)	Rf moyenne (MPa)	Rc (MPa)	Rc moy (MPa)
Témoin	115,20	40,32	00	1	2031,25	4,30	4,17	36,20	36,13
				2	2035,16	4,30		36,40	
				3	2027,34	3,90		35,80	
10 % PV	103,68	36,29	11,52	4	2019,53	3,20	3,33	34,50	35,27
				5	2023,44	3,30		34,60	
				6	2027,34	3,50		36,70	
20 % PV	92,16	32,26	23,04	7	2015,63	3,20	3,10	35,10	34,87
				8	2019,53	3,30		34,90	
				9	2015,63	2,80		34,60	
30 % PV	80,64	28,23	34,56	10	2011,72	2,70	2,43	34,90	33,60
				11	2000,00	2,10		32,70	
				12	2007,81	2,50		33,20	

**IV.5.3.2. L'écrasement à 14 jours**

Les résultats d'essai de résistance à la flexion et en compression de différentes variantes étudiées à 14 jours sont résumés dans le tableau. IV. 9 montré ci-dessous :

Tableau IV. 9 : Tableau récapitulatif des résultats des différentes variantes étudiées à 14 jours.

Variantes	Quantité de ciment $\times 10^{-3}$ (kg)	Quantité d'eau $\times 10^{-3}$ (kg)	Quantité de poudre de verre $\times 10^{-3}$ (kg)	N°	La masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Rf (MPa)	Rf moyenne (MPa)	Rc (MPa)	Rc moy (MPa)
Témoin	115,20	40,32	0	1'	2042,97	4,40	4,50	37,40	38,63
				2'	2062,50	4,60		39,60	
				3'	2058,59	4,50		38,90	
10 % PV	103,68	36,29	11,52	4'	2031,25	3,80	3,77	36,40	36,80
				5'	2031,25	3,60		36,10	
				6'	2035,16	3,90		37,90	
20 % PV	92,16	32,26	23,04	7'	2027,34	3,60	3,57	35,20	35,20
				8'	2027,34	3,50		34,90	
				9'	2031,25	3,60		35,50	
30 % PV	80,64	28,23	34,56	10'	2031,25	3,40	3,27	35,30	35,10
				11'	2023,43	3,20		34,90	
				12'	2027,34	3,20		35,10	

**IV.5.3.3. L'écrasement à 28 jours**

Les résultats d'essai de résistance à la flexion et en compression de différentes variantes étudiées à 28 jours sont résumés dans le tableau. IV. 10 montré ci-dessous :

Tableau IV. 10 : Tableau récapitulatif des résultats des différentes variantes étudiées à 28 jours.

Variantes	Quantité de ciment $\times 10^{-3}$ (kg)	Quantité d'eau $\times 10^{-3}$ (kg)	Quantité de poudre de verre $\times 10^{-3}$ (kg)	N°	La masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Rf (MPa)	Rf moyenne (MPa)	Rc (MPa)	Rc moy (MPa)
Témoin	115,20	40,32	0	1''	2062,50	4,90	4,97	41	42,20
				2''	2101,56	5,10		44,3	
				3''	2066,41	4,90		41,3	
10 % PV	103,68	36,29	11,52	4''	2046,88	4,30	4,40	38,3	39,17
				5''	2058,59	4,30		38,7	
				6''	2078,13	4,60		40,5	
20 % PV	92,16	32,26	23,04	7''	2042,97	4,10	4,07	38,1	38,40
				8''	2042,97	3,90		38,2	
				9''	2050,78	4,20		38,9	
30 % PV	80,64	28,23	34,56	10''	2035,16	3,70	3,77	37,2	37,87
				11''	2039,06	3,90		38,1	
				12''	2039,06	3,70		38,3	

IV.5.3.4. Résultats d'essai par rapport aux âges (7, 14 et 28 jours)

Les moyennes de résistance à la flexion et à la compression par rapport à 7, 14 et 28 jours, les résultats sont résumés dans les figures IV.14 et IV.15 montrés ci-dessous :

