République Algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de la Matière

Filière Génie Civil

Mémoire de Fin d'Etude Pour l'obtention du diplôme de Master

En Génie Civil

Option : Construction et Matériaux

THEME

L'Étude de La durabilité du mortier avec du verre recyclé

Dirigé par :

Dr : Ben tchickou.M

Etudié par :

Mr : Kochida othmane

Mr : Melikaoui abdenour

Promotion 2015/2016


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Nous remersions avant tout, ***« Dieu »*** *le tout puissant,pour nous avoir permis de présenter ce modeste travail.*

Nous tenons à exprimer nos vifs Remerciements et notre profonde Gratitude à notre promoteur Ms.bentchikou.mohamed pour sa disponibilité,son aide durant tout le déroulement de ce projet. Grâce à son dévoument, conseils scientifiques et suivis, nous avons pu mener à terme notre travail.

On remercie aussi M.rahel zahira et zerouak selma, ingeniuer de laboratoire du Génie Civil pour son aide pendant les essaies réalisés au niveau de laboratoire.

Nous tenons à remercions tous les étudiants du 2ème année Master pour l eurs informations et surtout :boukerma, mechentel et kadre.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil qui nous ont offert tout ce savoir.

Nous les dit merci de tout notre coeur.

© Ladia Lynn

Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم

C'est avec trés grand honeur que je dédie ce modeste travail à :

Au premiére lieu, nous tenous à remmercier « ALLAH »qui nous a donnée le courage et la volonté Pour terminer ce travail .

Voici ma mére écrit beaux mots et expressions et formulé la meilllure à la veille s'il vous plait briser stylos et les pleurer pour son incapacité à concervoir votre droite.

Voici mon pére chaque goutte de seurer est venu à vous et votre peine sur les paumes de mon éducation et a toujours tendu une main secourable à moi à tout moment et faire pas des phrase exprime l'tendue de mon amour et de gratitude.

A mes grande parents que je la souhaite une longue vie.

A ma chère sœurs , qui toujour tendu une main secourable à moi tout temps et nos frérs dans le champs de fleur et des sourires pour toutes les saisons et aveugle sur le sens de la vie est belle je vous sohaite beaucoup de succés dans votr vie .

A mes chèree sœurs meriem, hadjar ,qui se réjouit mon cœur toujour frais et j'espére que ses paroles d'ALAH tout puissant qui le protège et l'aider dans ses études.

A mes chère frères oussama, abdellah ,billal ,qui m'a toujours en seigné qu la vie est belle et la substance beau sourire et qui ne laisse pas de votre visage et j'espére ètre toujours le meilleur.

A toute la famille « melikaoui»Sans exception.

Je remercie mon ami et collège dans ce travail, abdenour qui a contribué à la réalisation de ce Modeste travail et à toute son famille.

A mes amies : kader, abdellah, tarek, walid, abdellkader, ,leila , ……. et tous mes amis qui on partagé avec moi Les bonnes et les mauvais moments à l'université.

A tous mes collègues de 2éme années Master génie civil « Matériaux de construction, Géotechnique, Structure ».

Enfin ; Je dédie : A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

othmane

Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم

C'est avec trés grand honeur que je dédie ce modeste travail à :

Au premiére lieu, nous tenous à remmercier « ALLAH »qui nous a donnée le courage et la volonté Pour terminer ce travail .

Voici ma mére écrit beaux mots et expressions et formulé la meilllure à la veille s'il vous plait briser stylos et les pleurer pour son incapacité à concervoir votre droite.

Voici mon pére chaque goutte de seurer est venu à vous et votre peine sur les paumes de mon éducation et a toujours tendu une main secourable à moi à tout moment et faire pas des phrase exprime l'tendue de mon amour et de gratitude.

A mes grande parents que je la souhaite une longue vie.

A ma chère sœurs , qui toujour tendu une main secourable à moi tout temps et nos frérs dans le champs de fleur et des sourires pour toutes les saisons et aveugle sur le sens de la vie est belle je vous sohaite beaucoup de succés dans votr vie .

A ma chère sœurs amel, ,qui se réjouit mon cœur toujour frais et j'espére que ses paroles d'ALAH tout puissant qui le protège et l'aider dans ses études.

A mes chère frères tarek,billal ,hamza qui m'a toujours en seigné qu la vie est belle et la substance beau sourire et qui ne laisse pas de votre visage et j'espére ètre toujours le meilleur.

A toute la famille «kochida»Sans exception.

Je remercie mon ami et collège dans ce travail, othmane qui a contribué à la réalisation de ce Modeste travail et à toute son famille.

A mes amies : kader, abdellah, tarek, walid, abdellkader,leila , ……. et tous mes amis qui on partagé avec moi Les bonnes et les mauvais moments à l'université.

A tous mes collègues de 2éme années Master génie civil « Matériaux de construction, Géotechnique, Structure ».

Enfin ; Je dédie : A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

abdenour

Résumé

ملخص

من النفايات الرئيسية التي نجدها بكثرة في الحياة اليومية هي بلا شك النفايات الزجاجية، إلقائها في المحيط يشوه الطبيعة و يبقى متواجد لسنين طويلة و لهذا وجب إعادة تصنيعها . تجرى حاليا بحوث مهمة في مخابر عديدة لتسليح الخرسانة بالنفايات الزجاجية.

في هذا الإطار يهدف مشروعناإلى إستعمال النفايات الزجاجية المعاد تصنيعها في تصنيع الملاط ،حيث نستبدل جزء من الرمل بنفايات الزجاج بنسب: 25% ، 35% ، 50% ، 75%و كذلك بإضافة حصى الزجاج بمقابل 10, 20 و30% بالنسبة لكتلة الرمل في الملاط.

