

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA –
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en Génie Civil

Option : Structures

Thème

**Etude d'un mortier avec ajout de la farine
de verre trempé**

Réalisé par :

*AKROUN Billal
BOUADJAMA Massinissa*

Devant le jury composé de :

Mr SLIMANOU Houssam

Président

Mme GUENOUNOU Kahina

Examinatrice

Mme AREZKI Samia

Encadrante

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier en premier lieu, notre seigneur Dieu, le tout puissant qui nous a donné la patience, le courage et grâce auquel nous avons pu achever ce mémoire.

Tout d'abord, un énorme et chaleureux merci à Mme. S.AREZKI notre promotrice, pour avoir encadré et suivi ce travail.

Nous remercions les membres de jury de nous avoir honoré en présidant et en examinant ce mémoire.

Ainsi qu'à toute les personnes qui nous a apporté leur aide, et particulièrement :

- Au directeur et l'ensemble de technicien du laboratoire de travaux publics
LMTPB.
- Mr MEDDAD smail directeur de EURL ALGIC.
- Mr MOUZAOUI kamal directeur de EURL ISOONE.
- Mr HANI azzdine .

Un grand merci aux techniciens du Laboratoire Mr ZOUBIRI Djamel, Mme SASI pour leurs disponibilités et, leurs compréhensions au niveau de laboratoire.

Et enfin, nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants qui nous ont enrichis avec un précieux savoir qui est le meilleur héritage pour l'avenir.

BILAL & MASSINISSA.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant toute ma vie.

À ma famille, pour leur soutien inconditionnel et leur amour constant.

À mes enseignants, pour leur guidance précieuse et leur inspiration.

*À mes amis, pour leurs encouragements et leur compréhension pendant les
moments difficiles.*

*À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, je
vous dédie ce mémoire avec gratitude et reconnaissance.*

Je témoigne toute ma reconnaissance et mes sincères remerciements

À toute la promotion GC2024.

BILLAL.

Dédicaces

Je dédie ce présent travail

À mes chers et nobles parents dont je suis

Et je serais pleinement reconnaissant pour m'avoir soutenu durant tout mon

parcours, et aussi :

À mon frère zahir.

A ma sœur et ma belle-sœur.

A ma cousine dalila.

A toute la grande famille : mes oncles, ma tante, mes cousins et cousines ;

A mon binôme billal et toute sa famille.

A tous mes amis (es) : (agour, massy, mohand seghir, billal, yanis, karima,

ouardia, meziane, kceila,).

Que Dieu vous bénisse !

MASSINISSA.

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Symboles et abréviations

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I.1 Introduction 3

I.2 Mortier 3

I.2.1 Définition de mortier..... 3

I.2.2 Historique de mortier 3

I.2.3 Différents type de mortier 4

I.2.3.1 Mortier de ciment 4

I.2.3.2 Mortier de chaux 4

I.2.3.3 Mortier bâtard..... 4

I.2.3.4 Mortier hydrofuge 4

I.2.3.5 Mortier-colle (Rapide) 4

I.2.3.6 Mortier réfractaire 4

I.2.4 Utilisation de mortier 4

I.3 Liant..... 5

I.3.1 Liants minéraux..... 5

I.3.2 Liants organiques 5

I.4 Ciment..... 6

I.4.1 Définition 6

I.4.2 Etapes de fabrication de ciment 6

I.4.2.1 Extraction est concassage 6

I.4.2.2 Préparation de CRU 6

I.4.2.3 Cuisson..... 6

I.4.2.4 Broyage 6

I.4.3 Constituants de ciment 7

I.4.3.1 Clinker.....	7
I.4.3.2 Gypse	8
I.4.3.3 Les ajouts minéraux	8
I.4.4 Types de ciment	8
I.4.5 Hydratation de ciment.....	9
I.4.5.1 Hydratation des silicates	9
I.4.5.2 Hydratation des aluminates.....	9
I.4.5.3 Processus de l'hydrations.....	10
I.5 Sable.....	10
I.5.1 Type de sable	11
I.5.1.1 Sables artificiels	11
I.5.1.2 Sables naturels.....	11
I.5.1.2.1 Sable de mer.....	11
I.5.1.2.2 Sable de fluviatile.....	11
I.5.1.2.3 Sable de carrière.....	11
I.5.2 Classification de sable.....	11
I.5.2.1 Classification selon la granulométrie	11
I.5.2.1.1 Sable grosserie	11
I.5.2.1.2 Sable moyen.....	11
I.5.2.1.3 Sable fin	12
I.5.2.2 Classification selon la propreté	12
I.5.3 Rôle de sable	12
I.6 Eau de gâchage.....	12
I.7 Adjuvants	12
I.7.1 Différents types d'adjuvants	13
I.7.1.1 Accélérateurs de prise et durcissement	13
I.7.1.2 Retardateurs de prise	13
I.7.1.3 Entraîneurs d'air.....	13
I.7.1.4 Hydrofuges de masse	13
I.7.1.5 Rétenteur d'eau	13
I.7.1.6 Super plastifiants – hauts réducteurs d'eau.....	13
I.7.1.7 Plastifiants pour le béton.....	13
I.7.2 Rôle d'adjuvants	14
I.8 Les ajouts minéraux	14
I.8.1 Classification d'ajouts minéraux.....	14

I.8.2 Propriétés des ajouts minéraux	15
I.8.2.1 Propriétés hydrauliques.....	15
I.8.2.2 Propriétés pouzzolaniques	15
I.8.2.3 Propriétés physique.....	15
I.8.3 Les différents types d'ajouts	15
I.8.3.1 Les ajouts minéraux inertes	15
I.8.3.1.1 Filler calcaire	15
I.8.3.1.2 La poussière	16
I.8.3.2 Les ajouts minéraux actifs	16
I.8.3.2.1 Les pouzzolanes	16
I.8.3.2.2 Le laitier de haut fourneau	19
I.8.3.2.3 Les fumées de silice	20
I.8.4 Avantages d'utilisation des ajouts	21
I.8.4.1 Avantages techniques.....	21
I.8.4.2 Avantages économique	21
I.8.4.3 Avantages écologique	21
I.9 verre	21
I.9.1 Historique du verre	21
I.9.2 Définition du verre	22
I.9.3 Structure des verres.....	22
I.9.4 Propriétés du verre	23
I.9.4.1 Propriétés physiques	23
I.9.4.2 Propriétés thermiques.....	23
I.9.4.3 Propriétés chimiques	23
I.9.4.4 Propriétés mécanique	24
I.9.5 Les types du verre	24
I.9.5.1 verre recuit	24
I.9.5.2 verre feuilleté	24
I.9.5.3 verre isolant.....	25
I.9.5.4 verre métallique	25
I.9.6 L'utilisation de verre en génie civil	25
I.9.6.1 L'utilisation de verre dans le ciment.....	25
I.9.6.2 L'utilisation de verre dans le bâtiment.....	25
I.10 verre trempé.....	26
I.10.1 L'historique.....	26

I.10.2 Définitions de verre trempé	26
I.10.3 Fabrication de verre trempé	26
I.10.4 Propriétés de verre trempé	28
I.10.4.1 Propriétés physiques	28
I.10.4.2 Propriétés chimiques	28
I.10.4.3 Propriétés mécanique	28
I.10.5 Les avantage de verre trempé	28
I.10.6 Les applications du verre trempé	29
I.11 Conclusion	29

Chapitre II : Analyse des matériaux utilisés

II.1 Introduction	30
II.2 Les matériaux utilisés	30
II.2.1 Le ciment	30
II.2.2 Le sable.....	30
II.2.3 Eau de gâchage	30
II.2.4 Verre trempé.....	30
II.3. Analyse chimique et minéralogique des matériaux.....	30
II.3.1 Ciment	30
II.3.2 Verre trempé.....	31
II.3.2.1 L'analyse par diffraction des rayons X (DRX)	32
II.3.2.2 L'analyse par spectrométrie de fluorescence (XRF)	33
II.4 Analyse physique des matériaux	34
II.4.1 Le sable.....	34
II.4.1.1 Essai granulométrique (NF P 18-560)	34
II.4.1.2 Détermination de la teneur en eau pondéral (NF P 94-050).....	37
II.4.1.3 La masse volumique absolue	39
II.4.1.4 La masse volumique apparente.....	40
II.4.1.5 Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9)	43
II.4.1.6 Equivalent de sable (NF EN 933-8)	45
II.4.2 Le ciment	49
II.4.2.1 Essai de prise (EN 196-7).....	49
II.4.3 Verre trempé.....	52
II.4.3.1 Masse volumique absolue.....	52
II.4.3.2 Masse volumique apparente	53
II.5 Conclusion.....	54

Chapitre III :Caractéristiques physico-mécaniques et thermique des mortiers avec ajout de verre trempé

III.1 Introduction	55
III.2 Compositions des mortiers.....	55
III.2.1 Calcul des quantités de matériaux nécessaires pour les différentes éprouvettes.....	56
III.2.2 Mode opératoire	56
III.3 Confection des éprouvettes	57
III.4 Conservation des éprouvettes	58
III.5 Essais physiques.....	59
III.5.1 Essai de porosité.....	59
III.5.2 Essai d'absorption d'eau	61
III.5.3 Essai absorption d'eau capillaire	63
III.5.4 Masse volumique apparente	66
III.6 Essai mécanique.....	67
III.6.1 Essai à la flexion	67
III.6.2 Essai de compression	70
III.7 Etude thermique	74
III.7.1 Essai de la conductivité thermique.....	74
III.8 Conclusion	76
Conclusion générale :	77

Références Bibliographiques

Annexes

Liste des figures

Figure I.1	Shéma fabrication de ciment	7
Figure I.2	Pouzzolane naturelle	17
Figure I.3	Pouzzolane artificielle	18
Figure I.4	Laitier de haut de fourneau	19
Figure I.5	Fumée de silice sous forme de poudre.	20
Figure I.6	fabrication de verre trempé	27
Figure II.1	Etapes d'obtention de la poudre de verre	32
Figure II.2	Diffractogramme de rayons X de la poudre de verre	33
Figure II.3	Le sable utilisé	36
Figure II.4	L'opération de tamisage	36
Figure II.5	La courbe granulométrique de sable utilisé	37
Figure II.6	Éprouvette d'essai de la masse volumique de sable carrier	40
Figure II.7	L'essai de la masse volumique apparente	42
Figure II.8	Malaxeur pour le bleu de méthylène	44
Figure II.9	Matériel utiliser pour l'équivalent de sable	47
Figure II.10	L'éprouvette préparée pour l'essai d'équivalent de sable	48
Figure II.11	Essai de prise de ciment	51
Figure II.12	Temps début et fin de prise	51
Figure II.13	L'essai de masse volumique absolue du verre trempé	52
Figure II.14	Essai de la masse volumique apparente	53
Figure III.1	Malaxeur normalisé	57
Figure III.2	Moule 4×4×16 cm	58
Figure III.3	Table a choc	58
Figure III.4	Stockage des éprouvettes	58
Figure III.5	Conservation des éprouvettes dans l'eau	58
Figure III.6	Essai de porosité	60
Figure III.7	la variation de porosité en fonction de temps	61
Figure III.8	Etuvage des éprouvettes	62
Figure III.9	Absorption d'eau en fonction de temps	63
Figure III.10	Essai d'absorption capillaire	64
Figure III.11	Variation d'absorption capillaire en fonction de temps	65
Figure III.12	Variation de la masse volumique apparente	67
Figure III.13	Le dispositif d'essais de compression et de flexion	68
Figure III.14	Mise en place de l'éprouvette	68
Figure III.15	Rupture de l'éprouvette	68
Figure III.16	Résistance à la flexion	69
Figure III.17	L'essai de compression pour la demi-prisme	70
Figure III.18	La résistance à la compression	71
Figure III.19	La chute de la résistance a la compression	73
Figure III.20	Essai de la conductivité thermique	74
Figure III.21	Histogramme de la conductivité thermique	75

Liste des tableaux

Tableau I.1	Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment.	14
Tableau I.2	Classification des ajouts selon leur réactivité	15
Tableau I.3	Composition chimique type de laitiers de haut fourneau	19
Tableau I.4	Composition chimiques de la fumée de silice	20
Tableau II.1	Caractéristiques minéralogiques du ciment CEM II/A-L 42,5 N	31
Tableau II.2	Composition potentielle du clinker	31
Tableau II.3	Résultats de la FRX	34
Tableau II.4	Analyse granulométrique sable 0/5	36
Tableau II.5	Détermination de la teneur en eau de sable de carrier	38
Tableau II.6	Détermination de la masse volumique absolue	40
Tableau II.7	Détermination de la masse volumique apparente de sable	42
Tableau II.8	Détermination de l'argilosité de sable par essai bleu de méthylène	45
Tableau II.9	Détermination de la propreté de sable	48
Tableau II.10	Résultats de l'essai de masse volumique absolue	53
Tableau II.11	Résultats de la masse volumique apparente	54
Tableau III.1	composition des mortiers	56
Tableau III.2	Résultats des mesures de la porosité	60
Tableau III.3	Résultats d'absorption d'eau	62
Tableau III.4	résultats d'absorption capillaire	65
Tableau III. 5	Variation de la masse volumique sèche	66
Tableau III.6	Résultats des mesures de résistance à la flexion	69
Tableau III.7	Résultats des mesures de la résistance à la compression	71
Tableau III.8	résultats de la chute de la résistance à la compression	72
Tableau III.9	Résultats de la IAP	73
Tableau III.10	Résultats de mesures de la conductivité thermique	75

Symboles et abréviation

J.-C	Jésus-Christ
XVIIIe	18 ^e siècle
XIXe	19 ^e siècle
C3S	Silicate tricalcique
C2S	Silicate bicalcique
CEM I	Le ciment Portland
CEM II/A ou B	Le ciment Portland composé
CEM III/A ou B	Le ciment de haut fourneau
CEM III/C	Le ciment de haut fourneau
CEM V/A ou B	Le ciment composé
C-S-H	le silicate de calcium hydraté
CH	la chaux éteinte (portlandite)
VBS	Bleu de méthylène
PVB	Polybutyral vinylique
DRX	L'analyse par diffraction des rayons X
XRF	L'analyse par spectrométrie de fluorescence
MF	module de finesse
W	teneur en eau
ρ_{ab}	La masse volumique absolue
AFt	l'aluminate réagit avec le sulfate de gypse pour former de l'ettringite
AFm	monosulfoaluminates de calcium hydraté
P	masse de matériau utilisé
V₁	volume dans l'éprouvette avant d'introduire la masse de matériau
V₂	volume dans l'éprouvette après avoir introduit la masse de matériau
ρ_{ap}	La masse volumique apparente
P₁	poids de récipient vide
P₂	poids de récipient plein
V	volume de récipient
MB	La valeur au bleu de la fraction 0/2 des sables
ES	Équivalent de sable
h₁	Hauteur de sable visible
h₂	Hauteur total de sable + les fines en suspension
d	distance
E/C	Rapport eau / ciment
VT	Verre trempé
M_e	Pesé dans l'eau (hydrostatique)
M_a	Pesé à l'air à l'état humide
M_s	Pesé à l'air à l'état sec
P(%)	Porosité en pourcentage
M_{humide}	pesé humide
Ab (%)	absorption d'eau en pourcentage
C	Le coefficient d'absorption capillaire
M	masse d'eau en gramme absorbée par l'éprouvette depuis le début de l'immersion
S	surface de la face immergée exprimée en cm ²
T	temps en minutes écoulé depuis le début de l'immersion
ρ	Masse volumique apparente
RC	résistance à la compression
IAP	L'indice d'activité pouzzalannique

Introduction générale

Introduction générale

La construction durable est devenue une priorité mondiale alors que nous nous efforçons de réduire notre empreinte écologique et de promouvoir des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, l'innovation dans les matériaux de construction joue un rôle décisif pour répondre aux exigences de durabilité et de performance. L'un des défis auxquels l'industrie de la construction est confrontée est de trouver des moyens de réduire l'empreinte carbone des matériaux tout en maintenant, voire en améliorant, leurs propriétés mécaniques.

Le mortier est un matériau essentiel dans la construction, utilisé pour lier l'ensemble des éléments de maçonnerie tels que des briques, des pierres ou des blocs de béton. Sa composition classique comprend du ciment, du sable et de l'eau... Cependant, les chercheurs et les ingénieurs cherchent constamment des moyens d'améliorer les performances de ce matériau vis-à-vis de la résistance à la compression, la durabilité et la résistance aux fissures.

Dans cette optique, l'incorporation de déchets de verre trempé dans les matériaux de construction offre une opportunité intéressante. Le verre trempé, produit par un processus de chauffage suivi d'un refroidissement rapide, est connu par sa résistance et sa durabilité, est généralement utilisé dans les fenêtres, les portes et d'autres applications pour sa résistance accrue. Cependant, la gestion des déchets de verre trempé pose un défi environnemental, et leur réutilisation dans des applications telles que les mortiers de construction pourrait offrir une solution durable et économique.

L'ajout de farine de verre trempé au mortier est une innovation qui suscite un intérêt croissant. L'étude d'un mortier avec l'ajout de farine de verre trempé est une exploration intéressante dans le domaine des matériaux de construction. Ce thème combine l'ingénierie des matériaux avec les défis pratiques de la construction, offrant des possibilités d'amélioration significative des propriétés des mortiers traditionnels.

Cette étude générale sur le thème du mortier avec ajout de farine de verre trempé vise à explorer les différents aspects de cette innovation, notamment ses effets sur la résistance à la flexion et à la compression et l'isolation thermique. Des échantillons de mortier fabriqués à des pourcentages variés de verre trempé (10%, 20% et 30%) ont été analysés au fil du temps. Cependant, afin de déterminer les caractéristiques physico-mécaniques du mortier fabriqué, des tests techniques ont été réalisés afin d'étudier l'impact de l'ajout utilisé sur les performances du mortier.

Introduction générale

Notre travail comprend deux parties principales, la partie théorique et la partie expérimentale qui s'articulent autour de trois chapitres.

La première partie se compose d'un chapitre :

Le chapitre I est consacré à la synthèse bibliographique du mortier utilisé tel que leurs (définitions, historique, caractéristiques, propriétés, utilisation ...etc.).

La seconde partie (expérimentale) comporte deux chapitres :

Le chapitre II s'intéresse aux matériaux utilisés et aux méthodes expérimentales de chaque analyse réalisée.

Le dernier chapitre présentera les résultats des essais physico-mécaniques et thermique ainsi que leurs interprétations.

Enfin, une conclusion générale permet de synthétiser les principaux résultats obtenus.

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I.1 Introduction

Le mortier est un mélange de sable, d'eau, de liant hydraulique (ciment ou chaux) et éventuellement d'adjuvant qui durcit comme de la pierre. Il se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Le but de ce chapitre est de présenter des généralités sur les mortiers, le sable, le ciment, les adjuvants et les différents types d'ajouts minéraux. Pour notre étude nous nous intéressons au verre trempé comme ajout dans la confection d'un mortier. Sur ce des généralités sur le verre et le verre trempé (définitions, structures, propriétés et applications) sont exposées par la suite.