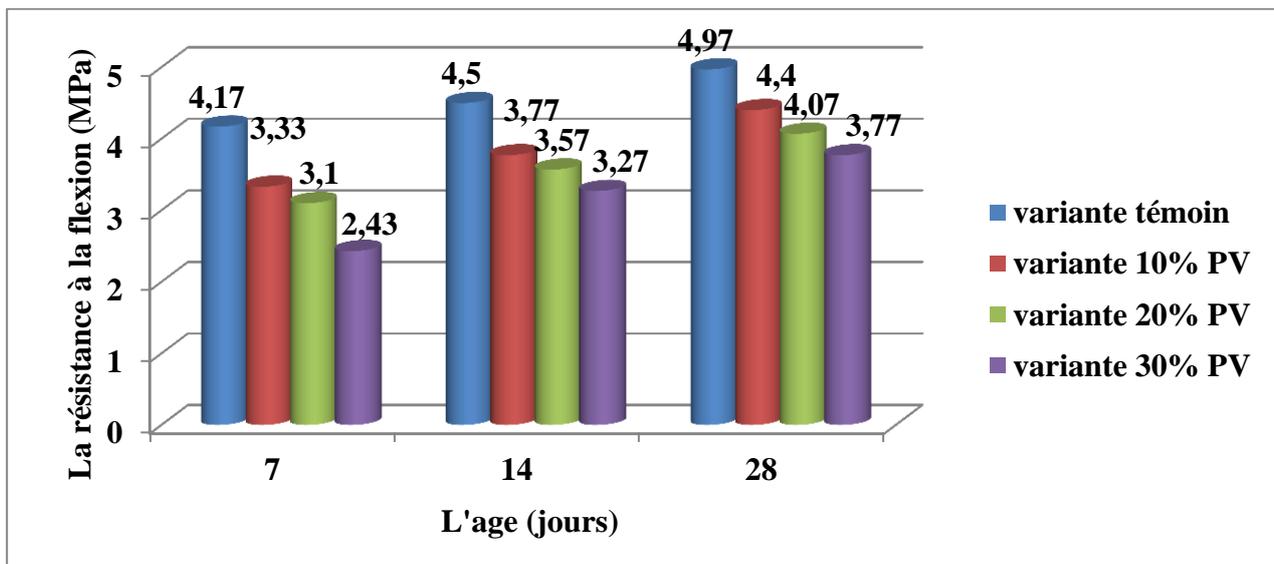


Figure IV. 14 : Moyenne de résistance en flexion des variantes étudiées à 7, 14 et 28 jours.

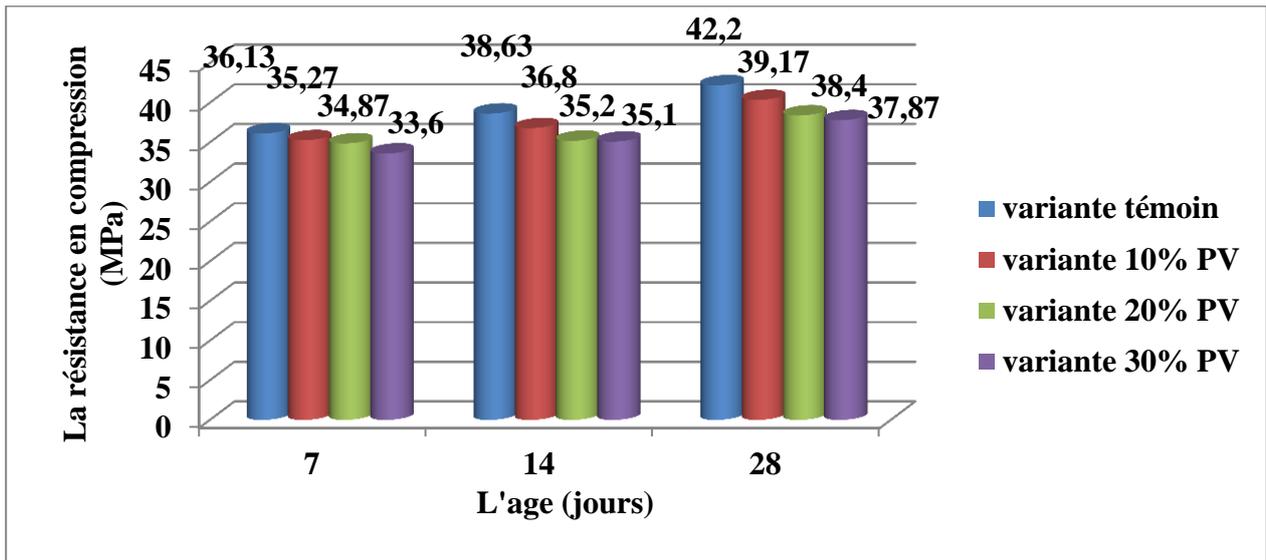


Figure IV. 15 : Moyenne de résistance en compression variantes étudiées à 7, 14 et 28 jours.

#### IV.5.3.4.1. Remarques

- Les résultats obtenus dans les figures IV.14 et IV.15 montrent une diminution des résistances en flexion et en compression des différentes variantes étudiées (10 %,20 % et 30 %) comparant aux âges (7, 14 et 28 jours), par rapport à la variante témoin.
- Les résultats obtenus dans les figures IV.14 et IV.15 montrent aussi une augmentation de résistances en flexion et en compression au cours du temps, respectivement (7, 14 et 28) jours pour chaque variante étudiée.

#### IV.5.3.4.2. Interprétation des résultats

- La chute des résistances mécaniques en flexion et en compression en fonction de l'augmentation du taux de substitution de ciment par la poudre de verre est expliquée essentiellement par le remplacement de ciment par la poudre de verre dans les variantes étudiées. Autrement dit, la réduction de la partie responsable de la production des C-S-H et  $\text{Ca(OH)}_2$  qui donne respectivement la résistance en compression et en traction de mélanges, tandis qu'une pâte de ciment hydratée contient 50 à 70 % de C-S-H et 25 à 27 % de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Cela est mentionné par : DAMIDOT, D et GLASSER, F.P, 1995. Cité par : [25].
- La baisse de résistance mécanique en fonction de l'augmentation du taux de remplacement de ciment par la poudre de verre est mentionnée dans les travaux réalisés sur les mortiers (figure II.7). Cité par : [48].
- L'effet de la granulométrie de poudre de verre sur la résistance mécanique des variantes étudiées est cité par : [66] ; [69] ; [70], dont la résistance mécanique s'accroît à la diminution du diamètre des grains de la poudre de verre.
- L'augmentation de résistance en flexion et en compression dans la même variante en fonction de l'âge est due à l'hydratation de ciment après le durcissement, en mettant les éprouvettes de

variantes étudiées dans un espace humide (basin rempli d'eau), comme indique la figure IV.16, l'hydratation de ciment après le durcissement rend les différentes variantes étudiées solides à partir de quelques heures puis continue d'évoluer pendant plusieurs mois, cela est mentionné par : Baroghel-Bouny, 1994. cité par : [13].



Figure IV. 16 : Conservation des éprouvettes.