خصائص الحالة الطازجة(السيولة ,الهواء الداخلي ,الكثافة) والحالة الصلبة (مقاومة الضغط ,التغيرات البعدية , الامتصاص الأنبوبية) لمختلف أنواع الملاط المطبق عليه اختبارات الديمومة المتسارعة عبر التمييه و التجفيف تم تحليلها و مقارنتها .

النتائج المتحصل عليها اثبتت ان المقاومة تتناقص مع نسب استبدال الرمل بالزجاج و كذلك مع زيادة الزجاج كاظافة .

مقاومة الملاط تتناقص مع عدد دورات التهالك وهذا الانخفاض يقدر ب % 37 بعد20 دورة لأجل كل النسب المستبدلة مقارنة بالنسبة للمراجع C0 و34%لكل نسب الزجاج المضافة.

Résumé

Parmi les principaux déchets les plus retrouvés dans notre vie quotidienne, sans doute, les déchets de verre, leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est, dans la plupart des cas, faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage. Des recherches très importantes sont en cours dans beaucoup de laboratoires afin de renforcer le mortier à l'aide des déchets de verre.

Dans ce contexte, ce projet à pour but la valorisation par le recyclage des déchets de verre dans le mortier. Pour cela, on formule les composites de mortier par le remplacement du sable avec des déchets de verre à différents taux de substitution (25% 35% 50% 75%) et aussi par ajout de granulats de verre recyclés à des taux de 10, 20 et 30% par rapport à la masse de sable.

Les propriétés à l'état frais (maniabilité, air occlut et densité) et à l'état durci (Résistance à la compression, variation dimensionnelle, absorption capillaire) des différents mortiers réalisés soumis à des tests de durabilité accélérée de mouillage-séchage sont analysées et comparées.

Les résultats expérimentaux confirment que la résistance diminue avec le pourcentage de substitution et aussi avec le taux d'incorporation du verre comme qu'ajout.

La résistance du mortier diminue avec le nombre de cycles de vieillissement et cette chute est évaluée à 37% après 20 cycles pour tout les pourcentage de substitution (C20) par rapport aux témoins (C0) et de 34% pour tout les pourcentage d'ajout.

Abstract

Among the main wastes fond in our daily life are waste glass, their dissemination in the nature is durable and Unaesthetic because there biodegradability is, in most cases, weak. it is why it is interesting to encourage their recycling. Some very important research is in progress in a lot of laboratories in order to reinforce the mortar with the waste glass.

In this context, the aim of this project is the valorization of waste glass in the mortar.

we prepare mortars by substituting sand glass with at different percentages in relation to the mass of sand. values of these percentages are: (25% 35% 50% 75%). moreover we formulate mortar by addition of glass aggregate in proportion of 10, 20 and 30%.

Properties at fresh state (workability and density) and at hardened state (compressive strength, capillary absorption, dimensional variation) of different Mortar subjected to accelerated durability tests is analyzed and is compared.

The resistance of the mortar decreases with the number of cycles of ageing and this fall is estimated at 37 % after 20 cycles for all substitution rate (C20) with regard to reference (C0) and of 34 % for all percentage of addition.

Sommaire

Sommaire

Remerciement

Résumés

Sommaire

Liste des figures

Liste des Tableaux

Natation et Abréviation

Introduction Générale

CHAPITRE I : synthèse bibliographique

I.Introduction 1
I.1. le mortier.....1
I.1.1 Introduction 2
I.1.2.Composants de mortier 3
I.1.2.3. Eau 4
I.1.2.4. Les adjuvants 5
I.1.3.types de mortier 6
I.1.3.1.Mortier de ciment 6
I.1.3.2.mortier de chaux 7
I.1.3.3.Mortiers bâtards 9
I.1.3.4.mortier colle 9
I.1.3.5. Mortier rapide 10
I.1.3.6.Mortier fabriqué sur chantier 10
I.1.3.7.Mortier industriel 10
I.1.3.8.Mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi 11
I.1.3.9.Mortiers de fibres 12
I.1.4.Domaines d'utilisation des mortiers 12
I.1.4.2.Enduits 12
I.1.4.3.Joints de maçonnerie 12

I.1.4.4.Scellements et calages 13
I.1.4.5.Mortiers et coulis de réparation 13
I.1.5.Caractéristiques principales 13
I.1.5.1.Ouvrabilité 13
I.1.5.1.1.La table à secousses 13
I.1.5.1.2.Le maniabilimètre du LCPC 14
I.1.5.1.3.Le cône 14
I.1.5.2. Prise 14
I.1.5.3.Retraits et gonflements 15
I.2. les verres 15
I.2.1.Historique. ..... Erreur ! Signet non défini.16
I.2.2.Définition du verre 16
I.2.3.Les propriétés du verre 16
I.2.3.1.Propriétés physiques 16
I.2.3.2.Propriétés thermiques 16
I.2.3.3.Propriétés chimiques 17
I.2.4.La composition du verre 17
I.2.5.Les différents types de verre.....18
I.2.6.Domaine d'application du verre 19
I.3. Les déchets de verres 22
I.3.1.Définition 23
I.3.2.Les types de déchets de verres 23
I.3.3.les chiffres (quantité) de déchet de verre 23
I.4.les mortiers à base de déchet de verres 24
I.4.1.les caractéristiques des mortiers à basse de déchets de verres 24
I.5.La durabilité.....26
I.5.1.Indicateure de durabilite 26
I.5.3 Quelque travaux sur la durabilité des mortier 26
I.6.Conclusion. 28