I.2 Mortier

I.2.1 Définition de mortier

Le mortier est un matériau de construction obtenu par mélange de liant, de sable et d'eau et éventuellement des adjuvants, réalisé dans des proportions bien définies de manière à obtenir une pâte de maniabilité convenable pour la mise en œuvre. Ce mortier sert à lier les différents éléments de construction tels que des briques, des pierres, des blocs de béton (parpaings)... ou à exécuter des revêtements et des enduits de façade. [1]

I.2.2 Historique de mortier

Selon les articles et les définitions que l'on va donner aux mortiers (enduits ou systèmes de scellement), ceux-ci ont fait leur apparition il y a entre 3000 et 10 000 ans avant J.-C. Parmi les premiers exemples de construction imposante utilisant les mortiers, nous pouvons citer la pyramide de Saqqarah, construite par Imhotep, qui est considéré comme l'un des inventeurs des mortiers. Leur utilisation va se généraliser lorsque s'ouvre l'ère de la maçonnerie. Les mêmes types de mortiers seront utilisés des siècles durant et nous n'avons que peu de travaux techniques et scientifiques sur leur mode de fonctionnement jusqu'à la fin du XVIIIe siècle. Les recherches ne commenceront réellement qu'au début du XIXe, notamment avec Louis Vicat et la découverte de l'hydraulicité en 1817. Nous pouvons également noter une des études les plus complètes sur les mortiers à la chaux réalisée par le Général Treussart, inspecteur du génie, qui publia en 1824 un Mémoire sur les mortiers hydrauliques et sur les mortiers ordinaires. [25]

I.2.3 Différents type de mortier

I.2.3.1 Mortier de ciment

Le mortier-ciment est le produit le plus basique. Il est indispensable pour construire un mur et lier les pierres ou briques entre elles. Il s'agit d'un mélange classique de ciment, de sable et d'eau.

I.2.3.2 Mortier de chaux

Le mortier de chaux est un mélange de chaux (généralement aérienne) et de sable. Le mortier de chaux est principalement utilisé pour la maçonnerie de murs en pierre, la rénovation de bâtiments anciens et les enduits intérieurs et extérieurs.

I.2.3.3 Mortier bâtard

C'est un mélange de chaux et de ciment. Ce mortier a les mêmes utilisations que le mortier de chaux, notamment pour les murs en pierre, la restauration de bâtiments anciens et les enduits intérieurs et extérieurs.

I.2.3.4 Mortier hydrofuge

Résistant à l'eau ce qui en fait l'allié idéal des espaces humides. Ainsi, on l'utilise dans les salles de bains ou en extérieur pour faire des joints de piscine.

I.2.3.5 Mortier-colle (Rapide)

Est un produit contenant du ciment et des polymères qui possède des propriétés adhésives et est utilisé pour coller des dalles de sol, des terrasses ou des carrelages.

I.2.3.6 Mortier réfractaire

Le mortier réfractaire est un mortier résistant aux températures élevées. Il supporte généralement des températures qui arrivent jusqu'à 900°C.

I.2.4 Utilisation de mortier

Le mortier est utilisé dans la construction pour lier toute sorte de matériaux dans le domaine de construction. Le mortier est appliqué entre les joints des matériaux de construction pour les durcir et les rendre plus solides. [1]

I.3 Liant

C'est un produit qui sert à agglomérer une masse solide, des particules solides sous forme de poudre ou de granulats. Les liants rentrent dans la fabrication des bétons, des mortiers et même des peintures, des colles, des mastics...etc. [2]

Les liants sont divisés en deux catégories : les liants minéraux et les liants organiques.

I.3.1 Liants minéraux

C'est un matériau très finement broyé mélangé à de l'eau. Ils produisent une pâte épaisse qui durcit progressivement pour donner une pierre artificielle.

Dans les travaux de construction, les liants minéraux sont mélangés avec l'eau et les granulats, pour devenir un mortier ou encore un béton. Il est connu que certains liants durcissent à l'air seulement et d'autres dans les milieux humides ou dans l'eau. Cette propriété nous permet de classer les liants minéraux en deux catégories :

a. Liants aériens

Durcissent uniquement à l'air et conservent leurs propriétés mécaniques (par exemple : chaux grasse, etc.)

b. Liants hydrauliques

Liants qui durcissent non seulement à l'air mais aussi à l'eau et conservent leurs propriétés mécaniques (par exemple ciment Portland ...). [3]

I.3.2 Liants organiques

Les liants organiques sont synthétisés par les sciences biologiques à partir de substances minérales ou de substances organiques existantes.

Leurs liaisons sont complexes et les carbones se trouvent principalement sous la liaison $\equiv C-H$. [3]

On distingue deux types de liants organiques :

a. Liants hydrocarbonés**b. Résines et polymères**

I.4 Ciment

I.4.1 Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. [4]

I.4.2 Etapes de fabrication de ciment

I.4.2.1 Extraction et concassage

Le calcaire est extrait par explosif dans des carrières généralement prêtes de la cimenterie. L'argile, plus meuble, est extraite par des engins mécaniques et transportée en cimenterie. Le concassage, fait sur les lieux de l'extraction, réduit la granulométrie des matériaux à environ 50 mm.

I.4.2.2 Préparation de CRU

Un mélange homogène d'argile et de calcaire est réalisé. Les proportions sont déterminées selon leurs compositions chimiques et sont toujours proche de 80 % de calcaire et 20% d'argile. Le mélange est broyé en une poudre de granulométrie inférieure à 200 microns. La poudre obtenue est homogénéisée par un mélangeur pneumatique ou mécanique. Le produit obtenu est appelé « le CRU ».

I.4.2.3 Cuisson

Réalisée dans des fours rotatifs à une température maximale d'environ 1450°C, la cuisson permet la transformation du CRU en Clinker (forme de grains de 0,5 à 4 cm de diamètre). A la sortie du four, le clinker est refroidi rapidement (à une température de 50 à 250°C) pour éviter une forte cristallisation.

I.4.2.4 Broyage

Le Clinker Portland est additionné de gypse de 5% et éventuellement d'ajouts cimentaires (Laitier, pouzzolane, calcaire, ...) et est broyé en poudre fine d'une granulométrie inférieure à 80 µm, c'est le ciment Portland.

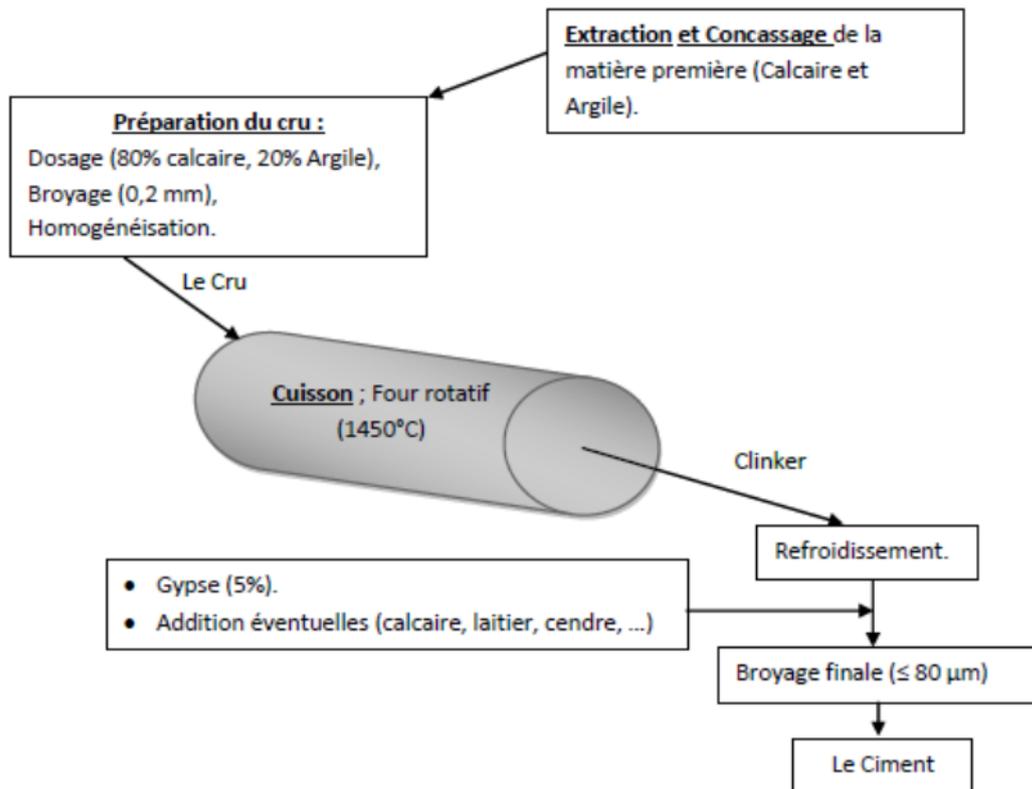


Figure I.1 : Schéma de fabrication de ciment. [5]

I.4.3 Constituants de ciment

I.4.3.1 Clinker

Le ciment Portland est principalement composé de clinker. Le clinker est le résultat de la cuisson à 1450°C d'un mélange de 80% de calcaire et de 20% d'argiles (le cru). Lorsque la température est élevée, le calcaire libère du dioxyde de carbone, tandis que la chaux, la silice et l'alumine se regroupent pour former :

- **Des silicates de calcium** : Il s'agit principalement d'alite, un silicate tricalcique appelé C_3S , qui représente 50 à 70 % de la masse du ciment. L'Alite se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez gros, d'environ 50 μm , et la bélite, silicate bicalcique noté C_2S
- représentant environ 10 à 20% du ciment et possède un aspect de grains légèrement arrondis et rayés.
- **Des aluminates** : la célite (aluminat tricalcique impure) noté **C3A** et la ferrite (phase alumino-ferritique) noté **C4AF** représentent chacune moins de 15% du ciment. 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.

I.4.3.2 Gypse

Lors du broyage du clinker, du sulfate de calcium (environ 5 %) est ajouté sous forme d'hémihydrate de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ou d'anhydrite (CaSO_4). Celui-ci agit comme un « régulateur de prise » et ralentit le clinker. 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. [6]

I.4.3.3 Les ajouts minéraux

Ces ajouts jouent les rôles suivants : Selon leur composition, il s'agit principalement de silice amorphe, qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux, qui se forme lors de l'hydratation des minéraux contenus dans le clinker. Le rapport entre le clinker et adjuvant hydraulique (ajout minéral) est déterminé en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minérale du clinker. [42]

I.4.4 Types de ciment

- 1) Le ciment Portland : CEM I : Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.
- 2) Le ciment Portland composé : CEM II/A ou B : Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires. Il est à noter que les ciments Portland et Portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs.
- 3) Le ciment de haut fourneau : CEM III/A ou B : Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker.
- 4) Le ciment de haut fourneau : CEM III/C : (anciennement ciment de laitier au clinker)
Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.
- 5) Le ciment composé : CEM V/A ou B : (anciennement ciment au laitier et aux cendres)
Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier. [4]

I.4.5 Hydratation de ciment

L'hydratation du ciment est un processus très complexe. En effet, les mécanismes d'hydratation des silicates (C₃S et C₂S) et des aluminates (C₃A et C₄AF) seront traités séparément pour arriver à traiter l'hydratation du ciment.

I.4.5.1 Hydratation des silicates

Les silicates tricalcique et bicalcique ne se différencient que par la stœchiométrie. Les hydrates formés par la dissolution de ces deux silicates sont le silicate de calcium hydraté, très soluble et communément appelé C-S-H, et la chaux éteinte (portlandite), appelée CH. Le rapport entre le nombre de moles de calcium sur celui de silice donne une indication sur cette stœchiométrie. Les C-S-H précipitent autour des grains de ciment et forment une couche qui ralentit la cinétique de dissolution des anhydres, qui devient contrôlée par la diffusion ionique au sein des hydrates. La portlandite précipite quant à elle dans la solution interstitielle. À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire, sans prendre en compte la stœchiométrie du système, comme suit :



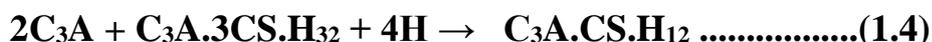
Les différences entre les produits d'hydratation des deux silicates se traduisent par une proportion plus faible de portlandite pour le C₂S et par une réaction beaucoup plus lente de ces mêmes silicates. L'hydratation plus lente du C₂S, après 28 jours, conduit à l'amélioration des résistances à long terme.

I.4.5.2 Hydratation des aluminates

La réaction entre l'aluminate et l'eau se produit très rapidement. Les cimentiers ajoutent du sulfate, sous forme de gypse, au clinker pour contrôler ces réactions. Comme le montre la réaction ci-dessous, l'aluminate réagit avec le sulfate de gypse pour former de l'ettringite (appelée AFt).



Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment donc une couche protectrice autour du grain. Lorsque la source de gypse s'est épuisée, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient donc instable et se dissout pour former du monosulfoaluminates de calcium hydraté (appelé AFm) selon la réaction suivante :



I.4.5.3 Processus de l'hydrations

Le processus de l'hydratation peut être divisé en cinq phases distinctes :

A. Période d'introduction

Dès que l'eau entre en contact avec le ciment, le C3S et le C3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et un gel de C-S-H autour des grains de ciment.

B. Période dormante

Durant cette période, des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente donc le pH de la solution en ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est donc faible. Cette période correspond au stade où le système cimentaire peut être contrôlé.

C. Période de prise

Cette période commence lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- dans la solution atteint une valeur critique. La conductivité électrique de la solution sera donc maximale.

Cette sursaturation provoque la précipitation de la portlandite. Il suit donc les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation d'hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H), conduisant à la formation de petits amas. Ces derniers se connectent entre eux progressivement jusqu'à ce qu'un premier chemin de grains connectés traverse le matériau ; le seuil de percolation qui correspond, à un début de prise mécanique est donc atteint.

D. Période de durcissement

La formation d'ettringite à partir de C_3A entraîne la décomposition du gypse. L'ettringite réagit avec les aluminates en excès pour former de monosulfo-aluminate, ce qui se traduit par un second pic thermique. La chaleur ainsi produite accélère l'hydratation des silicates.

E. Période de ralentissement

Les grains de ciment se couvrent d'une couche d'hydrates qui, en se compactant, ralentit la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle. L'hydratation se poursuit de plus en plus lentement. [43]

I.5 Sable

Le sable est défini comme une partie d'un granulat de pierre dont les dimensions des particules sont comprises entre 80 μm et 0,5 mm. Il s'agit d'une définition globale et ses limites varient selon la classification. On distingue deux catégories de sables en fonction de nombreux paramètres : les sables naturels et les sables artificiels.

I.5.1 Type de sable

I.5.1.1 Sables artificiels

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent se trouver en excédent pour la production recherchée (gravier ou gravillon).

I.5.1.2 Sables naturels

Ce sont des matériaux qui existent, dans certaines régions, en abondance dans la nature. Ils sont le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation.

I.5.1.2.1 Sable de mer

Les éléments de petite taille, peu affectés par l'action fluviale, parviennent à la mer et s'y trouvent au fond.

I.5.1.2.2 Sable de fluviale

On les trouve dans les fleuves et les rivières et éventuellement sur leurs côtes; ce sont des restes d'altération transportés par ces cours d'eau et déposés avant d'atteindre la mer. [7]

I.5.1.2.3 Sable de carrière

Il est extrait principalement à partir de carrières ou de gravières situées dans des régions où il y a une abondance de dépôt de sable

I.5.2 Classification de sable

Le but de la classification est de regrouper les matériaux en familles partageant des points communs, soit par leur origine, soit par leur comportement lié à une application particulière.

Le sable peut être classé en fonction de plusieurs paramètres. Une classification simplifiée a été introduite pour le sable traité selon deux critères : la granulométrie et la propreté.

I.5.2.1 Classification selon la granulométrie

On distingue trois catégories de sable

I.5.2.1.1 Sable grossier

Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m. Ils sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves.

I.5.2.1.2 Sable moyen

Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m. Ils sont compris entre 0,2 et 2mm.

I.5.2.1.3 Sable fin

Plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μm , sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.

I.5.2.2 Classification selon la propreté

La propreté du sable est une propriété importante, elle est évaluée par l'essai d'équivalence du sable ou la valeur du bleu de méthylène Afin de donner des limites pour chaque type de sable, le deuxième essai est plus précis, car il est réalisé sur la totalité du sable en écrétant toutefois le matériau à 6,3mm. Le résultat obtenu doit être exprimé en gramme de bleu. La valeur de bleu de méthylène est notée VBS.

Dans cette classification on distingue quatre catégories définies comme suit :

- $VBS \leq 0,2$: Sable propre.
- $0,2 \leq VBS \leq 0,5$: Sable légèrement pollué.
- $0,5 \leq VBS \leq 1$: Sable pollué.
- $VBS > 1$: Sable très pollué.[7]

I.5.3 Rôle de sable

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, ajoutant à cela, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). La bonne granulométrie du sable doit inclure des grains fins, moyen et gros. Les particules fines sont placées dans les espaces entre les particules plus grosses et remplissent les vides. Ils jouent un rôle important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Pour éviter les erreurs de dosage dues à l'augmentation du volume de sable humide, le dosage se fait souvent en poids plutôt qu'en volume. [8]

I.6 Eau de gâchage

L'eau de gâchage est de l'eau utilisée lors du mélange du béton, du mortier ou d'autres matériaux de construction. Elle est ajoutée pour hydrater les composants secs, comme le ciment et le sable, afin de former une pâte homogène. L'eau de gâchage doit être propre et de qualité appropriée pour garantir la résistance et la durabilité du matériaux.

I.7 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits dosés en faible quantité dans les bétons (Représentant moins de 5% de la masse de ciment). Ce sont souvent des composés organiques, spécialement formulés pour les applications béton. Leur objectif est d'améliorer certaines propriétés du

matériau. . C'est surtout la rhéologie du béton frais et la cinétique de prise et de durcissement que l'on peut espérer modifier directement. [9]

I.7.1 Différents types d'adjuvants

I.7.1.1 Accélérateurs de prise et durcissement

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment

I.7.1.2 Retardateurs de prise

Les retardateurs de prise ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise du ciment. Ils augmentent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide.

I.7.1.3 Entraîneurs d'air

Les entraîneurs d'air ont pour fonction d'entraîner la formation (dans le béton, pendant le malaxage) de microbulles d'air (de diamètre inférieur à 100 microns) uniformément réparties dans la masse.

I.7.1.4 Hydrofuges de masse

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer l'absorption capillaire des bétons durcis. Il en résulte une faible porosité et donc une faible perméabilité du béton.

I.7.1.5 Rétenteur d'eau

Les rétenteurs d'eau ont pour fonction de réguler l'évaporation de l'eau, de réduire la perte en eau et d'augmenter ainsi l'homogénéité et la stabilité du mélange. Ils diminuent la tendance au ressuage et les phénomènes de retrait.

I.7.1.6 Super plastifiants – hauts réducteurs d'eau

Ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange tout en conservant les performances mécaniques.

I.7.1.7 Plastifiants pour le béton

Ces adjuvants ont pour fonction principale de conduire, à même ouvrabilité, à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau d'un béton. Ils permettent aussi d'augmenter la plasticité du béton à teneur en eau constante et donc de faciliter sa mise en œuvre. [10]

Tableau I.1 : Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment. [10]

ADJUVANTS	DOSAGE(%)
Plastifiants	0,15 à 1,2
Super-plastifiants	0,6 à 2,5
Accélérateurs de prise	1 à 3
Accélérateurs de durcissent	0,8 à 2
Retardateurs de prise	0,2 à 0,8
Hydrofuges	0,5 à 2
Entraîneurs d'air	0,05 à 3
Rétenteurs d'eau	0,1 à 2

I.7.2 Rôle d'adjuvants

Les adjuvants jouent un rôle de plus en plus important dans la technologie du béton. Leur mécanisme d'action est très complexe, notamment pour les adjuvants de nouvelle génération. En effet, l'efficacité de l'adjuvant dépend de son dosage, du type de ciment, de l'ordre de son introduction dans le malaxeur et des conditions climatiques lors de la transformation du béton. [11]

I.8 Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux présentant une phase réactive et amorphe. Ils peuvent avoir des propriétés hydrauliques c'est-à-dire qu'ils s'hydratent de façon autonome au contact de l'eau. Ainsi, ils peuvent posséder des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'ajout réagit avec la chaux hydratée pour former des silicates de calcium hydraté (C-S-H), qui sont à l'origine des propriétés liantes de la matrice cimentaire. [12]

I.8.1 Classification d'ajouts minéraux

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. [13]

Tableau I.2 : Classification des ajouts selon leur réactivité. [14]

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		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

I.8.2 Propriétés des ajouts minéraux

I.8.2.1 Propriétés hydrauliques

Par réaction avec l'eau, ils forment des composés hydratés stables qui sont très peu solubles dans l'eau.