#### IV.6. L'indice de l'activité pouzzolanique

D'après H.Scholze, 1980, [46], l'indice d'activité pouzzolanique est défini comme étant le rapport de la résistance en compression moyenne du mélange avec ajout de verre et la résistance en compression moyenne du mélange témoin, successivement pour 7, 14 et 28 jours. L'indice de l'activité pouzzolanique de verre (I) est mesuré selon la formule montrée ci-dessous :

$$I = \frac{R_{c_{moy\%PV}}}{R_{c_{moyTémoin}}}$$

##### IV.6.1. Résultats de calcul

Tableau IV. 11 : Les valeurs d'indices de l'activité pouzzolanique.

Âge (Jours)	Les variantes	R <sub>c</sub> Moyenne (MPa)	R <sub>c</sub> Témoin (MPa)	L'indice de l'activité pouzzolanique
7	10 % PV	35,27	36,13	0,98
	20 % PV	34,87		0,97
	30 % PV	33,60		0,93
14	10 % PV	36,80	38,63	0,95
	20 % PV	35,20		0,91
	30 % PV	35,10		0,91
28	10 % PV	39,17	42,20	0,93
	20 % PV	38,40		0,91
	30 % PV	37,87		0,90

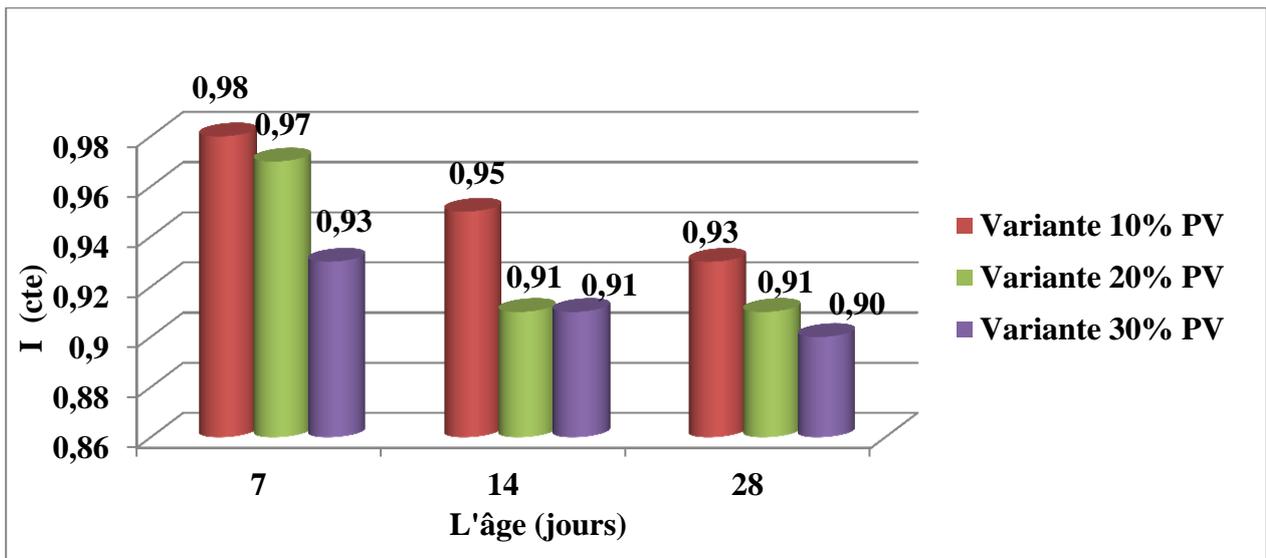


Figure IV. 17 : L'indice de l'activité pouzzolanique des trois variantes étudiées en fonction de l'âge.

#### IV.6.1.1. Remarques

a) Le calcul des indices d'activité pouzzolanique a révélé l'existence de l'activité pouzzolanique

#### IV.6.1.2. Interprétation des résultats

- a) L'estimation des indices d'activité pouzzolanique des variantes étudiées a révélée l'existence de l'effet pouzzolanique de la poudre de verre introduite dans les mélanges.
- b) L'effet de la granulométrie de poudre de verre sur l'activité pouzzolanique des variantes étudiées est mentionné dans les travaux de Shao et al [66].
- c) Dans notre travail, la substitution du ciment avec la poudre de verre a montré un effet bénéfique sur l'activité pouzzolanique, ce qui va favoriser la durabilité des matériaux.

#### IV.6.2. Explication sur l'indice d'activité pouzzolanique :

L'indice de l'activité pouzzolanique est lié à plusieurs paramètres, à savoir, la nature de ciment (% de C<sub>3</sub>A) responsable de la libération de la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub>, la finesse de l'ajout et le taux d'addition ou de substitution dans le mélange.

#### IV.7. Etudes statistiques des résultats

##### IV.7.1. Corrélation résistance à la compression / masse volumique

Les résultats des résistances en compression montrent une corrélation très significative en fonction de la masse volumique (Tableau IV. 8, Tableau IV. 9, Tableau IV. 10), avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,86$ . À 7, 14 et 28 jours, voir la figure IV. 18 ci-dessous :