CHAPITRE II : *Matériaux et essais*

II. Introduction 29
II.1 Programme expérimental et Protocole d'essais 29
II.1.1 Introduction 29
II.1.1.1.Le ciment 29
II.1.1.2. Le sable 30
II.1.1.3. L'eau de gâchage 32
II.1.1.4.Les granulats du verre 32
II.1.2 Protocol d'essais 34
II.1.3 préparation des matériaux 34
II.1.4 Confection et Cure des éprouvettes 34
II.1.5 Composition des mortiers 35
II.1.6 Malaxage des mortiers 36
II.2 les essais 37
II.2.1 Equipement nécessaire 37
II.2.2 Les essais effectuent sur les granulats 37
II.2.3 Les essais effectués sur le mortier 39
II.3. cycle sechage-mouillage 47
II.4.Conclusion 49

CHAPITRE III *: Résultats et interprétations*

III. Introduction 50
III.1 Caractérisation des mortiers 50
III.1.1 Résultats des essais pour le mortier à l'état frais 51
III.1.1.1 Masse volumique 51
III.1.1.2 Air oclus 51
III.1.1.3 ouvrabilite 51
III.1.2. Résultats des essais pour le mortier à l'état durcit 53
III.1.2.1 resistance a la compression 54
III.1.2.2 absorption d eau par capillaire 55
III.1.2.3 variation dementionnelle 57
III.2 Conclusion 58

Liste Des figures

Les figures

N°	Titres	Pages
Figure I.1	Table à secousses	**13**
Figure I.2	La fluidité de mortier de verre	**23**
Figure I.3	la densité frais de mortier de verre	**24**
Figure I.4	résistance à la traction par flexion des mortier de verre	**24**
Figure II.1	ciment mâtine	**27**
Figure II.2	Les sables utilisés.	**28**
Figure II.3	La courbe granulométrique des sables utilisée	**30**
Figure II.4	Les granulats de verre	**31**
Figure II.5	Courbes granulométriques de granulats du verre et du sable corrigé	**31**
Figure II.6	Conservation dans l'eau a20 °C±2°C.	**33**
Figure II.7	Le cône et le récipient	**36**
Figure II.8	Les éprouvettes de mesure	**37**
Figure II.9	Procédure de mesure de l'équivalent de sable	**46**
Figure II.10	Série de tamis	**38**
Figure II.11	Maniabilimètre à mortier avec la tige de piquage.	**38**
Figure II.12	Etat du mortier avant et après mesure du temps d'écoulement	**40**
Figure II.13	Aéromètre à mortier.	**40**
Figure II.14	Dispositif pour l'essai de résistance à la traction	**41**
Figure II.15	Presse Hydraulique (2000kN).	**43**
Figure II.16	Dispositif de rupture à la compression.	**44**
Figure II.17	Absorption d'eau par capillarité.	**44**
Figure II.18	Rétractomètre et son étalonnage.	**45**
Figure II.19	Cycles sechage-mouillage	
Figure II.20	Diagramme des matériaux de base utilisés pour la fabrication des mortiers et essais	**48**
Figure III.1	masses volumiques des mortiers avec substitution	**50**
Figure III.2	masses volumiques des mortiers avec ajout	**51**
Figure III.3	Air occlus des mortiers pour substitution réalisés	**51**
Figure III.4	Air occlus du mortier de verre comme ajout.	**52**
Figure III.5	Variation du temps d'écoulement pour E/C= 0,5 maintenu constant	**52**
Figure III.6	Variation de la résistance à la compression du mortier pour substitution	**53**
Figure III.7	Variation de la résistance à la compression du mortier pour ajout	**54**
Figure III.8	Absorption d'eau des mortiers (témoins+ mortiers de verre) pour E/C cst.	**55**
Figure III.9	Absorption d'eau pour les mortiers de verre avec ajout.	**56**
Figure III.10	variation dimensionnelle du mortier pour substitution avant Trempe.	**56**
Figure III.11	variation dimensionnelle du mortier pour substitution avant étuvage	**57**
Figure III.12	variation dimensionnelle du mortier pour ajout avant Tremp.	**57**
Figure III.13	variation dimensionnelle du mortier pour ajout avant étuvage.	**58**

Liste
Des tableaux

Les tableaux

N°	Titres	Pages
Tableau I.1	Les proportions sont indicatives, elles dépendent directement du type de ciment et du type de travail.	**7**
Tableau I.2	les avantages de mortier de chaux	**8**
Tableau II.1	. L'analyse chimique du ciment et composition du clinker	**28**
Tableau II.2	Caractéristiques des sables utilisés	**29**
Tableau II.3	Les caractéristiques physiques des granulats	**31**
Tableau II.4	Les limites du temps d'écrasement	**33**
Tableau II.5	Compositions des différentes familles de mortiers réalisés par substitution.	**33**
Tableau II.6	Compositions des mortiers réalisés par ajout.	**34**
Tableau II.7	Opérations de malaxage du mortier sans granulat de verre	**34**
Tableau II.8	Opération de malaxage avec granulat du verre.	**35**