I.8.2.2 Propriétés pouzzolaniques

À température normale, en présence d'eau et en association avec la chaux, ils peuvent créer des composés hydratés stables (combinaison à T° ordinaire de la chaux avec de l'eau : formation lente des constituants analogues à ceux du clinker et composés hydratés),

I.8.2.3 Propriétés physique

Améliorant certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité . . .). [15]

I.8.3 Les différents types d'ajouts

I.8.3.1 Les ajouts minéraux inertes

I.8.3.1.1 Filler calcaire

Les fillers calcaires diffèrent les uns des autres selon leur origine, c'est-à-dire leur composition chimique et minéralogique, et le taux d'impuretés qu'ils peuvent contenir. D'autres paramètres tels que la finesse, la porosité, la qualité de surface, la dureté et la forme des particules affectent également leur diversité. Plusieurs chercheurs ont montré que l'effet des fillers calcaire peuvent jouer un rôle fluidifiant. Leur capacité de remplissage des vides, chasse

les particules d'eau et donc réduit la quantité d'eau nécessaire pour la fluidification des mélanges. [16]

I.8.3.1.2 La poussière

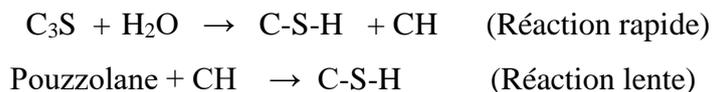
La poussière est une substance composée de particules fines, récupérée à la sortie du four lors de sa rencontre avec la fumée. Sa finesse varie de 7000 et 9000cm/g. [17]

I.8.3.2 Les ajouts minéraux actifs

I.8.3.2.1 Les pouzzolanes

A. Définitions

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés économiques. Elles sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes.



Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers, ils participent:

- au renforcement de la résistance aux attaques chimiques,
- au renforcement de l'imperméabilité et de la durabilité,
- à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait au séchage.
- à la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. [18]

B. Matériaux pouzzolaniques

Grâce au développement de l'activité pouzzolanique, les matériaux pouzzolaniques jouent un rôle dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques des bétons. Ainsi, grâce à ces bénéfices, il est possible de convertir une grande quantité de déchets industriels en matériaux de construction durables et abordables.

Selon la norme ASTM C618, un matériau est considéré comme pouzzolanique si :

- ❖ Sa composition chimique : $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$
- ❖ Son indice d'activité i est : $0,67 < i < 1$

Ces matériaux ont une réactivité pouzzolanique en fonction de leur teneur en matière amorphe et de leur solubilité. Ils sont incorporés dans le béton lors de sa fabrication pour améliorer

certaines de ses propriétés (ouvrabilité, consistance) ou pour lui conférer des propriétés particulières : compacité, durabilité, tenue à des environnements agressifs... [47]

L'indice d'activité pouzzolanique est un paramètre qui décrit quantitativement le degré de réaction dans le temps ou le taux de réaction entre un matériau pouzzolanique et la portlandite Ca(OH)_2 en présence d'eau. L'indice d'activité est déterminé à travers des essais mécaniques de compression sur des éprouvettes de mortier (4cmx4cmx16cm) . Il est donné par le rapport entre la résistance à la compression d'un mortier avec p% d'ajout d'addition et la résistance à la compression d'un mortier témoin avec 100% de ciment.

L'indice d'activité de résistance (IAR) est le rapport entre la résistance à la compression du ciment confectionné avec ajout et celle du ciment témoin (sans ajout).

$$\text{IAR} = \text{A/B} \times 100$$

Où :

A: est la résistance à la compression du mortier avec ajout (MPa)

B: est la résistance à la compression du mortier témoin (sans ajout) (MPa).

C. Types de pouzzolane

❖ Pouzzolane naturelle

Est un Produit d'origine volcanique, constitué essentiellement de silice, d'oxyde d'aluminium et d'oxyde de fer, aux propriétés pouzzolaniques naturelles. Il peut être d'origine volcanique : Verre volcanique, pierre ponce, rhyolite, tuf, zéolite, ou dépôt originel : Terre de diatomées, [14]



Figure I.2 : Pouzzolane naturelle.

❖ Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue, soit des résidus de fabrication industrielle tel que; les mâchefers, cendre de bois ou d'houille, soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argiles pures à des températures modérées . [17]



Figure I.3 : Pouzzolane artificielle. [19]

A. Effet de la pouzzolane [20]

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes:

- **A l'état frais**

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation. Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

- **A l'état durci**

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.

- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

I.8.3.2.2 Le laitier de haut fourneau [21]

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit des usines métallurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il subit un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir en présence de l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. Cependant, son utilisation a rencontré des difficultés à cause des faibles résistances engendrées. Progressivement, cette inquiétude a disparu grâce à une optimisation entre les propriétés chimiques, le taux de verre et l'activité, ce qui a rendu le ciment au laitier très répandu aujourd'hui. Son utilisation en cimenterie s'est étendue à travers le monde à cause de ses performances mécaniques, de son économie et de sa valeur écologique.

Tableau I.3 : Composition chimique type de laitiers de haut fourneau . [14]

OXYDES	Laitier français	Laitier nord U S A	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4%	0.3 à 20	2.0
MgO	6%	3 à 12	4.7
S	1.5%		0.15

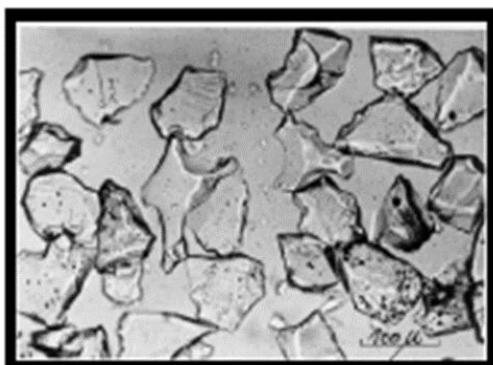


Figure I.4 : Laitier de haut de fourneau. [17]

I.8.3.2.3 Les fumées de silice [22]

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages de ferrosilicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C. La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO, intermédiaire réactionnel du procédé de carboréduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation.

La fumée de silice est initialement produite sous forme de poudre grise, non-densifiée et principalement composée de particules ultrafines. Ces particules contiennent au moins 85 à 98% de silice SiO₂ amorphe et se présentent sous la forme de microsphères vitreuses dont le diamètre moyen se situe entre 0,1 et 0,2 µm. Grâce à sa très grande finesse, sa forte teneur en silice et sa structure essentiellement vitreuse, la fumée de silice constitue un produit hautement pouzzolanique, fréquemment utilisé pour la fabrication des bétons à ultra hautes performances.

Tableau I.4 : Composition chimiques de la fumée de silice. [14]

Composés	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	blanche
SiO ₂	93.7	87.3	90
Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
K ₂ O	0.5	0.6	1.3
Pertes au feu	2.9	0.6	1.2



Figure I.5 : Fumée de silice sous forme de poudre. [23]

I.8.4 Avantages d'utilisation des ajouts

L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques

I.8.4.1 Avantages techniques

Dans un premier temps, l'ajout de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de diminuer le besoin d'eau à une consistance spécifique (sauf pour les matériaux à très grande surface active, comme les fumées de silice). De plus, les ajouts de ciment améliorent généralement les caractéristiques mécaniques, l'imperméabilité et la résistance aux attaques chimiques. Enfin, grâce à leur capacité d'hydratation réduite et à une plus grande capacité d'allongement en traction, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration thermique en augmentant la capacité d'ajout

I.8.4.2 Avantages économique

En général, le ciment Portland est l'élément le plus coûteux d'un mélange de béton, car il est un matériau énergétiquement élevé. La majorité des matériaux qui peuvent substituer le ciment dans le béton sont des sous-produits, ce qui signifie qu'ils nécessitent moins d'énergie, voire aucune, et sont bien moins coûteux que le ciment Portland classique. Cependant, la distance entre la source des ajouts cimentaires et l'utilisateur final, ainsi que le coût élevé du transport qui en découle, peuvent faire défaut à leurs avantages économiques potentiels. De plus, le manque de stockage abordable peut parfois entraver leur utilisation sur certains marchés.

I.8.4.3 Avantages écologique

En produisant une tonne de ciment Portland, on libère presque la même quantité de gaz carbonique dans l'atmosphère. De plus, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit les émissions de CO₂ de manière générale. L'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne nécessite pas un traitement énergétiquement élevé. [24]

I.9 verre

I.9.1 Historique du verre

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'homme du préhistorique l'utilisait, pour la première fois, il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne (verre naturel d'origine éruptive). Après sa découverte, il s'est familiarisé avec ce

matériaux et a promotionné son utilisation dans tous les domaines, pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux.

Les premiers verres fabriqués par l'homme sont originaires de Mésopotamie, de Syrie puis d'Égypte. Des potiers Egyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait par accident, en cuisant leurs poteries. Le premier verre était un émail, mélange de sable et d'autres minéraux fondus sur la surface d'objets en céramique. Il y a trois mille ans, des artisans découvrirent que si l'émail avait une épaisseur suffisante, il pouvait servir seul à fabriquer des objets sans pour autant qu'il soit supporté par la terre cuite. Ils ne sont pas encore transparents ou translucides mais opaques, de couleur verte ou bleue. Le verre transparent a été découvert à Sidon (Phénicie), probablement à cause de la pureté des sables de la région. [26]

I.9.2 Définition du verre

Le mot verre peut prendre des significations variées. Si dans le langage courant ce terme sert à désigner un matériau fragile et transparent. Dans le langage scientifique, le terme "verre" a une portée très vaste, alors qu'il est très difficile de le définir. [27]

Plusieurs définitions ont été données au verre, la première a été établie par Tamman : « Les matériaux solides et non cristallisés se trouvent à l'état vitreux ». Cependant, J. Zarzycki, a proposé la définition suivante : « Le verre est un solide non cristallin présentant un phénomène de transition vitreuse. L'état physique correspondant est l'état vitreux. ». Cette définition est plus technique ; dans le langage courant, le verre signifie un matériau fragile et transparent bien connu depuis longtemps. [28]

I.9.3 Structure des verres

Les verres sont des matériaux solides non cristallins : ils sont dans un état appelé amorphe. Ce sont, le plus souvent, des composés qui, à l'état liquide, à une température proche de la température de solidification, possèdent une viscosité importante : c'est le cas des silicates qui donnent les verres utilisés dans la vie courante. Les verres ne possèdent pas de température de solidification ou de fusion nette contrairement aux solides cristallisés.

A l'état solide, la forme stable est l'état cristallin, caractérisé par une répartition périodique des atomes. Lors du refroidissement d'un verre à partir de l'état liquide, sa viscosité qui traduit la difficulté (à l'échelle atomique) des atomes à se déplacer les uns par rapport aux autres, diminue la mobilité des atomes. La solidification a lieu avant que les atomes aient atteint la position qu'ils auraient dans le solide cristallisé

L'état amorphe, obtenu, dans le cas des verres, par refroidissement d'un liquide, peut être obtenu par diverses autres méthodes : irradiation, broyage poussé, bombardement ionique, dépôt en phase vapeur... [29]

I.9.4 Propriétés du verre

I.9.4.1 Propriétés physiques

1. **La transparence** : mais il peut être transparent ou opaque.
2. **La densité** : elle dépend des composants du verre ; elle est d'environ 2,5.
3. **La résistance et l'élasticité** : Le verre est sujet à la cassure en raison de sa flexion et de sa résistance au choc. Le verre présente une grande résistance à la compression : une pression de 10 tonnes est nécessaire pour briser un centimètre cube de verre.
4. **L'imperméabilité** : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène.

I.9.4.2 Propriétés thermiques

1. **La dilatation** : le verre est un mauvais conducteur de chaleur. Il se brise en cas de changement de température brusque, car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation thermique est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). Ce coefficient varie selon la composition du verre.
2. **La conductivité** : Le verre est considéré comme un matériau hybride, ce qui signifie qu'il n'est ni un bon conducteur ni un bon isolant. Il est utilisé en tant qu'isolant électrique. Il offre également un excellent isolant acoustique en fonction de l'épaisseur de la feuille. Ce n'est pas le cas à température élevée, car il devient conducteur dès 250°C.

I.9.4.3 Propriétés chimiques

Pour le verre, la résistance chimique est définie comme la résistance à la décomposition en solutions aqueuses. Cette grandeur est généralement rapportée à l'unité de surface de matière par unité de temps.

Dans les verres de silicates classiques contenant des oxydes alcalins, l'ion alcalin est très mobile. La surface d'un verre, laissé au contact de l'air, s'enrichit progressivement en alcalin qui réagit avec le CO₂ ambiant pour donner un carbonate soluble.

- **L'action de l'eau** : l'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt 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** : lorsqu'ils sont exposés aux ultraviolets, certains verres se

colorent ou se décolorent.

Les verres ont une durabilité chimique supérieure à celle de la plupart des métaux et polymères. Cependant, il est possible que les verres non silicatés se dissolvent dans des solutions aqueuses, en particulier dans des solutions à faible pH. [30]

I.9.4.4 Propriétés mécaniques

1. **La dureté :** Dans le domaine de la technologie du verre, le terme de dureté prend différentes significations. Il est bien connu que le verre avec un faible coefficient de dilatation est appelé dur. La dureté est définie comme étant la résistance d'un corps à s'opposer à la pénétration d'un autre corps plus dur. Les essais de dureté sont un excellent moyen de mener des études sur le comportement élastoplastique des verres, de comprendre les micro-mécanismes de la déformation plastique, ainsi que de développer une compréhension de la réponse des verres. Effectivement, l'utilisation de l'essai de dureté est simple, il est couramment employé dans le domaine des verres.
2. **L'élasticité :** Lorsqu'un corps solide reçoit une force quelconque, il se déforme. S'il n'y a plus de déformation après l'annulation de la force, le corps est élastique. La déformation observée est liée à la contrainte appliquée. Le verre possède un comportement élastique alors que les métaux par exemple présentent un comportement élasto-plastique.
3. **La ténacité :** La ténacité à la rupture permet de caractériser la capacité d'un matériau à résister à l'initiation et à la propagation des fissures. Cette grandeur permet d'évaluer la taille des défauts critiques. En d'autres termes, il s'agit de la taille maximale que peut atteindre un défaut qui peut se développer. [31]

I.9.5 Les types du verre

I.9.5.1 verre recuit

Le verre recuit ou float est un verre qui a été refroidi progressivement à partir d'une température élevée pendant la fabrication pour minimiser les contraintes résiduelles, ce qui permet de couper le verre en le marquant et en l'accrochant. C'est le type de verre flat le plus couramment utilisé. Ce verre est l'un des types de verre les plus faibles et a un potentiel significatif de rupture lorsqu'il est soumis à des charges qui n'ont pas été conçues pour ou lorsqu'elles sont mal installées. [32]

I.9.5.2 verre feuilleté

Le verre feuilleté, constitué d'au moins deux plis de verre unis à l'aide d'un intercalaire en polymère, souvent du Polybutyral vinylique (PVB), est utilisé comme vitrage dans plusieurs

domaines tels que l'automobile ou le bâtiment en raison de ses bonnes propriétés optiques, mécaniques et acoustiques. [33]

I.9.5.3 verre isolant

Consiste en deux lites ou plus de verre séparées par un espace hermétiquement fermé pour l'isolation thermique et le contrôle de la condensation. L'espace aérien entre les lites de verre peut être rempli pendant le processus de fabrication avec de l'air sec ou un gaz à faible conductivité, tel que l'hexafluorure de soufre ou l'argon. La plupart des fenêtres commerciales, des murs rideaux et des puits de lumière contiennent du verre isolant.

I.9.5.4 verre métallique

Il s'agit de fils d'acier roulés dans des feuilles de verre. Un treillis métallique est inséré lors de la fabrication du verre plat, permettant au verre d'adhérer lorsqu'il est fissuré. Il peut être qualifié de verre de sécurité pour certaines applications. [34]

I.9.6 L'utilisation de verre en génie civil

I.9.6.1 L'utilisation de verre dans le ciment

Quand il est très finement concassé, voire en poudre, le verre développe des propriétés cimentaires. Dans cette optique, il pourrait servir à remplacer une partie du ciment. Les déchets de verre sont employés, tout comme d'autres matériaux, dans la production de ciment Portland. On utilise donc les verres de récupération comme composant principal du clinker, comme adjuvant du ciment ou même comme granulats du béton. Le verre est encore utilisé expérimentalement dans le ciment Portland. Il est nécessaire de nettoyer ces débris de verre avant de les introduire dans le broyeur à verre. [35]

I.9.6.2 L'utilisation de verre dans le bâtiment

Les usages principaux du verre dans le bâtiment sont :

- **Terrezo ou granito** : Il s'agit d'un mélange similaire au béton traditionnel, mais avec la différence majeure de remplacer le sable et le gravier par des pierres naturelles et des éléments concassés (verre, miroir, granit, métal). Le produit est ensuite enrobé d'un liant et est utilisé pour les planchers et les murs.
- **La brique de verre** : Aussi connu sous le nom de pavé en verre, il s'agit d'un matériau de construction en verre. Cette brique peut être transparente ou translucide. Elle peut avoir des formes carrées, rectangulaires et circulaires. On utilise des briques de verre pour la construction de murs non porteurs et de panneaux à portée horizontale. Elles

sont utilisées pour permettre à la lumière de traverser un mur. [36]

I.10 verre trempé

I.10.1 L'historique

François Barthelemy Alfred Royer de la Bastié (1830-1901), de Paris, en France, est le premier à avoir mis au point une méthode de trempe du verre par trempe du verre presque fondu dans un bain chauffé d'huile ou de graisse en 1874, méthode brevetée en Angleterre le 12 août. 1874, numéro de brevet 2783. Le verre trempé est parfois connu sous le nom de verre Bastie d'après de la Bastié. En 1877, l'allemand Friedrich Siemens a développé un processus différent, parfois appelé verre comprimé ou verre Siemens, produisant un verre trempé plus fort que le processus Bastié en pressant le verre dans des moules froids. Le chimiste Rudolph A. Seiden, né en 1900, détient le premier brevet sur l'ensemble du processus de fabrication du verre trempé.