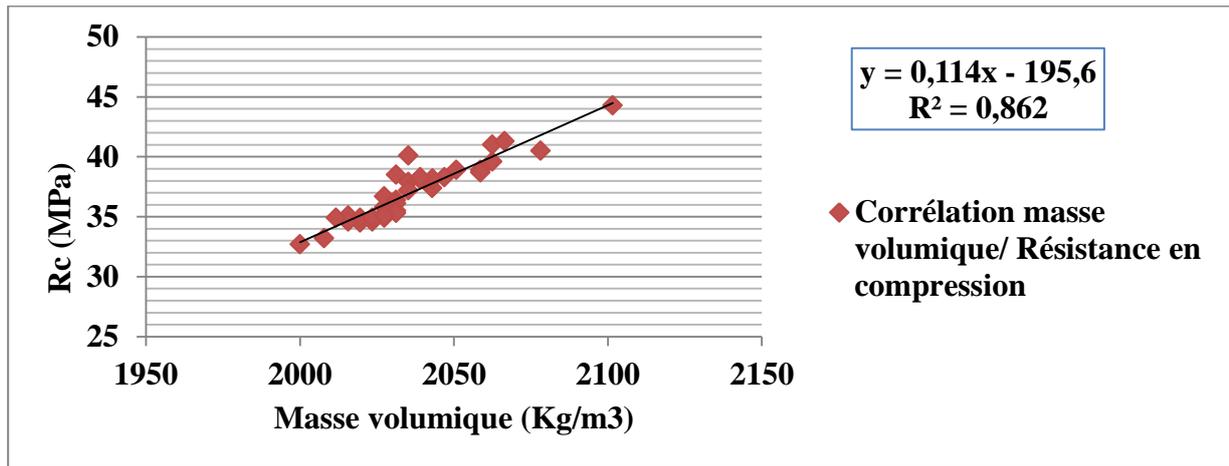


Figure IV. 18 : Corrélation résistance en compression / masse volumique à 7, 14 et 28 jours.

#### IV.7.2. Corrélation résistance à la flexion / masse volumique

Les résultats des résistances en flexion montrent une corrélation très significative à 7, 14 et 28 jours en fonction de la masse volumique (Tableau IV. 8, Tableau IV. 9, Tableau IV. 10), avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,82$ . Voir la figure IV. 19 ci-dessous :

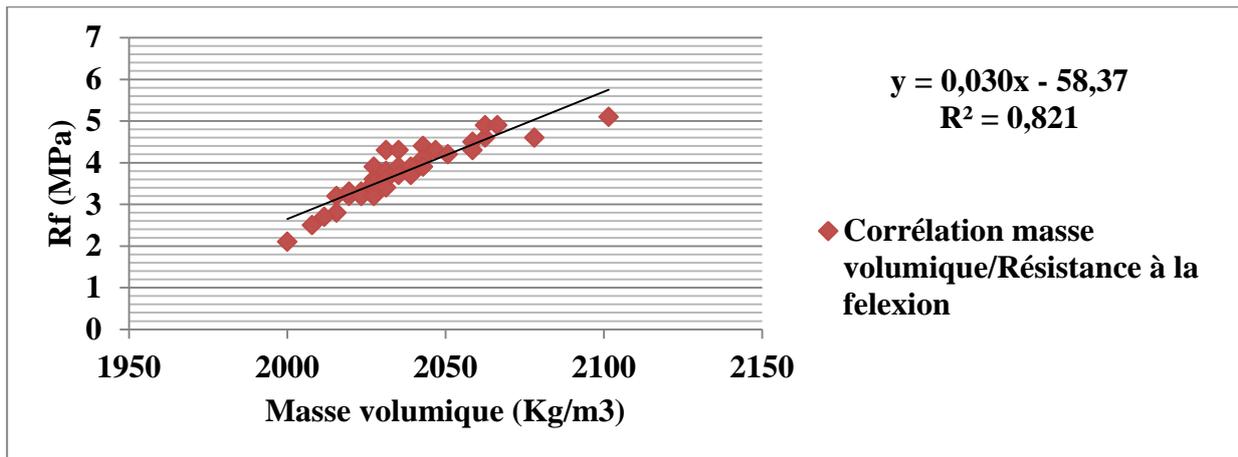


Figure IV. 19 : Corrélation résistance en flexion / masse volumique à 7, 14 et 28 jours.

#### IV.7.3. Corrélation résistance à la flexion / résistance en compression

Les résultats des résistances en compression montrent une corrélation très significative par rapport à la résistance en flexion à 7, 14 et à 28 jours (Tableau IV. 8, Tableau IV. 9, Tableau IV. 10), avec un coefficient de corrélation,  $R^2 = 0,85$ . Voir la figure IV.20ci-dessous :

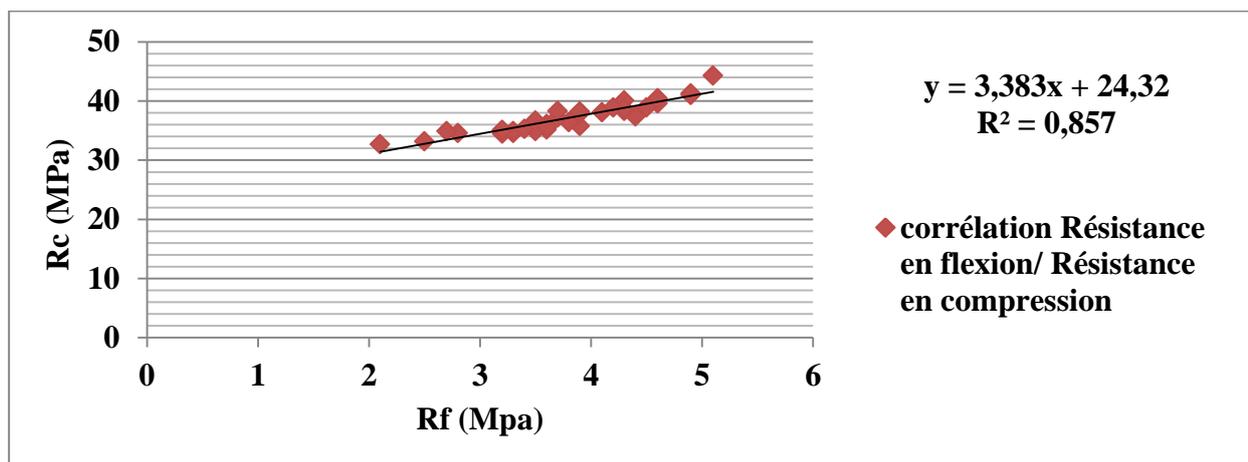


Figure IV. 20 : Corrélation résistance en compression / résistance en flexion à 7, 14 et 28 jours.