Notations

Notations

D : La dimension du plus gros granulat

M : La masse

V : Volume

C : Compacité

P : Porosité

I : Indice des vides

ES : Equivalent de sable à piston

ESV : Equivalent de sable à vue

Cu : Le coefficient d'uniformité

Cc **:** Le coefficient de courbure

M f : Le module de finesse

CPA : Le ciment portland artificiel

CPJ : Le ciment portland composé

NF : Norme française

EN : Norme européenne

SiO_2 : dioxyde de silicium

Na_2CO_3 : carbonate de sodium

CaO : La chaux

Al_2O_3 : L'alumine

Fe_2O_3 : L'oxyde de fer

MgO: Oxyde de magnésium

Na_2O : oxyde de sodium

K_2O : oxyde de potassium

Cr : Crome

Co : Cobalt

TiO_2 : Dioxyde de titane

MnO : Oxyde de manganèse

B_2O_3 : Trioxyde de dibore

P_bO : Oxyde de plomb

P_2O_5 : Pentoxyde de phosphore

$Ca(OH)_2$: Hydroxyde de calcium

C4AF : Tetra-calcium aluminoferrite

NaOH : Hydroxyde de sodium

σ_{comp} : contrainte de compression

σ_{tr} : Contrainte de traction

E : Module d'élasticité

Λ : coefficient de conductivité thermique

K : Coefficient de transmission de la chaleur

ϱ_{app} : Masse volumique apparente

ϱ_{abs}: Masse volumique absolue

R_t : La résistance a la traction

R_C : La résistance a compression

Δ**L :** Variation de longueur par apport à la longueur origine

L : Longueur de base, prise égale à 160mm

Δ**M :** Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage

M0 : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge

I : Moment d'inertie de la section transversale

ν : La distance de la fibre la plus éloignée

E : Dosage en eau

E/C : Rapport eau /ciment

Eν : L'absorption d'eau sous vide

SR: Sable roulé

SC: Sable concassée.

MGVR : Mortier à base de granulat de verre recyclé

MTsc : Mortier témoin à base de sable corrigé

S25% : Mortier de substitution par **25%** de verre

S35% : Mortier de substitution par **35%** de verre

S50% : Mortier de substitution **50%** de verre

S75% : Mortier de substitution par **75%** de verre

A10%: Mortier **+10%** Ajout de verre

A20% : Mortier **+20%** Ajout de verre

A30% : Mortier **+30%** Ajout de verre

S25C20 : Mortier de substitution par **25%** de verre cycles **20**

S 35C20 : Mortier de substitution par **35%** de verre cycles **20**

S50C20: Mortier de substitution **50%** de verre cycles **20**

S75C20 : Mortier de substitution par **75%** cycles **20** de verre cycles **20**

A10%: Mortier **+10%** Ajout de verre cycles **20**

A20% : Mortier **+20%** Ajout de verre cycles **20**

A30% : Mortier **+30%** Ajout de verre cycles **20**

Introduction générale

Introduction général

S'abriter, se protéger de la nature, était et restera pour toujours le souci de l'être humain. Durant son parcours sur terre, il utilisait tous les matériaux que la nature lui offrait à leurs états bruts ou après transformations et traitements (chimiques, physiques, mécaniques ou complexes) pour bâtir l'abri résistant, confortable, et durable en coûts réduits. Le cumule des connaissances acquises au cours de sa recherche permanente pour la concrétisation de cet objectif a permis la mise au point de différents matériaux et composés. L'un des composés fruit de ces recherches est le béton.

Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre les différents éléments de construction en bâtiment au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de solidariser les éléments entre eux ,et d'assurer la stabilité de l'ouvrage.

Notre projet est une contribution à la valorisation des déchets de verre pour être utilisé comme granulats dans le mortier et de voir l'influence de ce déchet récupéré introduit une fois comme substitution d'une masse du sable et une autre fois comme ajout, sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers qui seront soumis à des cycles de vieillissement de séchage-mouillage.

Ce travail est structure comme suite :

Le premier chapitre fait l'objet d'une synthèse bibliographique concernant les mortiers, les verres, les mortiers à base de déchet verre.

Pour le deuxième chapitre on présente la caractérisation des matériaux de base et les méthodes d'essais, ainsi que les modes opératoires des différents essais effectués sur mortier.

Dans le troisième chapitre on enchaine par la présentation des résultats expérimentaux relatifs au mortier frais et durci, suivi par des commentaires et des interprétations.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I. Introduction

Les matériaux cimentaires, très répandus dans divers domaines, se trouvent soumis à différentes sollicitations au cours de leur vie. Par définition, un matériau est dit cimentaire dès lors que le liant est un ciment. Le béton et le mortier sont des matériaux cimentaires très utilisés dans la construction. Le béton est composé de ciment, d'eau et de granulats naturels, - et le mortier est composé de sables, de ciment et d'eau.

Aux composants de base, on voit associé au béton et mortier conventionnels d'autres constituants (ajouts, granulat…, fibres…). d'autre part, la valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux.

La récupération des déchets a deux impacts très importants, l'impact environnemental qui permet de se débarrasser ces déchets et l'impact économique qui concerne la réutilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec faible valeur marchande **[1].**

Le verre est l'un des matériaux largement recyclé. Son recyclage pour la fabrication de nouveaux verres n'est actuellement pas économiquement viable. Ceci explique la recherche d'autres débouchés que le stockage ou l'enfouissement en décharges. L'une des applications envisageables est sa valorisation dans la fabrication des ciments et des bétons.

I.1 le mortier

I.1.1 Introduction

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc.… Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau et éventuellement un adjuvant , pour obtenir un mortier ou béton en gâchant dans un malaxeur des proportions convenables de ciment, d'eau et de granulats avec éventuellement un ou plusieurs adjuvants.

C'est la dimension D du plus gros granulat qui détermine l'appellation mortier pour $D \leq 4$ mm et béton pour $D \geq 4$ mm.

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier et le ciment, l'eau et l'adjuvant forment la pate liante. Lorsqu'il n'ya pas de squelette granulaire, on parle de pate pure de ciment.

Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont en fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

Les mortiers peuvent être :

- Préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant, les différents constituants, adjuvants compris.
- Préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs pré-dosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire) ;
- Livrés par une centrale : ce sont des mortiers prêts à l'emploi, dont les derniers nés, les mortiers retardés stabilisés, ont un temps d'emploi supérieur à 24 heures. **[1].**

I.1.2.Composants du mortier :

Selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure, on distingue des mortiers qui peuvent être très différents les uns des autres **[1].**

Le mortier permet aussi bien de réaliser des chapes, d'enduire des murs, de coller, de reboucher ou encore de sceller. Il s'agit d'un mélange qui se compose :

- **d'un liant :** un produit qui se solidifie, par contact avec l'eau (liant hydraulique) ou par action de l'air (liant aérien). Il existe aussi des liants à base de résines. (le type le plus utilisé dans les constructions modernes est le ciment).
- **de granulats fins (sable) :** les constituants du produit, d'origine minérale. Il s'agit de sable dans le cas du mortier, autrement dit des roches minérales désagrégées ou broyées.
- **d'eau :** elle permet d hydrater les grains de ciment pour donner toute la prise au mortier.
- **éventuellement d'adjuvants :** des produits chimiques incorporés à faible dose pour modifier les caractéristiques du mortier.
- **éventuellement de pigments :** pour donner de la couleur.

I.1.2.1 Les liants :

Le ciment est une matière pulvérulente, à base de silicate et d'aluminate de chaux, obtenue par cuisson, en proportions variables selon les matières premières utilisées :

- silicate tricalcique, ou C3S (3 CaO, SiO2),
- silicate bicalcique, ou C2S (2 CaO, SiO2),
- aluminate tricalcique, ou C3A (3 CaO, Al2O3),
- aluminoferrite tricalcique, ou C4AF (4 CaO, Al2O3, Fe3O3).

Les matières premières essentielles sont la roche calcaire et l'argile. Elles sont broyées et éventuellement additionnées de produits secondaires. Le mélange obtenu s'appelle le cru et est composé d'environ 80 % de calcaire et d'environ 20 % d'argile. **[2].**

- Généralement, on peut utiliser :
- Les ciments normalisés (gris ou blanc) ;
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)
- Les liants à maçonner ;
- Les chaux hydrauliques naturelles ;
- Les chaux éteintes.

Différents types de ciments :

Ciments naturels :

Obtenus par cuisson de roches calcaires contenant 20 à 40 % d'argile. Ils sont à prise rapide ou demi-lente et ne conduisent pas à des résistances finales élevées Exemple : les ciments prompts.

Ciments artificiels

Ce sont les ciments portland.

Ce sont les liants les plus importants et les plus employés dans la construction actuelle :

Ils sont à prise lente et on distingue les catégories suivantes :

- **CPA :** Ciment Portland artificiel (97% clinker plus des fillers) ;
- **CPJ :** Ciment Portland composé (65% clinker plus des ajouts) ;
- **CHF :** Ciment de haute-fourneau (40% à 75% laitier plus du clinker) ;
- **CLK :** Ciment de laitier au clinker (80% laitier plus du clinker). **[2].**

I.1.2.2 Les sables :

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés "sable normalisé". Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle

important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être :

- Naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire ;
- Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- Spéciaux (lourds, réfractaires, légers) :
- Sable de laitier ;
- Sable d'oxydes de fer, de chromite ;
- Sable de briques concassés ;
- Liège torréfié ;
- Polystyrène expansé ;
- Vermiculite, perlite.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est :

- Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire) ;
- Fins : jusqu'à 1,6 mm ;
- Moyens : jusqu'à 3,15 mm ;
- Gros : jusqu'à 5 mm.

on note que les dosages pour le mortier s'entendent avec du sable sec. Mais celui-ci s'achète humide en général. Vous devez donc prendre en compte le foisonnement de votre sable, c'est-à-dire son gonflement à cause de l'humidification. Il faut ajouter 20 % environ au volume du sable sec pour obtenir la quantité en sable humide. Ainsi, 20 litres de sable sec équivalent à 24 litres de sable humide.

I.1.2.3 Eau :

L'eau remplit un double rôle : elle sert à hydrater le ciment, et, ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Il convient de noter que les exigences relatives à l'eau de gâchage diffèrent beaucoup pour les mortiers et le béton. Dans le cas du béton, un faible rapport eau-ciment est préférable. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de

produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

Comment doser l'eau du mortier ?

C'est l'eau qui assure la prise du ciment et de la chaux. Elle donne aussi sa consistance au mortier. on doit choisir une eau propre et pure. Sinon, les différents débris risquent d'apparaître à la surface de votre mélange quand il sera sec. L'eau du robinet, ou venant d'une source potable, suffit en général. A moins qu'elle ne soit particulièrement riche en fer.

Le dosage en eau, correspond généralement au poids du liant, divisé par deux. Soit 10 litres d'eau environ si vous utilisez 20 kilos de liant. Si le mortier est trop sec, il ne collera pas bien. Si au contraire il s'avère trop humide, il coulera et sèchera mal.

I.1.2.4 Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants :

- Les plastifiants (réducteurs d'eau)
- Les entraîneurs d'air
- Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs) ;
- Les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

De nombreux adjuvants sont employés pour les mortiers de maçonnerie et dans certains cas leur emploi est certainement avantageux. Cependant, leur emploi n'est en général pas recommandé.