Les effets du verre "trempé" sont connus depuis des siècles. Vers 1660, le prince Rupert du Rhin porte à l'attention du roi Charles II la découverte de ce qui est maintenant connu sous le nom de "Prince Rupert's Drops". Ce sont des morceaux de verre en forme de goutte qui sont produits en laissant tomber une goutte de verre fondu dans un seau d'eau, ce qui le refroidit rapidement. Ils peuvent résister à un coup de marteau sur l'extrémité bulbeuse sans se casser, mais les gouttes se désintègreront de manière explosive en poudre si l'extrémité arrière est même légèrement endommagée. [37]

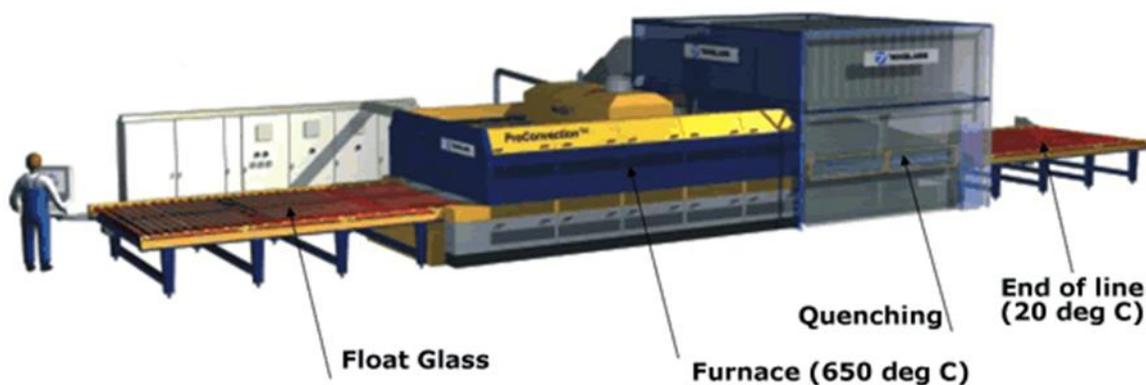
I.10.2 Définitions de verre trempé

Le verre trempé est une sorte de verre de sécurité doué d'une résistance plus élevée en raison de ses contraintes résiduelles. Il est chauffé à 620°C -675°C refroidi rapidement par des jets de froid. Cela provoque surface du verre à solidifier avant la partie intérieure. Comme l'intérieur refroidit, il essaie de rétrécir, mais l'extérieur solidifié La surface résiste à cette force et passe en compression et l'intérieur entre tension. La distribution de température est habituellement parabolique, avec une surface plus froide et une chaleur plus chaude. [38]

I.10.3 Fabrication de verre trempé

Le verre trempé commence sa vie comme verre flotté. Le verre flotté, lorsqu'il est brisé, se brise en fleuret comme des morceaux et peut être nuisible, il est donc inadapté à certaines applications. Avant de subir le processus de durcissement, les pièces en verre doivent être coupées à la taille. Tout usinage supplémentaire doit être effectué avant que le verre ne soit trempé car il se briserait s'il était coupé à l'état trempé.

Dans le processus de durcissement, les surfaces du verre sont chauffées dans un four. Les températures recommandées varient, mais le verre atteint des températures de plus de 600 °C. Le verre chaud est ensuite refroidi rapidement par un jet d'air pendant une période de 3 à 10 secondes. En conséquence, les surfaces se rétrécissent et (au début) des contraintes de traction se développent sur les surfaces. Lorsque la majeure partie du verre commence à refroidir, il se contracte. Les surfaces déjà solidifiées du verre sont alors forcées de se contracter, et par conséquent, elles développent des contraintes résiduelles de surface de compression, tandis que la zone intérieure développe des contraintes de traction compensatrices. La zone de tension dans le noyau du verre occupe environ 60% de la section transversale du verre. Les contraintes de surface compressives améliorent la résistance du verre de la même manière que dans d'autres matériaux. Après le processus, le verre trempé a une plus grande résistance aux contraintes thermiques et aux chocs thermiques et a amélioré la résistance à la flexion et à la traction. Plus le coefficient de dilatation thermique du verre est élevé et plus sa conductivité thermique est faible, plus le niveau de contraintes résiduelles développées est élevé et plus le verre devient fort. Le durcissement thermique prend un temps relativement court (minutes) et peut être appliqué à la plupart des verres. En raison de la grande quantité d'énergie stockée dans les contraintes résiduelles, le verre trempé se brise en un grand nombre de pièces lorsqu'il est brisé. Les morceaux cassés ne sont pas aussi tranchants et dangereux que ceux du verre ordinaire.



FigureI.6 : fabrication de verre trempé. [39]

I.10.4 Propriétés de verre trempé

I.10.4.1 Propriétés physiques

Les variations de stress du verre sont clairement visibles lorsqu'elles sont photographiées à travers un filtre centralisant. Le verre trempé est physiquement et thermiquement plus fort que le verre régulier. La plus grande contraction du La couche interne pendant la fabrication induit une compression les contraintes à la surface du verre équilibrées par la traction les contraintes dans le corps du verre.

I.10.4.2 Propriétés chimiques

Le verre renforcé chimiquement est un type de verre qui a Résistance accrue grâce à un produit chimique de postproduction Lorsqu'il est brisé, il se brise encore en éclats semblables au verre flotté. Pour cette raison, il n'est pas considéré comme un verre de sécurité et doit être feuilleté si le verre est nécessaire. Cependant, le verre renforcé chimiquement est généralement six à huit fois la résistance du verre flotté.

I.10.4.3 Propriétés mécanique

Le verre trempé traité a des propriétés mécaniques favorables pour une utilisation globale, y compris une bonne résistance à l'abrasion, de bonnes caractéristiques de solidité et une résistance élevée au roulement. [40]

I.10.5 Les avantage de verre trempé

- **Anti-rayures** : Le verre trempé est insensible à l'usure quotidienne. Il ne s'abîme pas facilement et conserve son éclat et sa finition pendant des années.
- **Résistant à la chaleur** : le verre trempé est fabriqué à l'aide d'un tempérage thermique et peut supporter des températures chaudes et humides inconfortables.
- **La solidité et la sécurité** : Comme il est beaucoup moins susceptible de se casser, de nombreux gratte-ciel, gratte-ciel, cloisons vitrées autonomes, etc., sont construits en utilisant ce type de verre. En outre, même si elle échoue en raison d'une exposition à des conditions très difficiles, elle ne se brise jamais. Lorsque le verre standard se brise en éclats tranchants, il peut gravement blesser les personnes se trouvant à proximité. Le verre trempé développe d'innombrables fissures et se brise en morceaux émoussés qui sont incapables de causer des blessures graves. Cela rend ce verre très sûr pour une utilisation, même autour des enfants.

I.10.6 Les applications du verre trempé

- Ce verre est de préférence installé dans les zones qui subissent de fortes charges de vent, de neige et thermiques.
- En raison de sa résistance structurelle, il est utilisé dans les applications architecturales telles que les portes vitrées, les cloisons et les fenêtres sur le côté des bâtiments.
- En raison de sa résistance structurelle, il est utilisé dans les applications architecturales telles que les portes vitrées, les cloisons et les fenêtres sur le côté des bâtiments.
- le verre trempé est également utilisé efficacement dans les lavabos, les auvents et même vos écrans mobiles. [41]

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique sur les mortiers, en abordant le sable, le ciment, les adjuvants, et les différents types d'ajouts minéraux. Nous avons également donné un aperçu général sur le verre et le verre trempé, incluant leurs définitions, structures, propriétés et applications.

Chapitre II : Analyse des matériaux utilisés

II.1 Introduction

Dans le domaine de construction, la sélection et l'utilisation appropriées des matériaux portent une importance essentielle. L'analyse des matériaux de construction est un pilier essentiel dans la conception et la réalisation de tout ouvrage du génie civil.

Ce chapitre est consacré à examiner les matières premières utilisées. Leurs caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques, car leur caractérisation sont nécessaires pour notre étude pour pouvoir bien interpréter les résultats des essais à réaliser sur les échantillons confectionnés.

II.2 Les matériaux utilisés

Avant d'entamer les analyses, il est nécessaire de définir l'origine des matériaux utilisés (ciment, sable et verre trempé).

II.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé pour notre étude est le CEM II/A-L 42,5 N de la société des ciments d'AIN EL KEBIRA. Les caractéristiques physiques et chimiques sont données dans **l'annexe A**.

II.2.2 Le sable

Nous avons utilisé un sable de carrière 0/5 mm. Il provient de la carrière **AIN ROU**, wilaya de **SETIF**.

II.2.3 Eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau de robinet au "laboratoire Béton" de l'université de Bejaia.

II.2.4 Verre trempé

Le verre trempé est récupéré d'un atelier à Tichy, wilaya de Béjaia.

II.3. Analyse chimique et minéralogique des matériaux

II.3.1 Ciment

Le Tableau **II.1** et **II.2** résume les caractéristiques de ciment de CEM II/A-L 42,5 N.

Tableau II.1 : Caractéristiques minéralogiques du ciment CEM II/A-L 42,5 N.

Compositions minéralogiques												
Composé	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	P.A.F	CAO _{libre}	R.Insoluble
Exigence						≤ 4				≤ 0.1		
Moyenne (%)	21.15	4.80	4.16	62.63	1.21	2.15	0.33	0.13	0.02	3.69	1.06	2.12

Tableau II.2 : Composition potentielle du clinker.

COMPOSITION POTENTIELLE DU CLINKER (BOGUE)		
C ₃ S	%	55.46
C ₂ S	%	18.85
C ₃ A	%	8.56
C ₄ AF	%	12.43

II.3.2 Verre trempé

Les étapes à suivre pour que la poudre de verre trempé soit prête à être utilisée dans la fabrication du mortier sont les suivantes :

1. Nous avons utilisé un panneau en verre trempé de forme rectangulaire.
2. Nous avons cassé ce panneau avec un marteau, et comme vous le savez, ce panneau se brise après plusieurs coups.
3. Ce verre trempé nous permet d'obtenir des petites pierres après ce processus de concassage.
4. Broyage : pour l'obtention d'une poudre, ces petites pierres de verre trempé ont subi un broyage.
5. Une quantité de cette poudre obtenue a été tamisée dans un tamis de diamètre 0,5mm afin d'obtenir une poudre inférieure à 0,5 mm. Ensuite broyée encore pour obtenir une poudre inférieure à 0,08 mm .
6. Après avoir effectué toutes les étapes précédentes, notre matière première est prête à l'emploi. La Figure II.1 montre les étapes à suivre pour obtenir la poudre du verre trempé

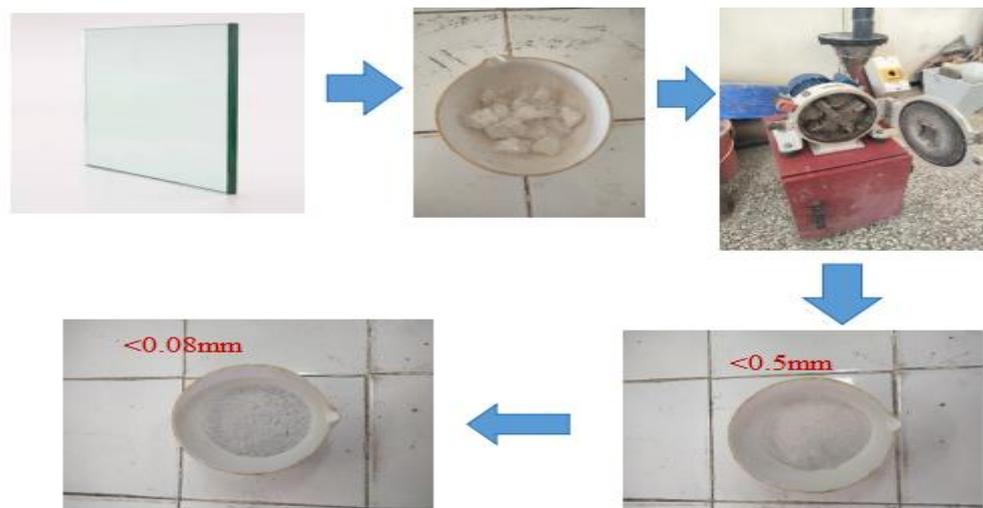


Figure II.1 : Etapes d'obtention de la poudre de verre.

Le verre trempé est principalement composé de silice avec des additions de carbonates de sodium et de calcium. En plus de silice, le verre trempé peut contenir d'autres oxydes métalliques tels que l'oxyde d'aluminium, l'oxyde de magnésium et l'oxyde de potassium pour améliorer ses propriétés physiques et chimiques.

II.3.2.1 L'analyse par diffraction des rayons X (DRX)

➤ Définition

La diffractométrie de rayons X (sur poudre) est une méthode d'analyse physico-chimique qualitative et quantitative. Cette technique permet de déterminer la nature de chaque phase cristalline au sein d'un échantillon mais aussi de remonter à la structure du système analysé (paramètres de maille, positions atomique, ...).

➤ Principe de l'analyse

La diffractométrie de rayons X est une technique d'analyse basée sur la diffraction des rayons X par la matière. La méthode générale consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à analyser l'intensité des rayons X qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace. Les rayons X diffusés interfèrent entre eux, l'intensité présente donc des maxima dans certaines directions, on parle de phénomène de « diffraction ». On enregistre l'intensité détectée en fonction de l'angle de déviation 2θ du faisceau. [43]

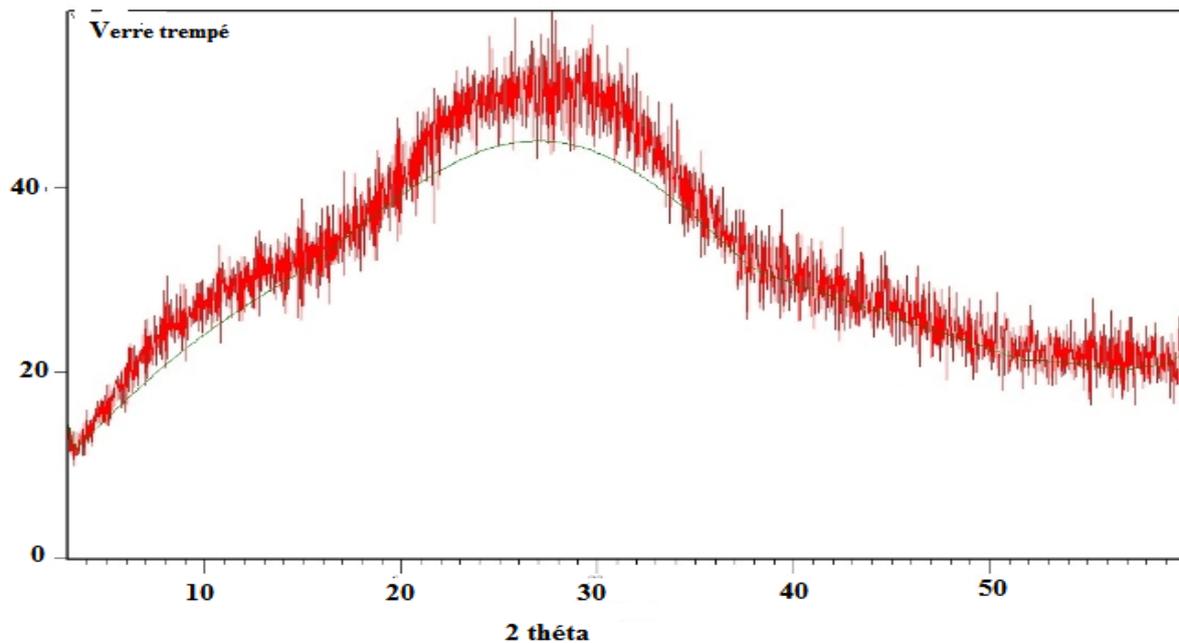


Figure II.2 Diffractogramme de rayons X de la poudre de verre

La Figure II.2, présente la diffraction de rayons X de la poudre de verre trempé. Nous pouvons conclure de l'allure du graphe que la poudre de verre est totalement amorphe, ce qui se justifie ici par la présence du dôme compris entre 20 et 40°.

II.3.2.2 L'analyse par spectrométrie de fluorescence (XRF)

➤ Définition

La fluorescence X est une technique analytique qui peut être utilisée pour déterminer la composition chimique d'une grande variété de types d'échantillons, y compris les solides, les liquides, les boues et les poudres libres. La fluorescence X est également utilisée pour déterminer l'épaisseur et la composition des couches et des revêtements.

➤ Principe de l'analyse

La fluorescence X est une méthode d'émission atomique, similaire à la spectroscopie d'émission optique (OES), à la spectrométrie d'émission plasma (ICP) et à l'analyse par activation neutronique (spectroscopie gamma). Ces méthodes mesurent la longueur d'onde et l'intensité de la lumière (les rayons X dans ce cas) émise par les atomes énergisés de l'échantillon. [44]

Les résultats de la FRX sont présentés dans le tableau II.3.

Tableau II.3 Résultats de la FRX

LE : Légers	(%)	59.91
Si : Silicon	(%)	33.04 +/- 0.07
Ca : Calcium	(%)	5.64 +/- 0.01
Al : Aluminium	(%)	0.26 +/- 0.02
Fe : Iron	(%)	0.37 +/- 0.02
K : Potassium	(%)	0.05
P : Phosphorus	(%)	0.04
Sr : Strontium	(%)	0.01
Zr : Zirconium	(%)	0.01
Mg : Magnesium	(%)	0.66 +/- 0.1

II.4 Analyse physique des matériaux

II.4.1 Le sable

II.4.1.1 Essai granulométrique (NF P 18-560)

➤ Définition

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids de particules d'un matériau suivant leurs dimensions.

➤ But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

➤ Principes de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau analysé est placé dans le tamis supérieur et le classement des grains s'obtient par la vibration de l'ensemble de la colonne des tamis.

➤ Matériels nécessaires

- Une machine à tamiser.
- Une série de tamis.

- Un couvercle qui évite la perte de matériau pendant le tamisage et un fond pour recueillir le dernier tamisât.
- Une balance.

➤ Mode opératoire

- Prendre une quantité représentative d'un échantillon de sol sec (**Figure II.2**)
- Choisir une série de tamis d'ouvertures décroissantes de haut vers le bas tel que le tamis supérieur de cette colonne laisse passer les plus grosses particules .
- Disposer sous le dernier tamis un fond destiné à recevoir les particules dont les dimensions sont supérieures à la plus petite maille de la colonne.
- Le matériau est versé en haut de la colonne.
- Un couvercle ferme l'ensemble et permet d'éviter toute perte durant le tamisage.
- Allumer la tamiseuse (Figure II.3) qui va effectuer les vibrations pendant 15 min puis l'arrêter en suite peser le refus jusqu'au dernier tamis.
- Considérer que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas plus de 1% entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse.
- Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé, soit R1 la masse de ce refus.
- Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent, soit R2 la masse du deuxième refus.
- Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés aux différents niveaux de la colonne de tamis.

➤ Préparation de l'échantillon

Selon la norme [NFP 18-560], la prise de l'échantillon se fait par quartage, le poids du matériau utilisé est de telle sorte que : $P \geq 0.2 D$.

Sachant que :

P : poids l'échantillon en Kg

D : diamètre du plus grand granulat en mm.

Ça veut dire : sable 0/5 $P \geq 0.2*(5) = 1 \text{ Kg}$.

le poids utilisé après le séchage $P = 3000\text{g}$.



Figure II.3 : Le sable utilisé.



Figure II.4 : L'opération de tamisage.

➤ **Résultats obtenus**

Les résultats obtenus d'analyse granulométrique sont donnés dans le Tableau II.4

Tableau II.4 : Analyse granulométrique sable 0/5.

Poids de l'échantillon (g)	Ouvertures des tamis (mm)	Poids des refus (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
3000	5	6	6	0.2	99.8
	2.5	536	542	18.06	81.94
	1.25	776	1318	43.93	56.07
	0.63	524	1842	61.4	38.6
	0.315	334	2176	72.53	27.47
	0.16	302	2478	82.6	17.4
	0.08	222	2700	90	10
	fond	284	2984	99.46	0.54

Avec : Refus : le poids de matériau retenu par un tamis.

Tamisât : le poids du matériau passant à travers un tamis.

Refus cumulés : Σ cumulée de chaque tamis.