## **Conclusion générale et perspectives**

La nature difficilement dégradable des déchets de verre, fait de ces déchets un défi pour tous les pays du monde en raison des difficultés de gestion de ce type de déchet. Cependant, les industries du verre et du ciment ont d'énormes défis de nos jours : le recours à l'exploitation excessive des ressources naturelles, une consommation élevée de l'énergie et les émissions de gaz à effet de serre qui sont parmi les causes des changements climatiques.

Le renforcement des matériaux de construction, particulièrement, les sols glissants par les coulis de ciment par projection ou injection est une technique intéressante dans le but d'améliorer leurs caractéristiques physicomécaniques.

Le but de ce travail est l'étude de l'effet d'ajout des déchets de verre, sous forme de poudre à des taux (10 %, 20 %, 30 %) avec une granulométrie inférieure à 100  $\mu\text{m}$ , sur les propriétés physicomécaniques des coulis de ciment.

Les résultats obtenus au cours de ce travail mènent aux conclusions suivantes :

- 1- L'utilisation des déchets de verre dans l'industrie de la construction peut offrir une solution respectueuse de l'environnement pour ces déchets, et participer effectivement à la gestion de ce type de déchet.
- 2- Une amélioration des propriétés rhéologiques des coulis de ciment, à démontrer en augmentant le taux de dosage de superplastifiant.
- 3- Les résistances à la compression et par conséquent, des coulis de ciment confectionnés avec la poudre de verre donnent des valeurs satisfaisantes, en les comparant avec les valeurs de résistance préconisées par les organismes de contrôle technique des structures.
- 4- L'estimation des indices d'activité pouzzolanique des variantes étudiées a révélée l'existence de l'effet pouzzolanique de la poudre de verre introduite dans les mélanges.
- 5- Dans le contexte des résultats obtenus, on a exposé sur le marché dans un tableau de bord des résultats les gains suivants (Tableau V.1), tandis qu'un sac de 50 Kg de ciment portland coute environ 950 DA. Ce qu'il fait 450 Kg de ciment coute 8550 DA.

Tableau V. 1 : Tableau de bord des résultats obtenus

Les variantes	L'étalement $\times 10^{-2}$ (m)	Masses volumiques apparentes (kg/m <sup>3</sup> )			Rf (MPa)			Rc (MPa)			Les quantités de ciment et PV pour un m <sup>3</sup> (Kg)		Gain et le cout revenu	
		7 jours	14 jours	28 jours	7 jours	14 jours	28 jours	7 jours	14 jours	28 jours	Ciment	PV	Gain (%)	Cout (DA)
Témoin	20,50	2031,25	2054,69	2076,82	4,17	4,50	4,97	36,13	38,63	42,20	450	00	00	00
10 % PV	17,50	2023,44	2032,55	2061,20	3,33	3,77	4,40	35,27	36,80	39,17	405	45	10	855
20 % PV	14,50	2016,93	2028,64	2045,57	3,10	3,57	4,07	34,87	35,20	38,40	360	90	20	1710
30 % PV	09,50	2006,51	2027,34	2037,76	2,43	3,27	3,77	33,60	35,10	37,87	315	135	30	2565

A la lumière des conclusions énumérées précédemment, ce travail nous a permis de positionner un certain nombre de questionnement qui méritent d'être exposés telles que :

- 1- Une étude technico-économique est nécessaire pour estimer le gain budgétaire d'utilisation de la poudre de verre comme remplacement du ciment.
- 2- Une étude de l'effet de la poudre de verre par addition sur les propriétés physicomécaniques
- 3- Le temps d'écoulement
- 4- Une étude structurale par des essais complémentaires tels que : ATD, ATG, DRX, et MEB.
- 5-  $E/C > 0,35$ .
- 6- Dosage en superplastifiant  $> 0,2 \%$ .
- 7- Teste d'expansion.
- 8- Essai de temps de prise et de consistance normale des variantes.