I.1.2.5 Couleurs – Colorants :

On peut donner de la couleur au mortier par des granulats ou des pigments minéraux. Ces derniers devraient avoir la composition d'oxydes minéraux et ne pas représenter plus de 6 % du poids du ciment portland. Le noir de carbone ne devrait pas représenter plus de 2 %. On

doit soigneusement choisir les pigments et ne pas en employer plus qu'il n'en faut pour obtenir la couleur désirée **[1].**

I.1.3.Types de mortier :

Dans les travaux publics et les Travaux de bâtiment on utilise plusieurs types de mortier selon l'ouvrage à réaliser et de son environnement **[2].**

I.1.3.1 Mortier de ciment

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35 Les dosages courants sont de l'ordre de 300 a 400 kg de ciment pour 1 m^3 de sable.

Ils sont fabriqués à partir de ciment, notamment du type Portland ou Portland composé.

Mortier ciment et résistance du ciment :

Il existe trois classes de résistance normale à 28 jours : 32,5, 42,5 et 52,5, et une lasse à laquelle on ajoute une sous-classe R de résistance à court terme : 2 ou 7 jours. **[2].**

Mélange de mortier-ciment (tableau I.1):

***Proportions :**

Le ciment ne s'utilise pas seul, à quelques exceptions prêts :

- le scellement,
- le rebouchage,
- le jointoiement.

Tableau I.1 Les proportions sont indicatives, elles dépendent directement du type de ciment et du type de travail. **[2].**

MORTIER CIMENT : LE MÉLANGE	
TYPE D'UTILISATION	**PROPORTIONS**
SCELLEMENT / REBOUCHAGE	Ciment : 3 volumes. Eau : 1 volume.
JOINTOIEMENT	Ciment : 1 volume. Eau : 0,5 volume.
MORTIER	Ciment : 1 volume. Sable : 2 ou 3 volumes (selon le type de travail). Eau : ¾ volume.

I.1.3.2 mortier de chaux :

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique

Ils se composent, comme leur nom l'indique, de chaux. Ce type de mortier durcit plus lentement, se travaille plus facilement mais n'est pas imperméable. Obtenue par calcination du calcaire, la chaux se divise en deux catégories principales. La chaux hydraulique, qui contient aussi de l'argile, durcit au contact de l'eau et de l'air. Elle possède des propriétés proches de celles du ciment. La chaux aérienne se solidifie sous l'action du gaz carbonique présent dans l'air.

Le mortier de chaux permet de lier des éléments de maçonnerie entre eux tout autant que la réalisation d'enduit à la chaux, de chape de chaux, de peintures, etc. Pour former un mortier à la chaux, la chaux doit être mélangée à une charge comme le sable. **[2].**

Nombreuses qualités techniques du mortier à la chaux

Le mortier à la chaux présente de nombreux avantages dans le domaine de la construction :

Tableau I.2 :les avantages de mortier de chaux

QUALITÉS	**DESCRIPTION** (AVANTAGES)
RESPIRANTE	Les murs « respirent », la chaux évacue la vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur. Elle favorise les échanges hygrothermiques.
BARRIÈRE À L'EAU	L'eau de ruissellement ne pénètre pas.
ISOLANTE	En épaisseur et/ou avec un ajout de matière (torchis), elle est un bon isolant thermique et phonique.
RÉSISTANTE	Par son cycle de vie, la chaux est résistante, un mortier chaux durcit sur plusieurs mois. Une croûte protectrice se forme au fil du temps, la chaux redevient « pierre calcaire ».
SOUPLE ET ÉLASTIQUE	Elle respecte les murs en pierres et ses mouvements, limitant les fissures et lézardes des enduits.
RÉSISTANTE AU FEU	En particulier la chaux aérienne.
FACILE À RESTAURER	Une maison ayant des enduits à la chaux peut « facilement » être restaurée en retirant une partie de l'enduit avant de le remplacer par un nouveau mortier à la chaux.
DÉCORATIVE	Offre une très grande palette de couleurs par l'ajout de pigments.

Pose du mortier à la chaux : quelques conseils

Pour qu'un mortier de chaux remplisse ses fonctions de protection, de liaison et de décoration, il doit être préparé et appliqué dans les règles de l'art :

- les fonds doivent être compatibles et parfaitement préparés : propres, sains et humidifiés la veille et le jour de l'application,
- les dosages du mortier doivent être rigoureux en particulier le dosage en eau,
- le séchage ne doit pas être trop rapide, protégez vos enduits du vent, du soleil direct et des intempéries,

- pour les mortiers chaux appliqués en extérieur, choisissez la bonne saison : printemps ou automne à température clémente, sans vent, peu de soleil et pas de pluie,
- pour les mortiers appliqués en intérieur : travaillez au printemps hors courants d'air, mais en veillant à assurer une bonne ventilation des lieux, sans chauffage ou peu.

I.1.3.3 Mortiers bâtards :

Les mortiers bâtards sont constitués par des mélanges de ciment et de chaux avec du sable, dans des proportions variables. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide. Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue **[2].**

I.1.3.4 .Mortier colle :

Le mortier colle regroupe la famille des mortiers adhésifs destinés à coller un revêtement comme :

- le carrelage,
- le dallage,
- certains blocs de maçonnerie.

Si le mortier colle est parfaitement adapté pour le collage des céramiques, il est tout de même possible de les coller à l'aide de mortier-ciment ou de mortier chaux sous certaines conditions **[2].**

Utilisation du mortier colle : murs et sols

Avec le mortier colle, on peut coller un revêtement sur :

- les murs intérieurs et extérieurs,
- les sols intérieurs et extérieurs.

S'il est possible d'utiliser un produit « extérieur » en intérieur, l'inverse n'est pas possible excepté pour les mortiers colle qui sont à la fois intérieur et extérieur. Idem pour le mortier colle sol, on peut l'utiliser au mur, mais pas l'inverse, excepté pour ceux étant sol et mur.