La Figure II.5 Présente la courbe granulométrique du sable 0/5

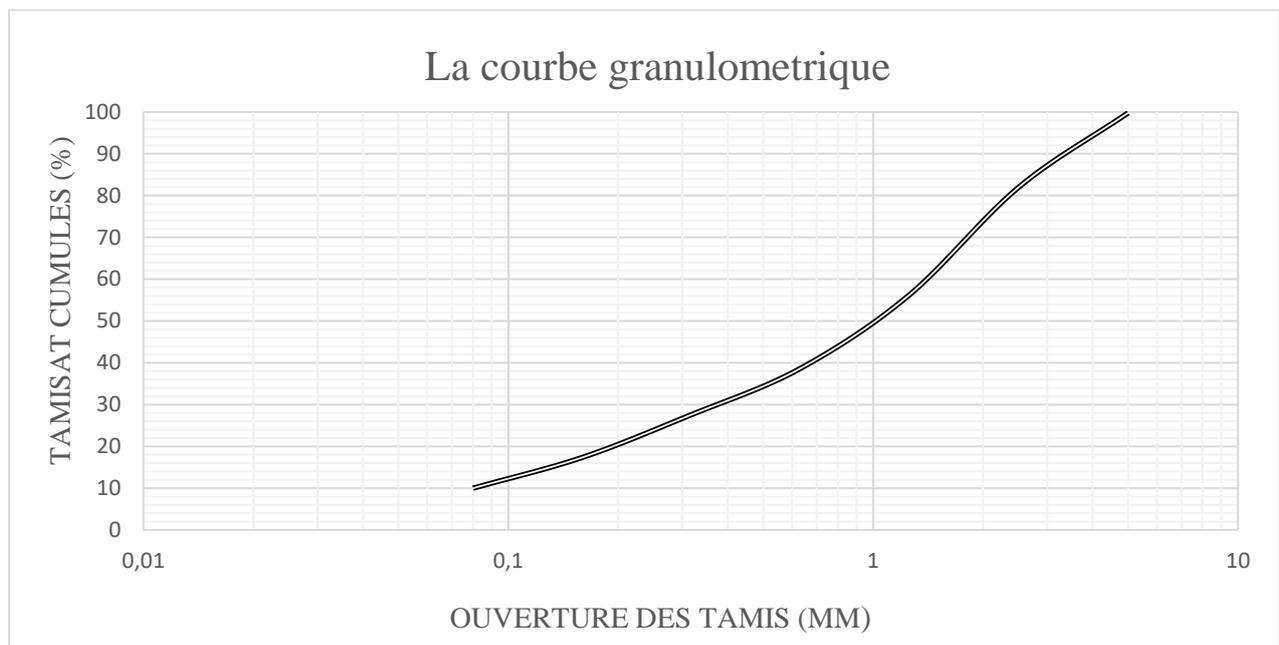


Figure II.5 : La courbe granulométrique de sable utilisé.

➤ **Module de finesse de sable du sable (NF P 18-540)**

Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 – 5) mm

$$MF = (82.6 + 72.53 + 61.4 + 43.93 + 18.06 + 0.2) / 100$$

$$MF = 2.79$$

➤ **Interprétation des résultats**

MF=2.79 ∈ [2.2-2.8] : le module de finesse correspond donc à un sable préférentiel, il donnera un mortier résistant avec une bonne maniabilité.

II.4.1.2 Détermination de la teneur en eau pondéral (NF P 94-050)

➤ **Définition**

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans un échantillon du matériau comparativement au poids du même matériau sec. On définit la teneur en eau comme le poids d'eau (W) contenu par unité de poids de matériau sec. [45]

➤ But de l'essai

Détermination de la teneur en eau d'un sable qui se définit par le poids de l'eau contenu dont le poids des vides étant négligeable.

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste de placer une quantité déterminée du matériau humide à tester dans un récipient métallique, ensuite peser l'ensemble et l'introduire dans une étuve pendant 24 heures sous une température de 105°C. Après dessiccation, on pèse l'ensemble une seconde fois pour obtenir les masses humides et sèches de l'échantillon et calculer la **W**.

➤ Matériels nécessaire

- Étuve.
- Récipient métallique.
- Balance.

➤ Mode opératoire

- Placer un matériau de masse (**M**) dans un récipient ou un plateau propre et sec de masse connue (**M₁**).
- Peser le récipient avec son contenu (**M₂=M+M₁**). Le mettre ensuite dans une étuve à 105 °C pendant 24h.
- Après l'étuvage, on mesure pour la seconde fois le matériau sec avec le récipient.

Les résultats de la teneur en eau de sable de carrière sont représentés dans le Tableau **II.5**

Tableau II.5 : Détermination de la teneur en eau de sable de carrier.

Essai	Prise
M ₁ = masse de récipient (g)	250
M ₂ = (échantillon humide + récipient) (g)	1250
M _h = M ₂ -M ₁ (g)	1000
M ₃ = (échantillon sec + récipient) (g)	1246
M _{dsec} = M ₃ -M ₁ (g)	996
M _w = M ₂ -M ₃ (g)	4
W = ((M ₂ -M ₃)/(M ₃ -M ₁))*100 (%)	0.4

II.4.1.3 La masse volumique absolue

➤ Définition

La masse volumique absolue est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume, tous les vides sont exclus aussi bien les vides entre les grains que les vides à l'intérieur des grains. Elle est notée ρ_{ab} et exprimée en g/cm^3 , kg/dm^3 ou t/m^3 .

➤ But de l'essai

Cet essai permet de déterminer la masse volumique absolue d'un corps (sable, ciment, gravier...), c'est à dire la masse en gramme(g) de ce corps, pour 1 m^3 de volume. Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre les grains.

➤ Principe de l'essai

Il s'agit de mesurer le déplacement du niveau d'un liquide contenu dans un récipient lorsqu'on y introduit une masse donnée d'un matériau. Le matériau doit être sec et représentatif.

➤ Matériels nécessaires

- Une éprouvette graduée
- Une balance

➤ Mode opératoire

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume d'eau $V_1 = 500$ ml.
- Peser la masse P d'un matériau $P = 300$ g.
- Introduire le matériau dans l'éprouvette avec précaution et lentement en prenant soin d'éliminer les bulles d'air.
- Tenir la valeur du nouveau volume et la noter V_2 (Voir Figure II.5)
- Déterminer le poids spécifique par l'expression suivante :

$$\rho_{ab} = P/V \quad [\text{g/cm}^3]$$

P = masse de matériau utilisé

$$V = V_2 - V_1$$

V_1 = volume dans l'éprouvette avant d'introduire la masse de matériau

V_2 = volume dans l'éprouvette après avoir introduit la masse de matériau



Figure II.6 : Éprouvette d'essai de la masse volumique de sable carrier.

Le Tableau II.6, donne les valeurs mesurées pour trois prises d'essai.

Tableau II.6 Détermination de la masse volumique absolue.

Essai N°	1	2	3
P : Masse du matériau (g)	300	300	300
V ₁ : volume dans l'éprouvette avant d'introduire la masse de matériau (ml)	500	500	500
V ₂ : volume dans l'éprouvette avant d'introduire la masse de matériau (ml)	620	620	615
V = V ₂ -V ₁ (ml)	120	120	115
ρ _{ab} = P/V (g/ml)	2.5	2.5	2.61
moyenne	2.54		

II.4.1.4 La masse volumique apparente

➤ Définition

La masse volumique apparente est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume, tous les vides inclus (comprenant à la fois des vides perméable et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules). Elle est notée ρ_{ap} et exprimée en (g/cm³, kg/dm³ou t/m³).

➤ But de l'essai

Déterminer la masse par unité de volume apparent de l'échantillon sec, c'est-à-dire du Volume constitué par la matière du corps et le vide qu'elle contient.

➤ Principe de l'essai

Il s'agit de déterminer le poids volumique en faisant appel au volume apparent. L'essai s'effectue sur une masse d'échantillon sec et représentatif.

➤ Matériels nécessaires

- Une balance.
- Un récipient cylindrique vide.
- Régule métallique pour araser.

➤ Mode opératoire

- Peser le récipient vide et déterminer son poids P_1 .
- Prendre le sable dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les mains à 10 cm environ au-dessus de récipient et laisser tomber le sable modérément jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône.
- Araser la surface de récipient à l'aide de la règle en ayant soin d'éviter tout compactage à la surface.
- Peser le récipient rempli P_2 .
- Déterminer le poids volumique apparent par l'expression suivante :

$$\rho_{ab} = (P_2 - P_1) / V$$

P_1 : poids de récipient vide.

P_2 : poids de récipient plein.

V : volume de récipient.

La Figure II.7 Présente l'essai de la masse volumique apparente



Figure II.7 : L'essai de la masse volumique apparente.

Le Tableau II.7 illustre les résultats obtenus de l'essai :

Tableau II.7: Détermination de la masse volumique apparente de sable.

Essai N°	1	2	3
Masse de récipient vide P ₁ (g)	488	488	488
Masse de récipient plein P ₂ (g)	2100	2107	2110
Volume de récipient (cm ³)	1000	1000	1000
Masse volumique apparente $\rho_{ab} = (P_2 - P_1)/V$ (g/cm ³)	1,612	1,619	1,622
moyenne	1,617		

II.4.1.5 Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9)**➤ Définition**

L'essai au bleu de méthylène, est un test géotechnique utilisé pour évaluer la qualité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, ainsi que les types d'argiles qu'il renferme. En réalité, les argiles de type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques absorbent principalement le bleu de méthylène. Le bleu est peu sensible aux autres argiles (Illites et Kaolinites).

➤ But de l'essai

La méthode de l'essai au bleu de méthylène est employée afin de mesurer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus souvent d'un sol.

➤ Principe de l'essai

En effectuant un essai au bleu de méthylène, on peut évaluer de manière globale l'activité de la fraction argileuse d'un échantillon en mesurant la surface interne et externe des grains argileux.

L'essai consiste à doser une prise d'essai mise en suspension avec du bleu de méthylène. A saturation, une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre provoque la formation d'une tâche avec une auréole.

➤ Equipement nécessaire

- Balance précise à 0.1% de la masse de la prise d'essai.
- Tamis avec des ouvertures de 2mm.
- Bécher.
- Chronomètre.
- Agitateur à ailettes vitesses de rotation 400 à 600 tr/min.
- Burette.
- Tige de verre.
- Papier filtre.
- Eau distillée.
- Solution de bleu de méthylène.

La Figure II.8 montre un malaxeur pour le bleu de méthylène



Figure II.8 : Malaxeur pour le bleu de méthylène.

➤ Mode opératoire

- Les échantillons de laboratoire doivent être réduits conformément à la norme **EN 932-2** pour obtenir un sous-échantillon contenant au moins 200g de la fraction 0/2mm.
- Sécher le sous-échantillon à $(110 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C})$ jusqu'à masse constante et le laisser refroidir.
- Passer le sous-échantillon séché plus de 200g au tamis 2mm.
- Noter la masse M_1 .
- Verser 500 ± 5 ml d'eau déminéralisée dans le bécher et ajouter la masse M_1 .
- Régler l'agitateur sur la vitesse de 600tr/min.
- Mettre en marche l'agitateur, agiter le contenu du bécher pendant 5 min à 600 tr/min.
- Poser un papier-filtre sur le dessus d'un bécher.
- Après une agitation de 5min à 600tr/min, introduire dans le bécher une dose de 5 ml de solution de colorant. Agiter à 400 ± 40 tr/min pendant au moins 1 min et effectuer un test sur le papier filtre à l'aide d'une tige de verre.
- Si après l'ajout des premiers 5 ml de solution de colorant l'auréole n'apparaît pas, effectuer une autre addition de 5ml de solution de colorant, continuer à agiter pendant 1 min, et faire un autre test à la tâche.
- Si aucune auréole n'est visible continuer à agiter, en changeant les ajouts de colorants et les périodes de mélange jusqu'à apparition d'une auréole.
- Si l'auréole disparaît durant les quatre premières minutes, ajouter une autre dose de 5 ml de solution, et si l'auréole disparaît à la cinquième minute, ajouter seulement 2 ml de solution de colorant.

- Enregistrer le volume total de solution de colorant, V_1 ajouté pour obtenir une auréole qui reste visible pendant 5 min, à 1ml près.

Le Tableau II.8 présente les résultats de l'analyse de l'argilosité du sable de carrière à l'aide d'un essai bleu de méthylène.

Tableau II.8 : Détermination de l'argilosité de sable par essai bleu de méthylène.

Masse sèche de la prise d'essai (g)	200
Volume de bleu introduit V_1 (ml)	10
Valeur au bleu de la fraction 0/2 des sables V_1 $MB = \frac{V_1}{M_1} \times 10$ (g/kg)	0.5

➤ Interprétation des résultats

Le sable testé est classé dans la zone $0,2 \leq V_{BS} < 1,5$, ce qui signifie que notre sable est limoneux et sensible à l'eau.

II.4.1.6 Equivalent de sable (NF EN 933-8)

➤ Définition

L'équivalent de sable est une mesure géotechnique qui permet de mesurer la qualité d'un sable ou d'un gravier. Il indique la présence de particules fines, principalement composées d'argile, de végétaux ou de matières organiques, présentes à la surface des grains. Ce terme fait également référence à l'essai qui permet d'évaluer cet indicateur. Le terme "essai d'équivalent de sable piston" est utilisé pour désigner l'essai d'équivalent de sable.

➤ But de l'essai

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculant dans un cylindre gradué puis à agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de la prise d'essai. Il convient alors de mouiller le sable en utilisant le reste de solution flocculant afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20min, il est nécessaire de calculer l'équivalent de sable correspondant à la hauteur de dépôt de sable visible sur la hauteur totale sable et les fines en suspension.

La formule ci-dessous permet de déterminer l'équivalent de sable :

$$ES = h1/h2$$

Avec :

h1 : Hauteur de sable visible.

h2 : Hauteur total de sable + les fines en suspension.

➤ Équipement nécessaire (Figure II.9)

- Éprouvettes avec deux traites de repères, et leurs bouchons.
- Entonnoir.
- Tuyau souple de 1.5m.
- Solution lavante.
- Tube laveur métallique.
- Réglet de mesure.
- Piston taré dont la masse mobile est de 1000g.
- Balance.
- Chronomètre.
- Tamis.



Figure II.9 : Matériel utilisé pour l'équivalent de sable.

➤ Mode opératoire

- Tamiser le sable au tamis de 5mm.
- Prendre 130g du tamisât.
- Remplir les 2 éprouvettes jusqu'au premier trait.
- Verser la quantité de sable voulue.
- Éliminer les bulles d'air (frapper contre la paume de la main). Laisser reposer 10mn.
- Boucher les éprouvettes et les agiter : mouvement rectiligne horizontal sinusoïdal (20cm d'amplitude), 90 allers retours en 30s.
- Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts, on lave ainsi les parois intérieures de l'éprouvette.
- Descendre et remonter lentement le tube que l'on tourne entre les doigts dans la masse du sable, on fait ainsi remonter les particules fines.
- Sortir le tube laveur (et fermer le robinet) lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur.
- Laisser reposer 20mn. Éviter toute vibration.
- A l'aide du réglet mesurer la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculant par rapport au fond du cylindre gradué.

- Déterminer la hauteur du sédiment h_2 en mesurant la distance entre la face inférieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon, en introduisant la règle dans l'encoche du manchon. Voir la Figure II.10



Figure II.10 : L'éprouvette préparée pour l'essai d'équivalent de sable.

Les résultats sont donnés dans le Tableau II.9

Tableau II.9: Détermination de la propreté de sable.

Numéro des éprouvettes	Éprouvette N°1	Éprouvette N°2
Masse de l'éprouvette M_t (g)	311.6	311.6
La hauteur du flacon h_1 (mm)	10.5	10.2
La hauteur du sédiment h_2 (mm)	8.7	8.4
Rapport $(h_2/h_1) \times 100$	82.85	82.35
Equivalent de sable : ES (%)	82.6	

➤ Classification

$ES < 65\%$ sable argileux.

$65\% \leq ES < 75\%$ sable légèrement argileux de propriété admissible.

$75\% \leq ES < 85\%$ sable propre à faible proportion de fines argileuses.

$ES \geq 85\%$ Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

➤ **Interprétation des résultats**

On distingue donc notre sable se situe à l'intervalle $75\% \leq ES < 85\%$ Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

II.4.2 Le ciment

II.4.2.1 Essai de prise (EN 196-7)

➤ **Définition**

Il s'agit d'un ensemble de processus d'hydratation chimique qui permettent de transformer la pâte de ciment (ciment ajouté à de l'eau) de l'état liquide (plastique) en état solide (rigidification). L'aiguille de Vicat est utilisée pour mesurer le temps de prise sur une pâte de consistance normalisée.

➤ **But de l'essai**

La prise des pâtes de ciments (liants hydrauliques) doit être connue au début et à la fin, afin de pouvoir estimer le temps nécessaire pour la mise en place adéquate des mortiers et des bétons qui seront ensuite fabriqués.

➤ **Principe de l'essai**

L'objectif de l'essai est de suivre comment la consistance d'une pâte de ciment évolue en utilisant l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13mm de diamètre. Lorsque l'aiguille s'arrête à une distance "d" du fond du moule, c'est-à-dire à $4\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on considère que le début de prise est atteint. Le temps de début de prise est un moment mesuré à partir du début de malaxage. La fin de prise correspond à la période où l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm

➤ **Matériels nécessaires**

- Une salle climatisée de température de $20^\circ \pm 1^\circ \text{C}$.
- Appareil de Vicat, cet appareil est composé d'un moule tronconique (Figure II.10)
- Une aiguille normalisée de diamètre 1.13mm.
- Une plaque en verre de base plane.
- Une balance.

- Un malaxeur normalise.
- Des éprouvettes graduées en plastique.
- Une spatule.
- Un chronométré.

➤ **Mode opératoire**

- Il est nécessaire de régler l'appareil de Vicat équipé de l'aiguille en la baissant jusqu'à la plaque de base plane et en ajustant le repère à zéro de l'échelle.
- Relever l'aiguille en position d'attente.
- En préparant la pâte de ciment, il est nécessaire d'ajouter la quantité d'eau établie pour la pâte de consistance normalisée.
- Introduire rapidement la pâte dans le moule tronconique sans tassement excessif, le moule étant placé sur la plaque de base plan.
- Abaisser l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte.
- Lâcher l'aiguille sans vitesse initial, cette dernière s'enfonce dans la pâte.
- Noter la distance d entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base plane après 30 seconds de la libération de l'aiguille.
- Renouveler l'essai de pénétration à de différentes positions et à des intervalles de temps 10 à 15 min jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$. Noter la lecture de début de prise.
- Nettoyer l'aiguille après chaque pénétration.
- De même la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau plus que de 0.5mm.



Figure II.11: Essai de prise de ciment.

➤ Résultats obtenus

Le temps de début et de fin de prise du ciment utilisé est présenté dans la Figure II.12

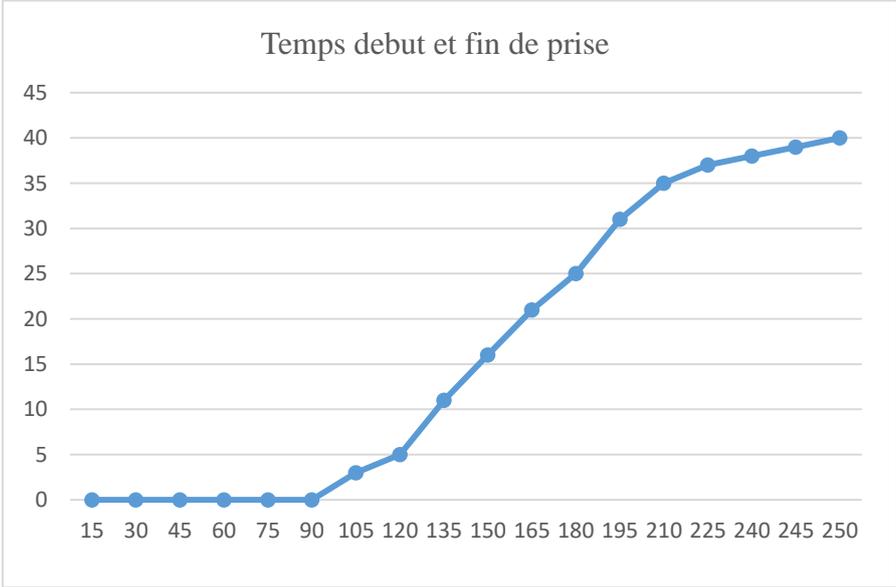


Figure II.12 : Temps début et fin de prise.