## *Références bibliographiques*

- [1] Yahya Jani, William Hogland, 2014. Waste glass in the production of cement and concrete – A review, Journal of Environmental Chemical Engineering.
- [2] Ali A. Aliabdo, M. AbdElmoaty, Ahmed Y. Aboshama, 2016. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, construction and Building Materials, 124 p.
- [3] Benhamou, 1994, « Comportement rhéologique des coulis de liants hydrauliques ultrafins destinée à l'injection », Thèse de doctorat en géologie de L'Ingénieur. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 332 p.
- [4] B. Emad, Z. Gholamreza, S. Ezzatollah et B. Alireza, 2013. «Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry», Journal of Cleaner Production, pages: 142-161.
- [5] SALHI KAMEL, 2007. « Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton », thèse de magister, Université de Biskra, pages: 5-10.
- [6] DE LARRARD, F, 2000. Structures granulaires et formulation des bétons. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, pages : 30-208.
- [7] H. WEI, Q. SHEN, Y. ZHAO, Y. ZHOU, D. WANG AND D. XU, 2005. On the crystallization of calcium carbonate modulated by anionic surfactants. Journal of Crystal Growth, pages: 439-446.
- [8] J.C. Bastide, 1992, la fabrication de ciment- ciments français. Edition Eyrolles, Paris, 61 p.
- [9] MELODIE AURIOL, 2016, Influence des Interactions Physico-chimiques entre Particules et Composés Organiques sur la Stabilité de Mousses Minérales, thèse doctorat, bordeaux. Pages: 11 - 30.
- [10] BARON J & SAUTEREY R, 1982. Le béton hydraulique. Connaissance et pratique. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 560 p.
- [11] MOUHAMED LYES, KAMEL KHOUADJIA, 2016, Etude des propriétés physico-mécaniques et rhéologiques des bétons à base des sables de carrières : expérimentation et modélisation. Thèse de doctorat, université MOUHAMED KHIDER – BISKRA. Pages : 5-13.
- [12] BOGUE, R.H, 1952. La chimie du ciment portland. Paris: Editions Enrolls. 585 p.
- [13] BAROGHEL-BOUNY, V B, 1994. Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 487 p.
- [14] VERNET, C, 1992. Introduction à la physico-chimie du ciment Portland. Technoïdes, Centre de Recherche Industrielle et Technique, France. 87 p.
- [15] DRON, R, BRIVOT, F., MILLET, J., TINTURIER, M.H., HOMMEY, R., LARGENT, R., GEOFFRAY, J., VALLADEAU, R., FOURNIER, M., LAMBERT, P., RIEU, R, 1978. Les pouzzolanes et les basaltes. N° thématique du Bull. Liaison LPC, recueil des articles no.92, 93, 94.
- [16] FURLAN, V. & HOUST, Y, 1980. Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation. Chantiers, pages: 29-32.
- [17] FOLLIOT, A, 1982. Le ciment, in " Le béton hydraulique ", Presses de l'E.N.P.C, Paris, pages: 19-37

- [18] TAYLOR, H.F.W, 1990. Cement Chemistry. San Diego: Academic Press Limited, 465 p.
- [19] MINDESS, S, YOUNG, J.F, DARWIN, D, 2003. Concrete. Prentice Hall, Second edition, pages: 644.
- [20] HYVERT, N, 2009. Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier- Toulouse III, pages: 228.
- [21] VIMANE PHOUMMAVONG, M. 2009. Cours en béton armé-essais de laboratoire, Université Nationale du Laos, pages: 1-146.
- [22] Elodie NAULEAU, 2013. Evolution au cours du temps des propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires d'un puits géothermique basse énergie. Thèse de doctorat, université de paris. Pages: 25 - 41.
- [23] Cours université Sherbrooke « hydratation du ciment portland ». 2006, chapitre 6, Pages : 58- 59- 62.
- [24] FELDMAN, R.F, & SEREDA, P.J., 1968. A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. Materials and structures, vol.6, pages: 509-519.
- [25] DAMIDOT, D and GLASSER, F.P, 1995. Investigation of the CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O. Cement and Concrete Research, vol.25, no.1, pages: 22-28.
- [26] REGOURD, M. HORNAIN, H. 1975. Applications de la microscopie électronique à balayage. Revue des matériaux de construction, n° 693, pages : 73-87.
- [27] DAKHMOUCHE CHABIL, F.Z, 2009. Carbonatation de bétons adjuvantes à base de ressources locales algériennes. Thèse de Doctorat. Centre de Recherche sur la Matière Divisée (CRMD)/Département de Génie Civil, Algérie, 240 p.
- [28] KLUR, 1996. Etude par RMN de la Structure des Silicates de Calcium Hydrates. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 250 p.
- [29] THOMAS, J.J. JENNINGS, H.M. ALLEN, A.J. 1999. The surface area of hardened cement paste as measured by various techniques. Concrete Science and Engineering, vol. 1, pages: 45-64.
- [30] JENNINGS, H.M, 2000. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. Cement and concrete research, vol. 30, no.1, pages : 101-116.
- [31] FAUCON, P. DELAYE, J.M. VIRLET, J. JACQUINOT, J.F. ADENOT, F, 1997. Study of the structural properties of C-S-H by molecular dynamics simulation. Cement and concrete research, pages: 1581-1590.
- [32] BRUNETAUD, X, 2005. Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 255 p.
- [33] K. L. SCRIVENER AND A. NONAT, 2011. Hydration of cementitious materials, present and future. Cement and Concrete Research, pages: 651-665.
- [34] Pierre Claude Aitcin, 2000. « Béton haute performance ». 175 p.