I.1.3.5. Mortier rapide :

Fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements.

Domaine d'application :

Le Mortier Rapide convient notamment pour fixer des charnières, des ancrages, etc. Le Mortier Rapide convient aussi pour reboucher rapidement les trous dans la maçonnerie et les irrégularités du sol **[2].**

I.1.3.6.Mortier fabriqué sur chantier :

C'est encore le cas très souvent pour des menus travaux ; le plus grand soin doit être apporte tant au stockage qu'au mélange des constituants qui seront choisis en fonction de l'ouvrage à réaliser :

Type et classe du liant, nature et granulométrie du sable, dosage en eau, nature des adjuvants.

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu. on emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner **[3].**

I.1.3.7. Mortier industriel :

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers parfois exigus et difficiles d'accès : rénovation, travaux souterrains. **[3].**

Les autres avantages présentés par ces produits sont les suivants :

- Pré-dosage de composition constante, garant de régularité et de qualité ;
- Pas d'approvisionnement et de stockage sur place des constituants (sables, liants, adjuvants) ;
- (Un gain de temps) perte de temps limitée (appréciable dans le cas de travaux à effectuer rapidement et lorsque la place fait défaut) ;
- Chantiers plus propres.

Les producteurs proposent de nombreuses formules standard répondant à la plupart des besoins. Ils peuvent également étudier des compositions de mortier adaptées, donnant les performances optimales requises pour chaque usage. Ces mortiers reçoivent le plus souvent un ou plusieurs adjuvants en poudre, afin de modifier les propriétés rhéologiques, les temps de prise, la durabilité, l'aspect (mortiers colorés) ou leur adhérence grâce à l'ajout de

résines vinyliques ou acryliques. Ils sont conditionnés en sacs. Le marché du bricolage a profité du développement des mortiers pré-mélangés. Aujourd'hui, on peut trouver dans les surfaces de bricolages des mortiers répondant à tous les besoins non seulement par la nature du produit, mais aussi par son conditionnement plus adapté : sacs de 5 à 25 kg.

Les mortiers répondant à tous les besoins sont :

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
- Mortiers d'imperméabilisation,
- Mortier d'isolation thermique,
- Mortier de jointoiement,
- Mortier de ragréage,
- Mortier de scellement, mortier pour chapes,
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- Mortier de réparation.

I.1.3.8 Mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi :

Depuis quelques années est apparue une nouvelle génération de mortiers livrés par les centrales de béton prêt à l'emploi : les mortiers frais retardés et stabilisés. Du fait qu'ils sont retardés, ces mortiers peuvent être livrés et stockés en quantité importante.

On peut les utiliser dans un délai allant jusqu'à 24 heures sans avoir le souci de préparer de nombreuses petites gâchées. Très maniables et homogènes, ils possèdent des résistances très largement suffisantes pour les travaux auxquels ils sont destinés : maçonnerie et jointoiement.

Lorsqu'ils sont étalés en couche mince, la prise de ces mortiers est accélérée (effet d'absorption d'eau par le support et perte par évaporation).

Ces mortiers permettent, comme le béton prêt à l'emploi, de simplifier et d'améliorer les conditions de travail, en évitant les pertes de temps **[2].**

I.1.3.9. Mortiers de fibres :

L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables. Ce sont soit des mortiers pré mélangés, livrés en sac, soit des mortiers prêts à l'emploi, livrés par certaines centrales **[2].**

I.1.4 .Domaines d'utilisation des mortiers :

I.1.4.1 Mortiers pour chape :

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition : on y incorpore alors souvent des produits spécifiques. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels).

Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique **[4].**

I.1.4.2.Enduits :

il constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers, Rappelons simplement qu'à côté des enduits traditionnels en trois couches**,** se développent aujourd'hui les enduits monocouches épais, ainsi que les enduits isolants considérés encore comme non traditionnels. **[2].**

I.1.4.3.Joints de maçonnerie :

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche. On a généralement intérêt à utiliser des mortiers ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il liaisonne sans fissurer. **[4].**

Les mortiers de joints constituent donc un maillon important de la maçonnerie, qui doit être bien étudié et bien mis en œuvre pour assurer la fonction qui lui est dévolue. C'est notamment le cas de la maçonnerie apparente.

I.1.4.4 Scellements et calages :

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, scellements d'éléments de second œuvre, scellements de regards de visite ; assemblage des éléments préfabriqués, ils sont caractérisés par :**[4].**

- Absence de retrait ;
- bon caractère expansif du mortier ;

- Résistance au jeune âge

I.1.4.5 Mortiers et coulis de réparation :

Comme son nom l'indique, ce type de mortier est utilisé pour le reprofilage du béton, la reconstitution de la protection des armatures, et le rétablissement de l'étanchéité **[4].**

I.1.5.Caractéristiques principales :

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

- Ouvrabilité;
- Prise;
- Résistances mécaniques;
- Retraits et gonflements, etc.