➤ Interprétation des résultats

Il est observé que la prise du ciment a débuté après 120 min (2 h) après l'installation de la pâte dans le moule tronconique. La prise de ciment est un peu lente. La fin de prise était après 250 min (4.15 h).

II.4.3 Verre trempé

Les essais réalisés pour le verre trempé sont les suivants :

- Essai de la masse volumique absolue.
- Essai de la masse volumique apparent.

II.4.3.1 Masse volumique absolue

La Figure II.13, présente l'essai de la masse volumique absolue du verre trempé.



Figure II.13: L'essai de masse volumique absolue du verre trempé.

Les résultats sont présentés dans le Tableau **II.10**

Tableau II.10 : Résultats de l'essai de masse volumique absolue

Essai N°	1	2	3
P : Masse du matériau (g)	300	300	300
V ₁ : volume dans l'éprouvette avant d'introduire la masse de matériau (ml)	500	500	500
V ₂ : volume dans l'éprouvette avant d'introduire la masse de matériau (ml)	620	625	625
V = V ₂ -V ₁ (ml)	120	125	125
$\rho_{ab} = P/V$ (g/ml)	2.5	2.4	2.4
moyenne	2.43		

II.4.3.2 Masse volumique apparente

La Figure II.14 montre l'essai de la masse volumique apparente et le Tableau II.11, présente les résultats obtenus.



Figure II.14 Essai de la masse volumique apparente.

Tableau II.11 : Résultats de la masse volumique apparente.

Essai N°	1	2	3
Masse de récipient vide P ₁ (g)	488	488	488
Masse de récipient plein P ₂ (g)	1584	1585	1588
Volume de récipient (cm ³)	1000	1000	1000
Masse volumique apparente $\rho_{ab} = (P_2 - P_1)/V$ (g/cm ³)	1.096	1.097	1.10
moyenne	1.098		

II.5 Conclusion

Grâce aux tests d'identification mentionnés précédemment, nous avons pu évaluer la qualité des matériaux sélectionnés pour la réalisation de cette étude. Grâce à notre compréhension des principales caractéristiques des matériaux, nous permet de commenter et d'argumenter de manière significative les résultats des essais à réaliser. De plus c'est une étape nécessaire avant d'entamer l'étude expérimentale de ces mortiers.

Chapitre III :
**Caractéristiques physico-mécaniques et thermique
des mortiers avec ajout de verre trempé**

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode de confection et de conservation des échantillons de mortier, en tenant compte des différents pourcentages utilisés. Nous présentons ensuite les résultats des divers essais physiques, mécaniques et thermiques effectués sur les mortiers confectionnés selon les différents pourcentages d'ajout de verre trempé (10 %, 20 % et 30 %), ainsi que leurs interprétations. Les déchets de verre sont utilisés comme addition minérale. Ils sont finement broyés, tamisés d'un côté avec un tamis à 0.08mm d'ouverture et d'un autre coté avec un tamis de 0.5mm pour évaluer l'effet de la finesse sur la pouzzolanicité de l'addition. Nous avons donc confectionné 07 compositions identifiées comme suit :

- Composition 1 : mortier avec 0% de verre trempé « mortier témoins » (VT0%)
- Composition 2 : mortier avec 10% de verre trempé de granulométrie inférieur à 0.08 mm (VT10%Ø0.08)
- Composition 3 : mortier avec 10% de verre trempé de granulométrie inférieur à 0.5 mm (VT10%Ø0.5)
- Composition 4 : mortier avec 20% de verre trempé de granulométrie inférieur à 0.08 mm (VT20%Ø0.08)
- Composition 3 : mortier avec 20% de verre trempé de granulométrie inférieur à 0.5 mm (VT20%Ø0.5)
- Composition 6 : mortier avec 30% de verre trempé de granulométrie inférieur à 0.08 mm (VT30%Ø0.08)
- Composition 7 : mortier avec 30% de verre trempé de granulométrie inférieur à 0.5mm (VT30%Ø0.5)

III.2 Compositions des mortiers

Une mesure de ciment, trois mesures de sable et une demi-mesure d'eau forment l'échantillon témoin. Les mesures choisis sont 1350g sable pour 450g de ciment le rapport E/C égale a 0.5. On obtient des mortiers avec ajout dans les mêmes conditions en substituant une partie du ciment (taux de substitution) par du poudre de verre trempé. Les mesures de sable et de l'eau restent constats.

Pour obtenir des résultats satisfaisants sur la résistance mécanique du mortier, nous avons choisi de prendre une moyenne de trois mesures sur trois éprouvettes âgées de 7, 14 et 28 jours.

Les éprouvettes sont conservées dans l'eau à $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ jusqu'aux échéances de ruptures.

III.2.1 Calcul des quantités de matériaux nécessaires pour les différentes éprouvettes

Dans le but d'analyser simultanément l'objectif des différents pourcentages d'ajout sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques, le **Tableau III.1** présente les différentes quantités de matériaux utilisées dans la fabrication des différents mélanges mixtes.

Tableau III.1 : Composition des mortiers.

Type de mortier	Sable (g)	Ciment (g)	Poudre de VT (g)	Eau (g)
VT0%	1350	450	0	225
VT10%Ø0.5		405	45	
VT10%Ø0.08		405	45	
VT20%Ø0.5		360	90	
VT20%Ø0.08		360	90	
VT30%Ø0.5		315	135	
VT30%Ø0.08		315	135	

III.2.2 Mode opératoire

Le mortier est fabriqué en utilisant un malaxeur, dans une cuve de cinq litres **Figure III.1**. Ce dernier est préparé de la manier suivante :

- Introduire l'eau dans la cuve de malaxeur.
- Verser le ciment mélangé avec la farine de verre trempé.
- Mettre le malaxeur en marche en vitesse lente.
- Après 30 secondes de malaxage, on ajoute le sable de manière régulière pendant les 30 secondes suivantes.
- Ensuite mettre le malaxeur à sa vitesse rapide pendant 30 secondes de plus.
- Mettre le malaxeur à l'arrêt pendant 1 minute 30 secondes. Pendant les 15 premières secondes, à l'aide d'une raclette retirer le mélange qui s'accroche aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le centre de ce dernier.
- Recommencer ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.
- Enfin, arrêter le malaxeur.



Figure III.1 : Malaxeur normalisé.

III.3 Confection des éprouvettes

Les échantillons d'essais ont été confectionnés selon la norme NF15 403 dans des moules prismatiques (4cm x4cmx16cm) (**Figure III.2**), en deux couche et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc (**Figure III.3**). La procédure de la confection est comme suit :

- Introduire la première couche de mortier dans le moule.
- Ensuite, appliquer au moule 60 chocs à l'aide d'une table à choc.
- Introduire la seconde couche de mortier et en appliquant 60 chocs une autre fois.
- En utilisant une règle métallique, enlever le résidu de mortier.
- La surface des éprouvettes doit être lissée à l'aide d'une spatule.
- Étiqueter ou marquer les moules pour identifier les éprouvettes.
- Enfin, recouvrir les moules à l'aide d'un film plastique pendant 24 h jusqu'à le démoulage (**Figure III.4**).



Figure III.2 : Moule (4cm×4cm×16 cm)



Figure III.3 : Table à choc.



Figure III.4 : Éprouvettes recouverts d'un film plastique

III.4 Conservation des éprouvettes

Après 24 heures de confection, les éprouvettes doivent être entreposées dans des bacs contenant de l'eau (Figure III.5) jusqu'au moment de l'essai (7, 14 et 28 jour), à une température de 20°C + 2°C, afin d'éviter l'évaporation rapide de l'eau.



Figure III.5 : Conservation des éprouvettes dans l'eau.

III.5 Essais physiques

Les propriétés physiques sont des propriétés qui mesurent le comportement de matériaux à l'action de la température, l'humidité (la densité ; la masse volumique, la porosité, l'absorption, la perméabilité, le retrait (le gonflement) etc...).[46]

III.5.1 Essai de porosité

La porosité est une mesure de la quantité d'espace vide ou de pores présents dans un matériau par unité de volume total, elle est exprimée en pourcentage. La porosité peut affecter les propriétés du matériau telles que la résistance et la conductivité thermique

➤ Mode opératoire

Le calcul de la porosité est effectué en utilisant les trois pesées de l'échantillon à savoir :

1. La pesée dans l'eau M_e (pesée hydrostatique) qui s'effectue en immergeant complètement l'éprouvette à l'aide d'un panier relié à une balance et immergé dans l'eau.
2. La pesée à l'état de saturation à l'air : après la pesée à l'eau, il faut essuyer superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans toutefois retirer l'eau des pores. Ensuite peser immédiatement l'éprouvette à l'air à 0.01 g près. On obtient de cette manière, la masse M_a de l'éprouvette saturée.
3. Pesée à l'état sec qui s'effectue par étuvage de l'échantillon à une température de 105°C jusqu'à poids constant. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche M_s .

La porosité est déterminée par la formule suivante :

$$P (\%) = \frac{M_a - M_s}{M_a - M_e} \times 100$$

M_e : Pesée dans l'eau (hydrostatique).

M_a : Pesée à l'air à l'état humide

M_s : Pesée à l'air à l'état sec.



Figure III.6 : Essai de porosité.

➤ Présentation des résultats

Tableau III.2 : Résultats des mesures de la porosité.

Porosité (%)		
	14 jours	28 jours
VT0%	19.47	18.84
VT10%Ø0.08	19.99	18.87
VT10%Ø0.5	20.26	19.66
VT20%Ø0.08	20.37	19.17
VT20%Ø0.5	20.39	19.86
VT30%Ø0.08	20.57	20
VT30%Ø0.5	20.63	20.17

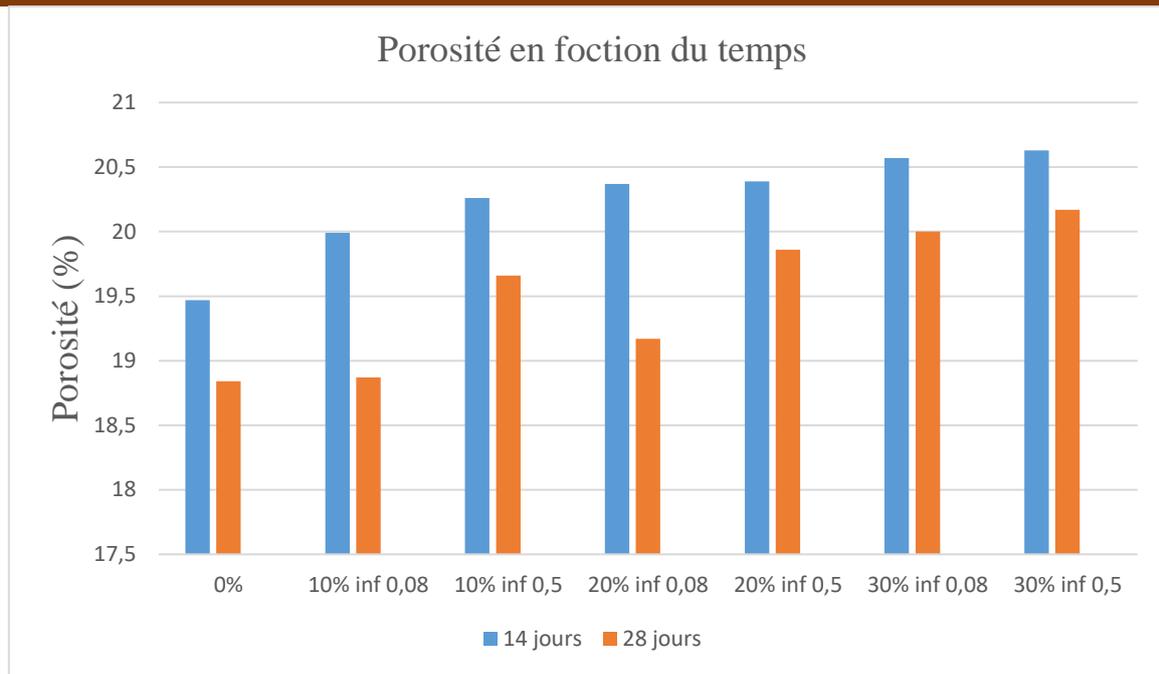


Figure III.7 : Variation de la porosité en fonction du temps

➤ Interprétation des résultats

D'après les résultats donnés dans le tableau III.2 et présentés par la figure III.7, nous remarquons que le mortier avec ajout de verre trempé est plus poreux que le mortier témoin et que la porosité augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. Ceci peut être expliqué par l'effet latent de l'ajout. Le verre trempé utilisé dans notre étude contient de la silice amorphe. Cette dernière réagit à long terme (après 28 jours) avec la portlandite libérée lors de l'hydratation du ciment pour donner des gels C-S-H qui obturent les pores pour donner plus de compacité et moins de pores aux produits finis. Pour confirmer cette explication, on propose de prolonger la période de cure et refaire l'essai.

III.5.2 Essai d'absorption d'eau

L'essai d'absorption d'eau mesure la quantité d'eau absorbée par un échantillon de mortier séché, immergé dans l'eau. Il permet d'évaluer la porosité et la durabilité du mortier.

Mode opératoire

- Après 14 et 28 jours de conservation des éprouvettes dans l'eau, on les retire de l'eau.
- Ensuite les éprouvettes sont séchées avec le papier absorbant.
- On pèse les éprouvettes à l'état humide M_h et on note les résultats.
- Puis on met les éprouvettes dans une étuve de température de 105°C (Figure III.8) pendant 24 heures.

- Après l'étuvage les éprouvettes sont pesées de nouveau (soit M_S). Enfin on calcule la valeur de l'absorption d'eau correspondant pour chaque âge à l'aide de la formule suivante :

$$Ab (\%) = \left(\frac{M_h - M_S}{M_S} \times 100 \right)$$

M_S : pesés sèche.

M_h : pesés humide.



Figure III.8 : Étuvage des éprouvettes.

➤ **Présentation des résultats**

Tableau III.3 : Résultats d'absorption d'eau.

Absorption d'eau (%)		
	14 jours	28 jours
VT0%	8.96	8.70
VT10%Ø0.08	9.28	8.77
VT10%Ø0.5	9.46	9.24
VT20%Ø0.08	9.49	8.92
VT20%Ø0.5	9.70	9.39
VT30%Ø0.08	9.72	9.41
VT30%Ø0.5	9.73	9.54

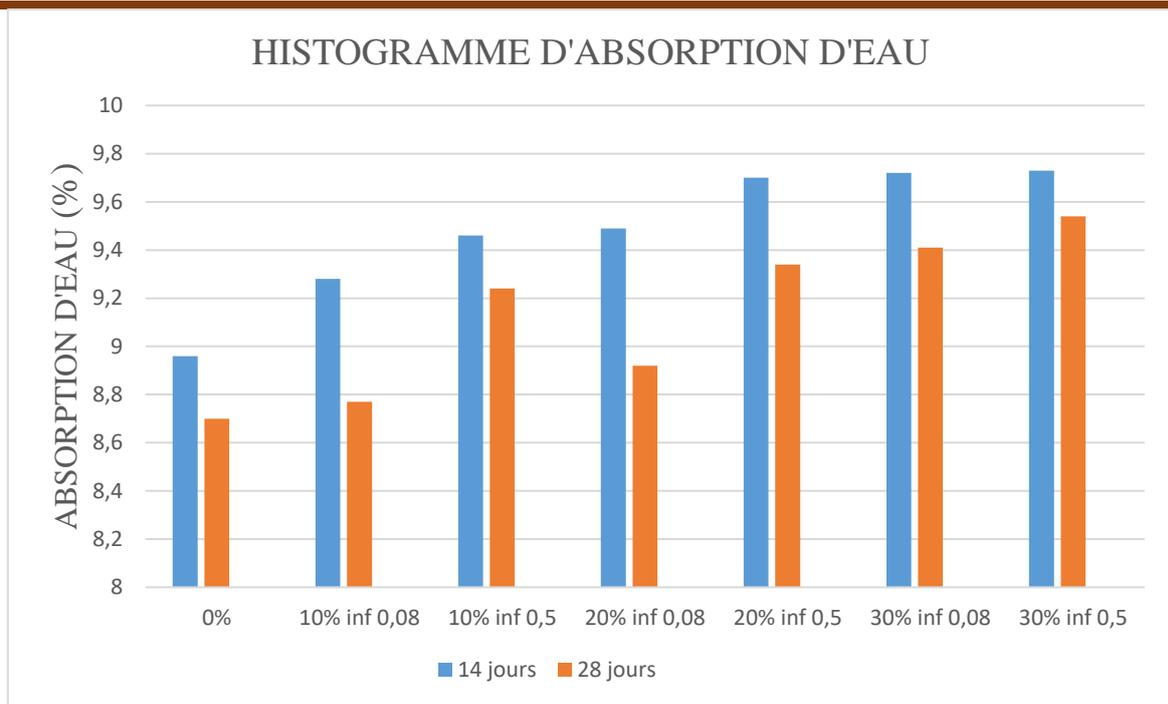


Figure III.9 : Absorption d'eau en fonction de temps

➤ Interprétation des résultats

Le tableau III.3 et la figure III.9 présentent les résultats de l'évaluation de l'effet de verre trempé sur l'absorption d'eau des mortiers.

On constate que le mortier avec ajout de verre trempé absorbe plus que le mortier témoin-cela quel que soit l'âge et pourcentage d'ajout dans les échantillons. Ces résultats sont attribuables à l'augmentation de la porosité observée dans les différents échantillons. L'absorption d'eau augmente proportionnellement à l'augmentation de porosité dans la structure des éprouvettes.

III.5.3 Essai absorption d'eau capillaire

La propriété de l'absorption par capillarité désigne la configuration des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité. Il est employé en complément d'autres études afin de caractériser la durabilité du béton et du mortier.

L'absorption capillaire mesure le taux d'absorption d'eau par succions capillaires des éprouvettes de mortier, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

➤ Mode opératoire

- Les éprouvettes sont pesées à l'état sec
- Elles sont ensuite immergées à 1 cm d'eau pendant 10 min.

- Enfin on sèche la surface immergée dans l'eau avec un papier absorbant pour prendre de nouveau la pesée de chaque échantillon et noter le résultat.

Le coefficient d'absorption capillaire (C) est obtenu par la formule suivante :

$$C = \frac{M}{S * \sqrt{t}} * 100$$

Avec :

M : masse d'eau en gramme absorbée par l'éprouvette depuis le début de l'immersion.

S : surface de la face immergée exprimée en cm².

T : temps en minutes écoulé depuis le début de l'immersion. Dans les conditions de l'essai (t = 10 minutes).