- [35] P.C. AITCIN. Mai 1968. « Les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut Fournaux de fonte thomas et leur utilisation dans les mortiers en béton ». Revue des matériaux de construction.
- [36] YAHIA, A, 1995. Développement et optimisation des coulis de ciment pour le scellement des ancrages submergés Rapport préparé dans le cadre de l'examen pré doctoral, Université de Sherbrooke, 118 p.
- [37] La norme AFNOR NF P 18-103, Février 1972. Béton : définitions et marquages des adjuvants du béton.
- [38] R CHAID, R JAUBERTHIE, M. T ABADLIA, A BALI, 2006, Etude expérimentale de la durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine 1. Route Ain El-Bey. 25000.
- [39] La norme NF EN 197-1, 2000, Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, 22 p.
- [40] DJOBO YANKWA jean Noël, 2013, effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments géo-polymères à base scories volcanique, UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ, 68 p.
- [41] A.K. Ramezani pour, April 1987. Engineering properties and morphology of pouzzolan cement concrete, Thesis, University of Leeds, 310 p.
- [42] BOULIFA Marwa, DEBABI Adel, 2017 « Utilisation de poudre de verre dans le mortier » mémoire de master, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA, Pages: 1- 13.
- [43] Wang, X. Moto-cross. V, Panczer. G, De Ligny, D. Yu, J. Benoit, J. M. Dussossoy, J. L. Peugeot, S. 2013, Mapping of rare earth elements in nuclear waste glass–ceramic using micro laser-induced breakdown spectroscopy. Spectrochimica Acta. Pages: 139-146.
- [44] Mamery Serifou, 2014. Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation, thèse de doctorat. L'UNIVERSITE BORDEAUX 1, page : 47.
- [45] ZOUBIRI AMINA, 2015-2016, Comportement du béton à base de la poudre de verre à hautes températures. Effet de l'âge, Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 94 p.
- [46] H .SCHOLZE, 1980. Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre, Paris.
- [47] KOJIMA, T, TAKAGI, Net HARUTA, K. 2000. Expanding characteristics of mortar in glass powder produced from waste bottles, 11th international conference on Alkali Aggregate Reaction, Quebec.
- [48] Rachida IDIR \*Martin CYR Arezki TAGNIT-HAMOU, 2010. Etude des propriétés des bétons de verre, rapport. Centre d'Etudes Techniques Université de Toulouse France.
- [49] DJAFER-KHODJA Miloud, 2016-2017, étude de l'effet de la finesse de la poudre de verre sur les propriétés physico-mécaniques du béton, UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ– BOUIRA, 104 p.
- [50] IB. Topçu, M. Canbaz, 2003-2004. Properties of concrete containing waste glass, Cement and Concrete Research, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres..07.003>. Page: 267-274

- [51] M. Ruth, P. Dell Anno, 1997, an industrial ecology of the US glass industry, pages: 109-124.
- [52] M. Saito, M. Shukuya, 1996. Energy and material use in the production of insulating glass windo. Solar Energy 58, pages: 247-252.
- [53] A. Schmitz, J. Kaminski, Scalet B. Maria, A. Soria, 2011. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of the European glass industry, Energy Policy. Page: 142-155.
- [54] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, H. Wang, 2005. Characteristic and pozzolanic reactivity of glass powders, Cement and Concrete Research 35, pages: 987-993.
- [55] L.M. Federico, S.E. Chidiac, .2009. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete, critical review of treatment methods, Cement and Concrete Composites pages: 606-610.
- [56] K.H. Tan, H. Du, 2013. Use of waste glass as sand in mortar, mechanical and durability properties. Cement and Concrete Composites 35. Pages: 109-117.
- [57] L.A. Pereira-de-Oliveira, J.P. Castro-Gomes, P.M.S. Santos, 2012. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components, Construction and Building Materials 31. Pages: 197-203.
- [58] T. Zhang, P. Gao, P. Gao, J. Wei, Q. Yu, 2013. Effectiveness of novel and traditional methods to incorporate industrial wastes in cementitious materials an overview. Resources and conservation and recycling 74. Pages : 134-143.
- [59] K.M. Lee, H.K. Lee, S.H. Lee, G.Y. Kim, 2006. Auto-generous shrinkage of concrete containing granulated blast furnace slag, cement and Concrete Research 7, pages: 1279-1285.
- [60] N. Farzadnia, Ali A.A. Abang, R. Demirboga, M.P. Anwar, 2013. Effect of halloysite nanoclay on mechanical properties, thermal behavior and microstructure of cement mortars, Cement and Concrete Research 48, pages: 97–104.
- [61] N. Lairaksa, A. R. Moon, N. Makul, 2013. Utilization of cathode ray tube waste, Journal of Environmental Management 117, pages: 180-186.
- [62] S. de Castro, J. de Brito, 2013. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates, journal of cleaner production 41. Pages: 7-14.
- [63] Arab B et all, 2017, Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances, déchet science et technique. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. 8 p.
- [64] R.G. Pike. D, hubbard, 1957. Physicochemical studies of the destructive alkali aggregate reaction in concrete, Journal of Research of the National Bureau of Standards 59, pages: 127-132.
- [65] K.H. Tan, H. Du, 2013. Using of waste glass as sand in mortar. Part I. Fresh, mechanical and durability properties, Cement and Concrete Composites 35, pages: 109-117.
- [66] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez, 2000. Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete Research 30, pages: 91-100.

- [67] R. Idir, M. Cyr, A. 2011. Tagnit-Hamou, Pozzolan properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, *Cement and Concrete Composites* 33, pages: 19-29.
- [68] A. Shayan, 2002. Value added utilization of waste glass in concrete, IABSE Symposium, Melbourne, 286 p.
- [69] A. Khmiri, M. Chaabouni, B. Samet, 2013. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars, *Construction and Building Materials* 44. Pages: 74-80.
- [70] A. Khmiri, B. Samet, M. Chaabouni, 2011 A cross mixture design to optimize the formulation of a ground waste glass blended cement, *Construction and Building Materials*, pages: 680-686.
- [71] R. Nassar, P. Soroushian, 2012. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials* 29. Pages: 368-377.
- [72] Poupelloz B, 1979. Traitement des terrains par injection. Laboratoire de l'est parisien, 82 p.
- [73] Shahinaz SAYAGH, 2001. Etude des coulis d'injection à base de liants minéraux: application aux maçonneries, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 91 p.
- [74] Zied Saada, 2003, « Etude expérimentale et théorique de l'injection d'une suspension dans un milieu granulaire ». Application aux coulis de ciment. Planète et Univers [physiques]. Ecole des Ponts Paris Tech. France. Pages: 8-10.
- [75] CHRISTOPHE Dano, 2001. Comportement mécanique des sols injectés. Thèse de DOCTORAT, l'Ecole Centrale de Nantes, France, 215 p.
- [76] La norme NF EN 934-2, 2002. Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, 20 p.
- [77] NF EN 933-1, 2012, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, 17 p.
- [78] Quoc Gia Hoang, 2015, Etude de la ségréabilité des coulis cimentaires sous cisaillement. Matériaux. Université de Cergy Pontoise, thèse de doctorat, 170 p.
- [79] La norme NFP 94-064, 1993. Sols : reconnaissance et essais - Masse volumique sèche d'un élément de roche - Méthode par pesée hydrostatique, 6 p.
- [80] La norme NF EN 196-1, 1995, Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques, 21 p.
- [81] NGUYEN, J.P., 1993. *Le forage*. Edition Technic, Paris and Institut Français de pétrole Rueil Malmaison, 192 p.