La formule précédente s'écrit alors :

$$C = 31.6 * \left(\frac{M}{S}\right)$$



Figure III.10 : Essai d'absorption capillaire

Tableau III.4 : résultats d'absorption capillaire

Absorption d'eau capillaire (%)		
	14jours	28 jours
VT0%	8.73	7.96
VT10%Ø0.08	9.32	8.29
VT10%Ø0.5	9.97	9.01
VT20%Ø0.08	10.36	9.72
VT20%Ø0.5	11.06	10.86
VT30%Ø0.08	11.85	11.14
VT30%Ø0.5	12.09	11.96

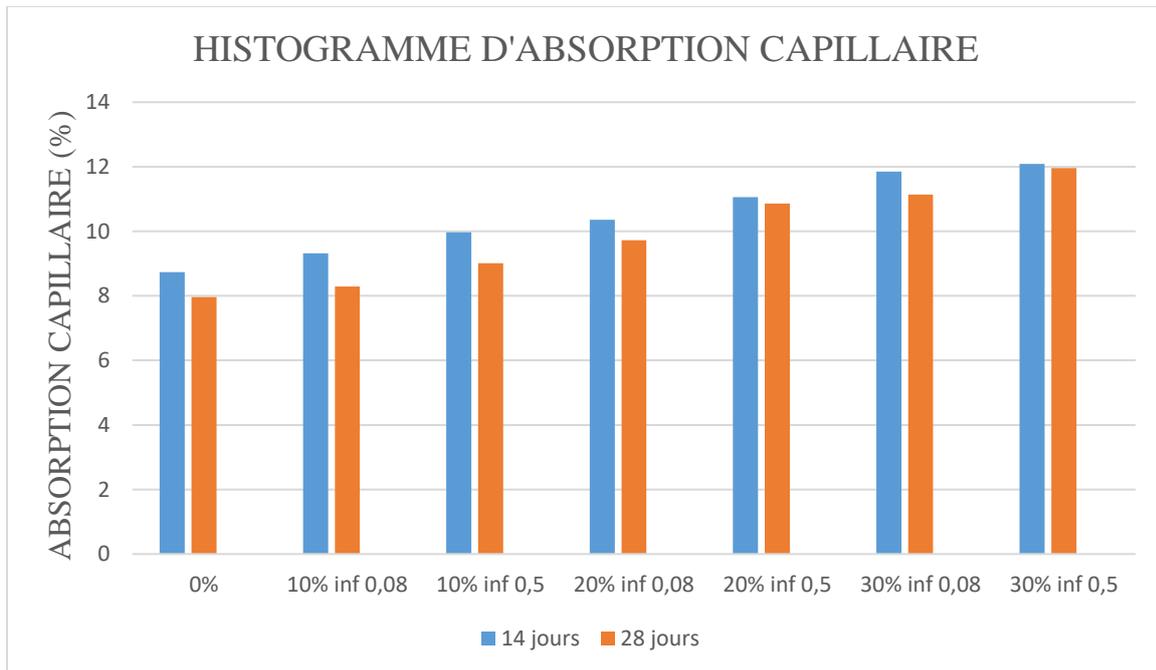


Figure III.11 : Variation d'absorption capillaire en fonction de temps

➤ **Interprétation de résultats**

Les résultats obtenus de l'essai d'absorption d'eau capillaire sont mentionnés dans le tableau III.4, et représentés par la figure III.11.

Chapitre III Caractéristiques physico-mécaniques et thermique des mortiers avec ajout de verre trempé

On observe que l'absorption augmente avec l'augmentation de pourcentage d'ajout de verre trempé par rapport au mortier témoin, et cela quel que soit l'âge. Ces résultats sont dus à une augmentation de la porosité et des chemins de circulation créés par la présence de verre trempé.

III.5.4 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau correspond à sa masse par unité de volume, après séchage complet pour éliminer toute l'eau qu'il contient. Cette propriété est essentielle pour caractériser la densité et la porosité des matériaux.

➤ Mode opératoire

- D'abord on met les éprouvettes dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante.
- Puis on les pèse après l'étuvage (soit M).
- Ensuite on mesure les éprouvettes à l'aide d'un pied à coulins.
- Et on calcule la masse volumique apparente par la formule suivante : $\rho = M/V$.

Tableau III. 5 : Variation de la masse volumique apparente.

Masse volumique apparente (g/cm ³)		
	14 jours	28 jours
VT0%	2.13	2.192
VT10%Ø0.08	2.051	2.105
VT10%Ø0.5	2.044	2.099
VT20%Ø0.08	1.970	2.047
VT20%Ø0.5	1.15	2.005
VT30%Ø0.08	1.886	1.954
VT30%Ø0.5	1.861	1.938

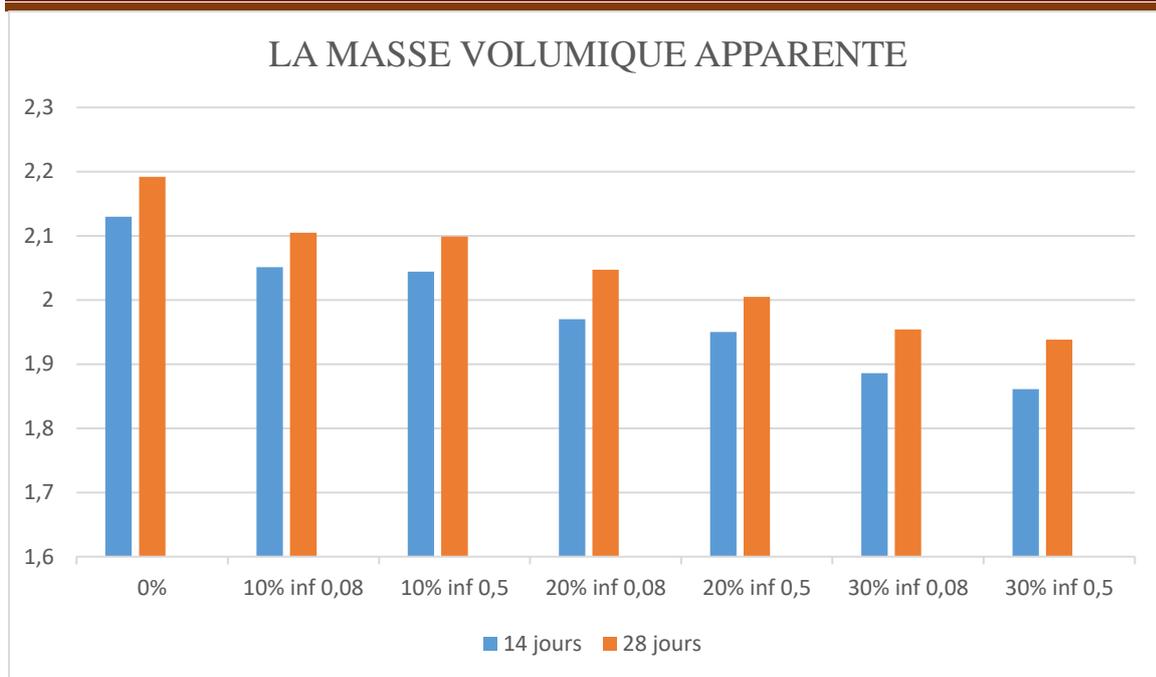


Figure III.12 : Variation de la masse volumique apparente

➤ Interprétation des résultats

La masse volumique apparente est influencée par la variation du pourcentage d'ajout. Selon le Tableau III.5 et la Figure III.12, il est constaté que la masse volumique apparente diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage d'ajout, cependant on remarque que cette masse volumique diminue en fonction de la finesse de l'ajout et augmente en fonction de l'âge. Plus le verre trempé est fin plus il a la capacité d'obturer un maximum de vide et de surcroît, il augmente la compacité de l'échantillon.

III.6 Essai mécanique

Les essais mécaniques sont des expériences visant à caractériser les lois de comportement des matériaux, établissant une relation entre les contraintes et les déformations. Ces essais sont essentiels pour évaluer la résistance et la flexibilité des matériaux.[47].

Les deux essais effectués dans notre étude sont les résistances à la compression et à la flexion afin d'évaluer les performances mécaniques des mortiers.

III.6.1 Essai à la flexion

L'essai à la flexion, aussi appelé essai de traction par flexion, est une méthode normalisée utilisée pour évaluer la résistance mécanique des mortiers. Il s'agit d'un test qui permet de comprimer un prisme de 4cmx4cmx16cm en utilisant un appareil de mesure de la flexion et de

la compression comme montré à la Figure III.13.



Figure III.13: Le dispositif d'essais de compression et de flexion.

➤ Mode opératoire

- Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire (Figure III.14).
- Appliquer une charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme jusqu'à rupture (Figure III.15).
- Conserver les demi-prismes jusqu'au moment des essais en compression



Figure III.14 : Mise en place de l'éprouvette.



Figure III.15 Rupture de l'éprouvette.

➤ Présentation des résultats

Tableau III.6 : Résultats des mesures de résistance à la flexion.

Résistance à la flexion (Mpa)			
	7 jours	14 jours	28 jours
VT0%	4.59	5.72	6.74
VT10%Ø0.08	4.48	5.56	6.65
VT10%Ø0.5	4.22	5.24	5.78
VT20%Ø0.08	3.83	5.18	5.40
VT20%Ø0.5	3.59	5.08	5.24
VT30%Ø0.08	3.19	4.11	5.02
VT30%Ø0.5	3.06	4.09	4.84

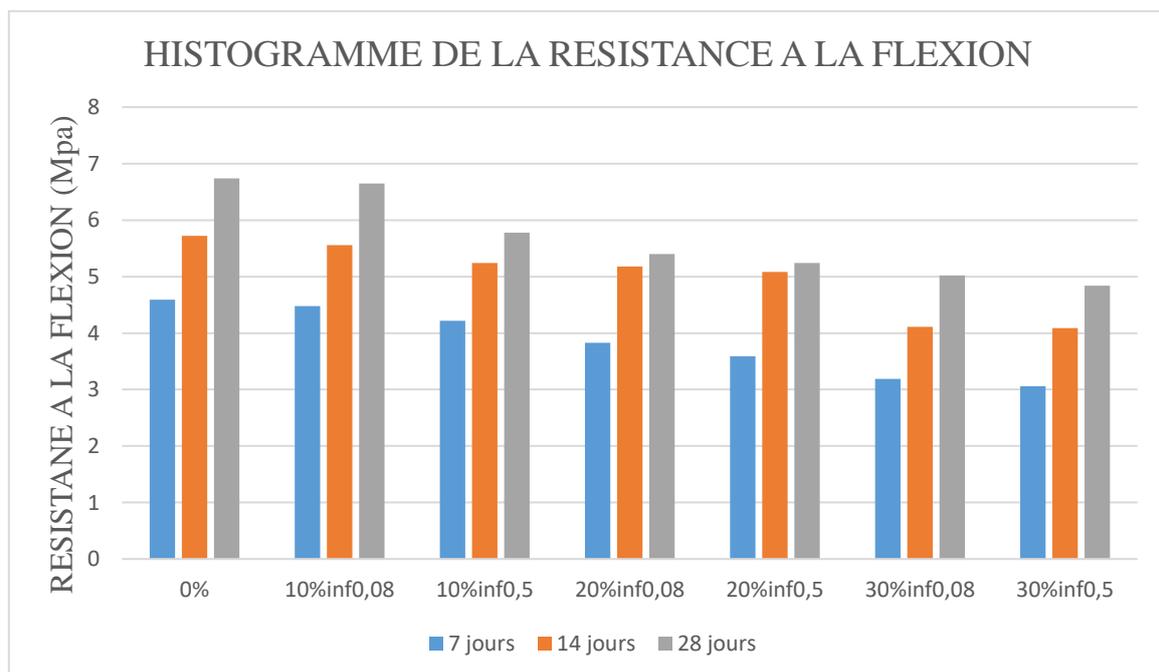


Figure III.16 : Résistance à la flexion

➤ Interprétation des résultats

Selon les résultats présentés dans le Tableau III.6 et illustrés par la Figure III.16, il est observé qu'en augmentant le pourcentage d'ajout, la résistance à la flexion diminue. Cependant, on constate que les échantillons au diamètre d'ajout ($< 0,08$ mm) sont plus résistants que ceux au diamètre ($< 0,5$ mm) et ce quel que soit le pourcentage de l'addition.

L'augmentation de la résistance à la flexion au fil du temps est généralement attribuée à l'hydratation continue du ciment, un processus qui se déroule progressivement jour après jour. Néanmoins, on observe une diminution de cette résistance avec l'augmentation des pourcentages de l'ajout. Ceci est justifié par la porosité accrue des échantillons constatée au paragraphe III.5.1, qui créent plus de chemins de rupture lors de l'essai à la flexion. Les matériaux jusqu'à 28 jours de cure n'ont pas encore obtenu un degré de compaction satisfaisant. Ce qui dû au manque de formation de C-S-H qui remplit les vides à moyen âge.

III.6.2 Essai de compression

L'essai de compression est une méthode d'essai mécanique qui permet de déterminer la résistance et le comportement à la déformation d'un matériau soumis à une charge de compression sous une contrainte axiale normale jusqu'à la rupture. L'essai de compression est réalisé sur les demi-éprouvettes récupérées après essai de flexion.

➤ Mode opératoire

Latéralement, centrer chaque demi-prisme par rapport aux plateaux de l'appareil. Ensuite, appliquer la charge en augmentant avec une vitesse constante jusqu'à la rupture.

Les essais de compression des éprouvettes ont été réalisés aux âges de 7, 14 et 28 jours.



Figure III.17 : Essai de compression pour la demi-prisme.

➤ Présentation des résultats

Tableau III.7 : Résultats des mesures de la résistance à la compression.

Résistance à la compression (Mpa)			
	7 jours	14 jours	28 jours
VT0%	26.37	27.42	31.26
VT10%Ø0.08	20.01	23.24	29.43
VT10%Ø0.5	25.05	18.45	24.89
VT20%Ø0.08	18.01	19.63	24.11
VT20%Ø0.5	18.06	19.03	22.13
VT30%Ø0.08	14.13	18.91	19.55
VT30%Ø0.5	12.15	16.17	20.90

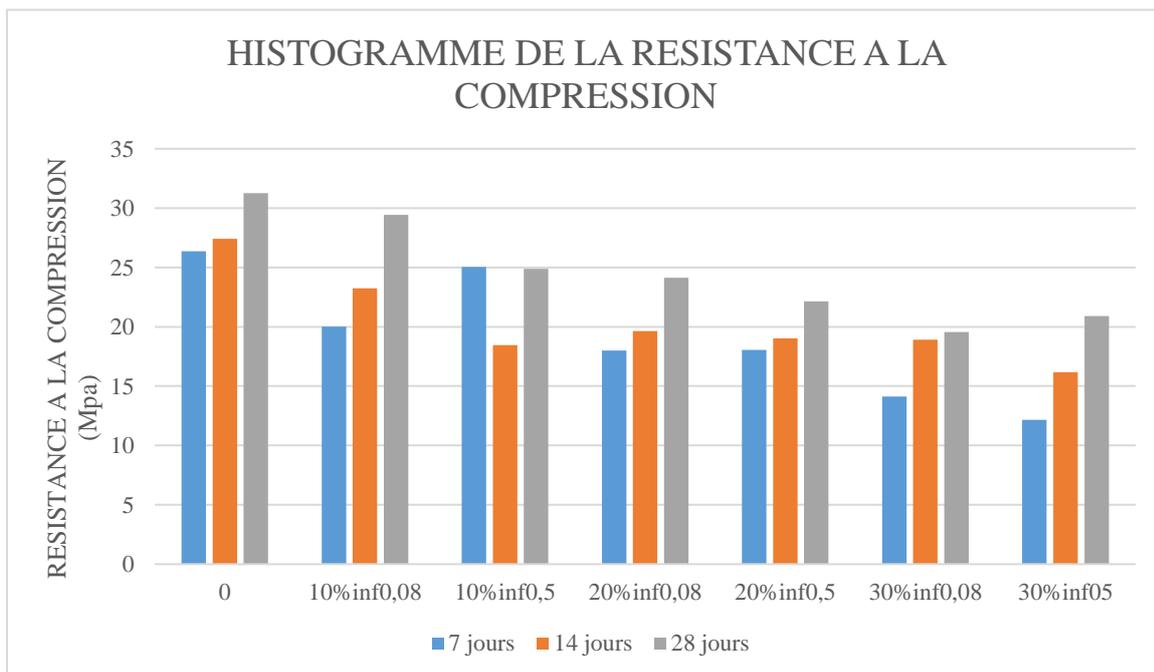


Figure III.18 : Résistance à la compression

➤ Interprétation des résultats

La figure III.18 et le tableau III.7 présentent les résultats de l'essai de la résistance à la compression. On constate que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de l'ajout, et on remarque que les échantillons au diamètre de 0.08mm sont plus résistants que ceux au diamètre de 0.5 mm (quel que soit le pourcentage).

On explique la diminution de cette résistance à la compression en fonction de l'augmentation de pourcentage de l'ajout à cause de la lenteur de la réaction pouzzolanique du verre trempé. La résistance à la compression peut être améliorée à long terme car le verre trempé utilisé contient une grande quantité de silice amorphe le tableau III.8 et la figure III.19, nous donnons les résultats de la chute de résistance à la compression. On remarque que la chute diminue en fonction de l'âge suite à l'hydratation du ciment au fil du temps car les composés principaux du ciment (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) réagissent avec l'eau de l'hydratation pour produire le gel (C-S-H) et de la chaux hydratée ($Ca(OH)_2$). La formation du C-S-H est responsable de la densification du mortier et sur ce de sa résistance à la compression accrue. Par contre par rapport à l'augmentation du pourcentage d'ajout la chute de résistance augmente. Ce qui nous pousse à suggérer d'optimiser le pourcentage d'ajout à 20% avec une granulométrie inférieure à 0.08mm.

Tableau III.8 : Résultats de la chute de la résistance à la compression

Chute de la résistance à la compression RC (%)			
	7 jours	14 jours	28 jours
VT10%Ø0.08	24.12	15.22	6.81
VT10%Ø0.5	5.04	32.71	20.39
VT20%Ø0.08	31.70	28.4	22.86
VT20%Ø0.5	31.4	30.59	29.2
VT30%Ø0.08	46.42	31.03	37.13
VT30%Ø0.5	53.92	41.02	33.14

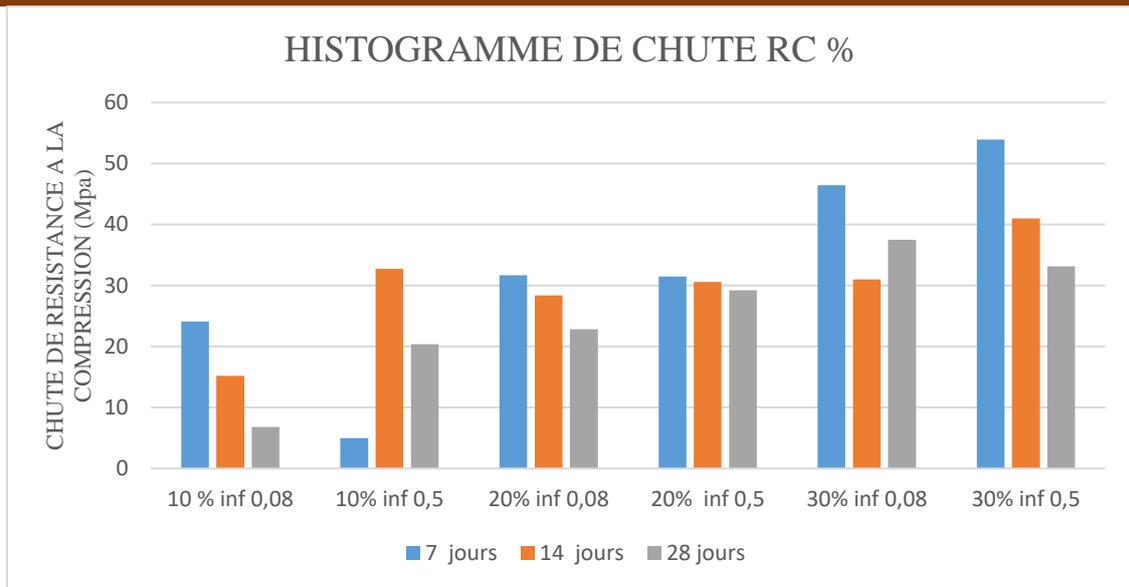


Figure III.19 : Chute de la résistance à la compression

L'indice de pouzzolanité du verre trempé évalué selon la norme ASTMBC618 nous renseigne que l'addition utilisée à un potentiel pouzzolanique important. Le Tableau III.9 donne les résultats du calcul d'indice de pouzzolanité des différentes séries d'échantillons. On constate que l'indice d'activité pouzzolanique 'IAP' est dans l'intervalle [0.67-1] pour les pourcentages 10% et 20%.

Tableau III.9 : Indice d'activité pouzzolanique des différentes séries

	IAP
VT10%Ø0.08	0.94
VT10%Ø0.5	0.79
VT20%Ø0.08	0.77
VT20%Ø0.5	0.70
VT30%Ø0.08	0.62
VT30%Ø0.5	0.66

III.7 Etude thermique

III.7.1 Essai de la conductivité thermique

La conductivité thermique est un coefficient qui qualifie la réaction d'un matériau face au transfert thermique. Il définit donc la quantité de chaleur en watt transmise par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 °C / m ou 1 kelvin. Ce coefficient est noté lambda (λ), et peut être exprimé en watts par mètre-kelvin, soit W/m*K.

Plus la conductivité thermique est grande, plus le matériau est conducteur. Et donc, à contrario, plus le coefficient de conductivité thermique est faible, plus le matériau aura des pouvoirs isolants.

➤ Mode opératoire

- Retirer les éprouvettes du back une fois qu'ils ont été conservés dans l'eau pendant 28 jours.
- Sécher les éprouvettes à l'aide d'un papier absorbant et étuver à une température de 105°C.
- Retirer les éprouvettes de l'étuve et laisser refroidir.
- Configurer l'appareil employé pour cette expérience CT-mètre.
- Introduire une sonde très fine entre les deux éprouvettes. Cette sonde émet de la chaleur à l'aide d'un fil chaud.
- Enfin on note les résultats lorsque la température se stabilise



Figure III.20 : Essai de la conductivité thermique

➤ Présentation des résultats

Tableau III.10 Résultats de mesures de la conductivité thermique.

Conductivité thermique (W/m.C°)	
	28 jours
VT0%	1.822
VT10%Ø0.08	1.774
VT10%Ø0.5	1.698
VT20%Ø0.08	1.687
VT20%Ø0.5	1.642
VT30%Ø0.08	1.627
VT30%Ø0.5	1.608

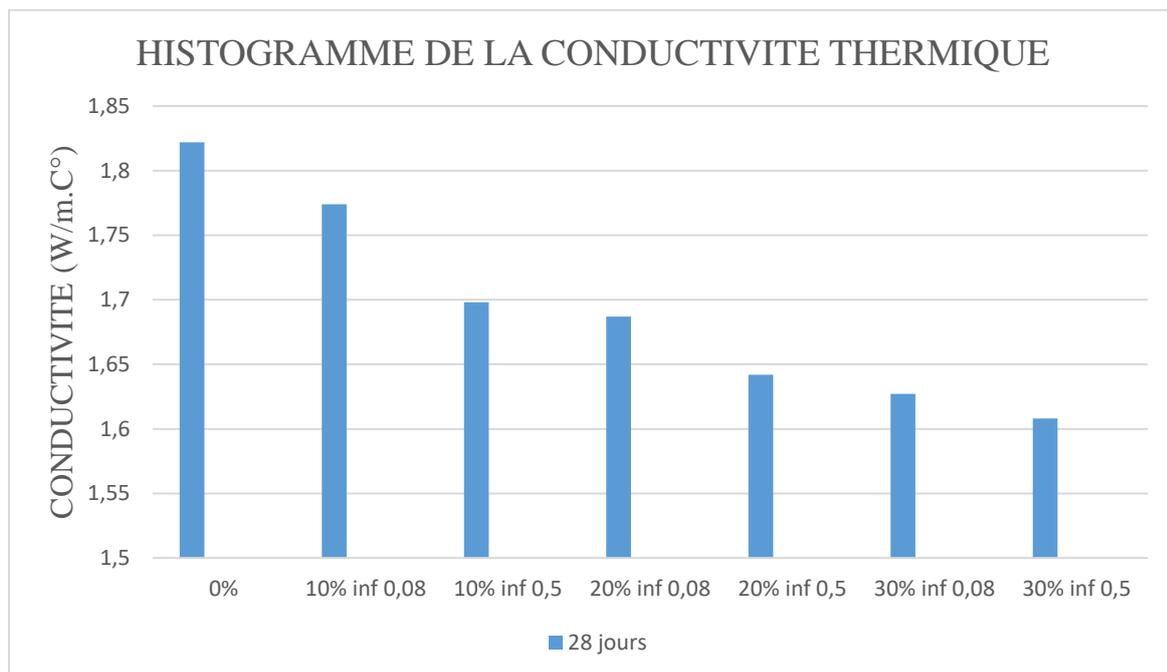


Figure III.21 : Histogramme de la conductivité thermique

➤ Interprétation des résultats

Le tableau III.10 et la figure III.21 présente les résultats des mesures de la conductivité thermique pour 28 jours.

D'après les résultats on distingue qu'à chaque augmentation de pourcentage de verre trempé ajouté la conductivité thermique enregistre une petite diminution.

III.8 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats des expériences menées dans le cadre de notre projet de fin d'études. L'objectif était d'examiner l'effet de l'ajout de poudre de verre trempé à différents pourcentages sur diverses propriétés physico-mécaniques et thermiques des mortiers, telles que la porosité, l'absorption d'eau, la masse volumique sèche, la résistance à la compression et à la flexion et enfin la conductivité thermique.

Grâce à ces essais, nous avons pu tirer les résultats suivants :

- L'ajout de poudre de verre trempé diminue la masse volumique sèche, rendant le mortier plus léger.
- La porosité et l'absorption d'eau augmentent avec le pourcentage d'ajout, ce qui pourrait réduire la résistance du mortier.
- Une augmentation du taux d'ajout entraîne une diminution de la résistance à la flexion, due à l'augmentation de la porosité causée
- La résistance à la compression diminue également avec un pourcentage d'ajout plus élevé, probablement en raison d'un manque
- La conductivité thermique diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans cette étude, nous avons exploré l'utilisation de farine de verre trempé comme substitut au ciment dans la confection d'un mortier. Visant à améliorer à la fois les propriétés mécaniques physiques et thermiques. Les résultats obtenus nous ont permis de dresser les conclusions suivantes :

- La résistance à la compression des échantillons a diminué avec l'augmentation du pourcentage de farine de verre trempé (10 %, 20 % et 30 %). La diminution par rapport à l'échantillon témoin varie de (6,81 % à 37,13 %).
- La résistance à la compression peut être améliorée à long terme car le verre trempé utilisé contient une grande quantité de silice amorphe. . Le verre trempé présente un potentiel pouzzolanique important et il ne rentre en réaction qu'après l'hydratation du ciment et la formation de la portlandite.
- L'absorption d'eau et la porosité augmente avec le pourcentage d'ajout, ce qui corrobore la chute de la résistance du mortier.
- la masse volumique apparente diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage d'ajout.
- La résistance thermique a observé une petite amélioration selon les pourcentages d'ajout (10 %, 20 % et 30%) par rapport à l'échantillon témoin. . Ceci peut être expliqué par la porosité accrue de l'ensemble des échantillons.

En conclusion, l'activité pouzzolanique du verre trempé est lente. Elle peut se manifester à partir de 28 jours pour donner plus de résistance aux échantillons de mortier. L'utilisation des pouzzolanes comme ajout, apporte une amélioration du comportement de la matrice cimentaire dans un milieu acide. Ces ajouts participent à la densification de la matériau élaboré, à l'amélioration de la zone de jointement pâte-granulat et à la consommation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour donner plus de gel C-S-H.

Les ajouts pouzzolaniques comme le verre trempé, permettent aussi la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Lors de la fabrication du clinker une grande énergie est dépensée et un taux élevé de CO_2 est dégagé. Sur ce, la substitution d'une partie de ciment par le verre trempé apportera un plus dans la sauvegarde de l'écosystème en réduisant la quantité de CO_2 provenant de la décarbonatation du calcaire lors de la fabrication du clinker. Néanmoins, il est intéressant de suivre l'évolution de la résistance à la compression au-delà des 28 jours.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques :

[1] cours TMC Annaba.

[2] « cour matériaux de construction » univ of Batna 2.

[3] I.Mokrani, K.galoul « Etude d'un mortier avec ajout des grignons d'olives comme substitution au sable » mémoire fin d etude 2022 univ de Bejaia.

[4] fiche techniques « les conditions des bétons et des mortiers » cimbéton centre d'information sur le ciment est ses application. (Livre DUPANT).

[5] « cours matériaux des constructions » Prf chelouah Nasser. Univ de bejaia.

[6] Elodie NAULEAU « Evolution au cours du temps des propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires d'un puits géothermique basse énergie. » thèse de doctorat univ paris est 2013.

[7] Kattab R. valorisation de sable de d'une Thèse doctorat, Alger : ENP(2007).

[8] Dupain.R, L'Anchor, Saint-Arroman.J.C, « Granulats, Sols, Ciments et Béton»,Edition A.Capliez ,Paris 2004.

[9] Drissi.M « Comportement des bétons : expérimentation et modélisation des paramètres technologiques influant les propriétés physico-chimiques, mécaniques et rhéologiques des bétons frais et durcis » Thèse Doctorat univ biskra 2018.

[10] [infociment « les adjuvantes : pour des béton à l'épreuve des chantiers et du temps ».

[11] K.Bettarcha,A.bouabdelli « VARIATION DU DOSAGES D'UN SUPERPLASTIFIANT SUR LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION DU BÉTON » UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET.

[12] Babatounde Laibi. Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses. Chimie inorganique. Normandie Univer- sité; Université d'Abomey-Calavi (Bénin).

[13] M.S. BOUGLADA (CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE ET MICROSTRUCTURALE DES AJOUTS MINÉRAUX) ; THESE DE DOCTORAT AVRIL 2019 ; UNIVERSITE BATNA 2 MOSTEFA BEN BOULAIID.

[14] A.BELHOCINE/N.NAGOUDI (ETUDE EXPERIMENTALE D'UN MORTIER AVEC AJOUTS MINÉRAUX) ; MEMOIRE DE MASTER 2013/2014 ; université KASDI MERBAH-OUARGLA.

Références Bibliographiques

- [15] : BENIA.M « Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux » Mémoire de magister université Mohamed Boudiaf de m'sila.
- [16] M. Si-ahmed, “Formulation et comportement d’un béton fluide à base de granulats recyclés de brique, Thèse De Doctorat,” Université Saad Dahleb Blida, 2018.
- [17] Mémoire de fin d’étude A.FATOUH « Le ciment et les ajouts cimentaire » UNIVERSITE ZIANE ACHOUR DE DJELFA 2011.
- [18] S.REFRAFI « influence des ajouts sur les caractéristiques physicomécanique des mortiers et des bétons m » mémoire de magister univ mohmed khider biskra.
- [19] ENP Projet de fin d’études en vue de l’obtention du diplôme d’Ingénieur d’Etat en Génie Civil « Etude des bétons à la poudre de verre ».
- [20] BELBACHIR .N « Etude des propriétés mécaniques à court terme de béton à base de ciment pouzzolanique de synthèse » mémoire de magister univ abdl hamid ibn badis mostaganem 2012.
- [21] Mhamed Adjoudj. Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Cergy Pontoise ; Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie).
- [22] Z. Bajja.these doctorat Influence de la microstructure sur le transport diffusif des pâtes, mortiers et bétons à base de CEM I avec ajout de fumée de silice. Génie civil. Université Paris Saclay (COMUE), 2016.
- [23] Mémoire de magister Taguer « Contribution de l'addition minérale sur les caractéristiques physico-mécaniques des liant est mortier » univ mohammed khider biskra 2007.
- [24] mémoire de magister K.salhi « Etude de l’influence de l’ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton » univ mouhammed khider biskra 2007.
- [25] Jérôme.D, Les fiches « Un point sur » Récupérer sur : [www.Lactualitechimique.org/spip-
php-rubrique11](http://www.Lactualitechimique.org/spip.php-rubrique11).
- [26] k.belaidi « pulvérisation de matière chimiques sur le verre » mémoire fin d’étude ENP 2015.
- [27] M.baazouzi « Elaboration et caractérisation des verres d’oxydes à indice de réfraction complexe pour application dans l’optique non linéaire » these doctorat.

Références Bibliographiques

- [28] O.Gridi « Caractérisation opto-mécanique du verre traité par des méthodes thermo-chimiques. Matière Condensée [cond-mat]. Université Polytechnique Hauts-de-France ; Université Ferhat Abbas (Sétif, Algérie), 2021. Français.
- [29] « Une vie de verreExpériences sur l'élaboration et les propriétés d'un matériau » par J-L. VIGNES, I. BEURROIESCentre de Ressources Pédagogiques en Chimie : Économie - Industrie - EXC-1 ENS de Cachan - 94235 Cachan Cedex et CECM-CNRS - 94400 Vitry-sur-Seineet D. GUIGNARD.
- [30] benchabane.T thèse de doctorat « comportement des bétons innovants à base de granulats de verre recyclés renforcés par textiles « TRC » » ; universite mouloud mammeri de tizi-ouazou.
- [31] thèse doctorat L.younes « Etude des contraintes d'indentation dans les verres silico-sodocalciques » univ.ferhat abbas setif 1 2020.
- [32] Stephen R. Ledbetter 1 ; Andrew R. Walker 2 ; and Alan P. Keiller « Structural Use of Glass » JOURNAL OF ARCHITECTURAL ENGINEERING © ASCE / SEPTEMBER 2006.
- [33] « Mesures 3D par stéréo-vision de la déformation d'un verre feuilleté sous impact rigide »Corentin Le Gourrierec, Xuyang Chang, Bastien Durand, Richard Villey, Xavier Brajer, Stéphane Roux.
- [34] « ARCHITECTURAL GLASS : TYPES, PERFORMANCE AND LEGISLATION » J. SAVIĆ, D. □URIĆ-MIJOVIĆ, V. BOGDANOVIĆ.
- [35] S.m seghir « Valorisation de débris de verre dans les infrastructures routières :Application au verre industriel, verre ménager et verre mixte »ummot.
- [36] B.mohammed K. mohammed « Effet de remplacement partiel de ciment par poudre de verre ou charbon actif à base de noyau de dattes sur les performances du mortier » mémoire fi d etude. univ kasdi merbah ouargla.
- [37] www.wikipedia.org
- [38] “ History and Manufacturing of Gla “Armin Berenjian*, Gareth Whittlesto School of Engineering, University of Salford, Manchester, United Kingdom.
- [39] How is glass made? Read about toughened glass manufacture //www.breakglass.org
- [40] « Experimental Studies on Comparative Study of Replacement of Fine Aggregate with Toughened Glass “Mr. Huzaiifa Riyaz Ibushe, Mr. Suyog Vishnu Kumbhar, Mr. Rahej Badruddin Mulla, Mr. Bajirao V. Mane (Guide).
- [41] « Toughened Glass — Know Properties, Benefits, and Applications » récupère <http://www.aisglass.com>

Références Bibliographiques

[42] H.ismail, D ait-amrane « ETUDE DE L'INFLUENCE DES AJOUTS CIMENTAIRES SUR L'ACTIVITE POUZZOLANIQUE DES MORTIERS » mémoire fin d'étude univ de bejaia 2012.

[43] icmmo.universite-paris-saclay.fr

[44] récupéré <https://www.malvernpanalytical.com/fr>

[45] récupéré TP.DEMAIN.

[46] Polycopié de « MATERIAUX DE CONSTRUCTION 01 » Dr : Toufik BOUBEKEUR

[47]TP N 02 : confection du béton avec ajout d'additions minérales (addition de type II ;à caractère pouzzoulanique ou hydratation latent) ;DR : S.AREZKI ;master génie civil université de Bejaia

Annexes

Annexe A



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر
GROUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE
SOCIETE DES CIMENTS D'AIN EL KEBIRA
« S.C.A.E.K »

S.P.A au Capital Social de : 2 200 000 000,00 DA ش.ذ.أ. - رأس المال الاجتماعي

N° Identification fiscale : 0998 19008236319 / N° Article d'imposition : 1902.20.10.011 / N° Registre de commerce : 98 B 0082353

Réf: 0234 /DQ/DDDS/SCAEEK/2021

Ain El Kebira le : 03/08/2021

FICHE TECHNIQUE CIMENT « ligne 2 »

MOIS : Juin 2021

CEM II/A - L 42.5 N

Conformément à la norme NA 442 édition 2013 « NF EN 197-1 : 2012 »

COMPOSITIONS CHIMIQUES Norme (EN 196-2)			Essais physiques Norme (NF EN « 196-3 : 2017 et 196-6 : 2018 »)		Garantie NA 442 : 2013	Mesures
ELEMENTS	%	Mesures	P.S	(g / Cm ³)	/	3.09
SiO ₂ -T	%	20.69	SSB	cm ³ /g	/	3866
Al ₂ O ₃	%	4.73	Début De Prise	minute	≥ 60	213
Fe ₂ O ₃	%	3.92	Fin De Prise		/	328
CaO-T	%	60.35	Expansion A. Chaud	millimètres	≤ 10	0.23
MgO	%	1.31	Refus 45 μ	%	/	8.52
SO ₃	≤ 3,5%	2.02	Consistance Normale	%		27.76
K ₂ O	%	0.32	Type d'ajout	Calcaire (L) %	06 ≤ L ≤ 20	15.8
Na ₂ O	%	0.13	S.C.A.E.K			
Cl	≤ 0,1%	0.02				
P.A.F.	%	6.51				
CaO Libre (PT207 CERILH 1970)	%	1.09				
R.Insoluble	%	3.22				
COMPOSITION POTENTIELLE DU CLINKER (BOGUE)			CARACTERISTIQUES MECANIQUE Norme (NF EN 196-1 : 2016)			
C ₃ S	%	55.46	R. Flexion (MPa)	02 JOURS	/	4.05
C ₂ S	%	18.85		28 JOURS	/	7.93
C ₃ A	%	8.56	R. Compression (MPa)	02 JOURS	Li ≥ 10.0	16.62
C ₄ AF	%	12.43		28 JOURS	Li ≥ 42.5	49.02

Le chef de service contrôle de qualité

K. BELARBI
 Chef de Service
 Contrôle Qualité

CB



SIEGE SOCIAL : Ouled Adouano, BP 01 Aïn El Kebira (W.Sétif) Algérie
 Direction Générale : Tel : (036) 82.83.39 / (036) 82.83.41 – Fax : (036) 82.83.46
 Unité : Tel : (036) 60.80.80 / (036) 60.82.82 / (036) 60.83.83 – Fax : (036) 60.81.81
 Site Web : www.scaek.dz

Annexe B

La norme	L'intitulé
EN 196-7	Essai de prise de ciment
NF P 18-560	Essai granulométrique par tamisage
NF P 18-540	Définitions, conformité, spécifications (Module de finesse)
NF P 94-050	Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.
NF EN 933-9	Qualification des fines - Essais au bleu de méthylène
EN 933-2	Détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures
NF EN 933-8	Évaluation des fines - Équivalent de sable
EN 932-2	méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire
NFP 15-411	Malaxeur de confection des mortiers
NF P18-408	Essai à la flexion
NF EN 206-1	Essai compression

Annexe C



EURL - ALGIC GROUPE D'INGENIEURS CONSEIL
ETUDES ET REALISATION DOMAINE TRAVAUX PUBLICS

PROCES-VERBAL DE L'ANALYSE CHIMIQUE DU VERRE TROMPE

Echantillon	% Insolubles	% gypse	% sulfates	% CaCO3	% CO2
Verre trompé	97.4792	Néant	Néant	1,4957	0,6530

Echantillon	% chlorures	PH	% MO
Verre trompé	0.5477	13.8	0.0868

Etabli par

D. MEDDAD

Le Directeur