## *Annexes*



## المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر

GRUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE  
SOCIETE DES CIMENTS DE SOUR EL GHOZLANE

« S.C.S.E.G. »

S.P.A. au capital social de : 1.900.000,000 D A : ش.ذ.أ. - زاساتلها الاجتماعي



N° Identification Fiscale : 099 810 028 210 584 - N° Article d'Imposition : 10 38 52 58 011 - N° Registre de Commerce : 10/00-0262105898

**Produit Commercialisé :**  
Ciment CEM II / A-M (P-L) 42.5 N

### Fiche technique

**Période D'expédition :**

Avril -Mai 2019 -

Conformément à la norme NA 442 édition 2013

Caractéristique physico-mécaniques				Composition chimique		
Désignations	Unités	Exigence	Moyenne	Composé	Exigence	Moyenne (%)
Poids spécifique	Gr/cm <sup>3</sup>		3.09	SiO <sub>2</sub>		20.06
Surface spécifique Blaine	Cm <sup>2</sup> /gr		4000	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3.99
Consistance normale	% H <sub>2</sub> O		26.11	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3.04
Temps de prise	Début	Min.	≥ 60	CaO		61.57
	Fin	Min.	322			
Expansion à chaud	mm	≤ 10	2.79	MgO		1.62
Chaleur d'hydratation à (41h)	(j/g)	270	238.8	K <sub>2</sub> O		0.54
Refus sur tamis 45 µm	%		15.58	Na <sub>2</sub> O		0.26
Résistance à la flexion	02 jours	Mpa	4.56	SO <sub>3</sub>	≤ 3.50	2.06
	07 jours	Mpa	6.12	Cl <sup>-</sup>	≤ 0.10	< 0.01
	28 jours	Mpa	6.92	P.A.F à 1000 ° C		7.16
Résistance à la compression	02 jours	Mpa	≥ 10.00	CaO <sub>libre</sub>		1.56
	07 jours	Mpa				
	28 jours	Mpa	Li ≥ 42.5 Ls ≤ 62.5	43.53	---	---

Observation : c'est un ciment portland composé, dont les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques satisfont aux exigences du ciment CEM II / A-M (P-L) 42.5N Selon la norme NA 442/2013.

Société des Ciments Sour El Ghoulane  
Siège : Col de Becouche BP 61, Sour El Ghoulane  
(W) de Bouira, 10004 Algérie  
E-Mail : bodg-scseg@scseg.dz

**Le chef de Département**

**Notice produit**  
Edition Août 2016  
Numéro 1.23  
Version n° 108.2016  
SIKA® VISCOCRETE® 665

## SIKA® VISCOCRETE® 665

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab 3.1 et 3.2.

<b>Présentation</b>	Le Sika Viscocrete 665 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique. Le Sika Viscocrete 665 est compatible avec tous les ciments même avec un taux C3A faible.
<b>Domaines d'application</b>	Le Sika Viscocrete 665 permet la fabrication : <ul style="list-style-type: none"> <li>■ de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.</li> <li>■ de bétons à longs maintiens de rhéologie (&gt;2h30), sans reprise de fluidité dans le temps.</li> </ul>
<b>Caractères généraux</b>	Le Sika Viscocrete 665 est un superplastifiant qui confère aux bétons les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Longue rhéologie (&gt;2h30)</li> <li>■ Evolution rapide des résistances à court et à long terme</li> <li>■ Réduction de la viscosité</li> <li>■ Amélioration de la stabilité du béton frais et limitation de la ségrégation avec des granulats concassés</li> <li>■ Pas de reprise de fluidité dans le temps</li> <li>■ Qualité de parement</li> </ul>
<b>Agréments, essais de laboratoire</b>	PV CNERIB : DTEM : 396/2016.
<b>Caractéristiques</b>	
<b>Aspect</b>	Liquide marron
<b>Conditionnement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fût de 200 Kg</li> <li>■ Conteneur perdu de 1000 Kg</li> <li>■ Vrac</li> </ul>
<b>Stockage</b>	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
<b>Conservation</b>	12 mois dans son emballage d'origine intact



**Données techniques**

densité 1,085 ± 0,015

pH 5 ± 1,0

Teneur en Na<sub>2</sub>O Eq. ≤ 1,0%

Extrait sec 33,0 ± 1,1% (méthode halogène selon NF 085)

Teneur en ions Cl<sup>-</sup> ≤ 0,1%**Conditions d'application****Dosage** Plage de dosage : 0,4 à 2% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.**Mise en œuvre**

Le Sika Viscocrete 665 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

**Précautions d'emploi**En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau.  
Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet.**Mentions légales**

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la notice correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair  
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus  
Alger/ ALGERIE  
Web : dza.sika.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84  
213 (0) 21 50 16 92 à 95  
Fax: 213 (0) 21 50 22 08