I.1.5.1.Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont

I.1.5.1.1.La table à secousses:

Le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100\,\frac{D_r - D_i}{D_i}$$

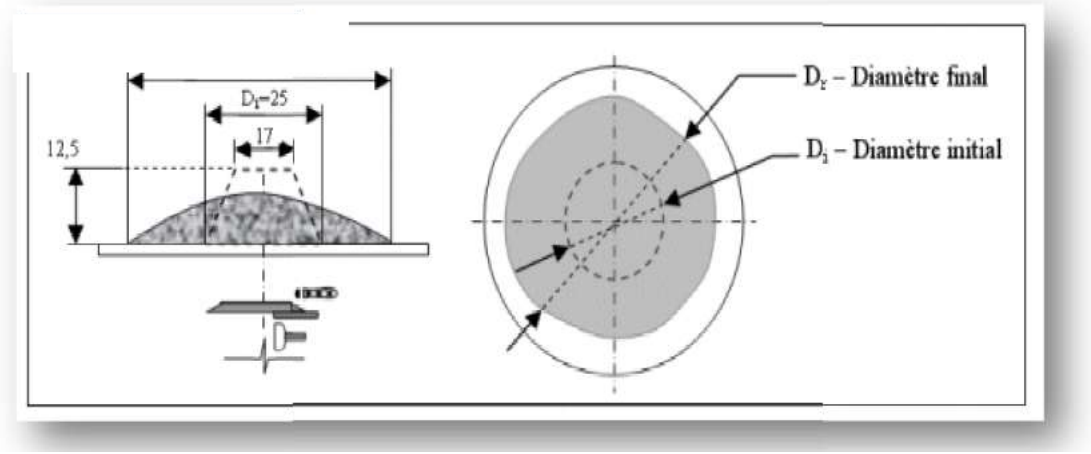


Figure I.1 Table à secousses **[5].**

Avec : Dr = Diamètre final et Di = Diamètre initial

1.1.5.1.2. Le maniabilimètre LCPC :

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibrateur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un trait repère gravé sur la face intérieure du moule **[5].**

1.1.5.1.3. Le cône:

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibrateur. **[5].**

I.1.5.2. Prise :

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30 % d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur **[5].**

I.1.5.3. Résistances mécaniques :

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de **4 x 4 x 16 cm** conservés dans l'eau à 20 °C.

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- Nature et dosage en ciment;
- Rapport C/E;
- Granulométrie et nature du sable;
- Energie de malaxage et mise en œuvre;

- Protection les tous premiers jours **[5].**

I.1.5.4. Retraits et gonflements :

Les retraits se mesurent sur des prismes **4 x 4 x 16** cm, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20 °C et à 50 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment) **[5].**

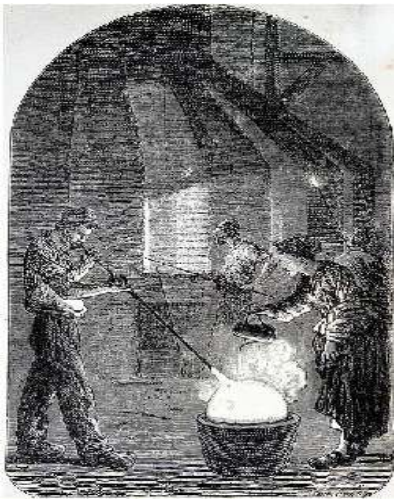
Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de **4 x 4 x 16** cm conservées dans l'eau à 20 °C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Châtelier inférieure sur pâte pure à 10 mm).

I.2.Les verres

I.2.1. Historique

Les historiens, eux-mêmes, sont divisés sur ce sujet car ils éprouvent bien des difficultés à séparer l'histoire de la légende. Certains attribuent la fabrication du verre aux Phéniciens, d'autres aux Egyptiens (des perles de verre ont été trouvées à côté de momies égyptiennes dont l'âge serait estimé à 4000 ans avant J.-C.) en soulignant que le seul rôle des Phéniciens a été de propager ce savoir par voie de mer aux peuples plus à l'Ouest sur le bassin Méditerranéen. **[6].**

Toutefois, selon les théories les plus récentes, l'industrie du verre serait d'origine mésopotamienne. De la Mésopotamie (Irak actuel) elle serait passée en Egypte pour refluer vers la Mésopotamie et s'étendre à la Chine, la Grèce et enfin au reste du monde **[7].**



I.2.2. Les propriétés du verre :

Le verre est un corps solide, transparent, obtenu par la fusion du sable mêlé de chaux et de potasse ou de soude.

Il existe de nombreuses catégories de verre définies par des verriers ou par des scientifiques. Pour les verriers, c'est un solide altérable par les agents atmosphériques et renfermant plus de 60% de silice. Pour les scientifiques, c'est une substance amorphe, présentant l'état solide ou de liquide surfondu, transparent ,translucide ou opaque, sonore, doué d'une cassure brillante et pouvant passer par toutes les phases de l'état pâteux par élévation de température. Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence. **[8].**

I.2.2.1. Propriétés physiques :

La transparence : mais il peut être opaque ou opalescent.
La dureté : seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohème et le cristal est le plus tendre.
La densité : elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5.
La résistance et l'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.
L'imputrescibilité : il ne se putréfie pas.
L'imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue »**[8].**

I.2.2.2. Propriétés thermiques :

La dilatation : c'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition.
La conductivité : il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on

l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C. **[8].**

I.2.2.3. Propriétés chimiques :

L'action de l'eau : l'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.

L'action de l'air : les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.

L'action de la lumière : exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent.

L'action des acides : ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre peut donc être dissout. **[9].**

I.2.3.La composition du verre :

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de …) et par élévation à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes **formateurs** car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dits «**modificateurs** » qui sont :

- Les fondants qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice dont la température de fusion est 1730°C).
- Les stabilisants qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant. **[11].**

I. 2. 3. 1. Les oxydes formateurs (les vitrifiants) :

La silice : (dioxyde de silicium SiO2)

C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Le sable de Fontainebleau, du fait de sa qualité, est très recherché pour la fabrication de verres d'optique et de cristal. Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant. **[12].**

L'anhydride borique : (le bore ou borax anhydre B2O3)

Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à 2300°C. Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant.

L'anhydride phosphorique : (le phosphore P2O5)

Employé dans le domaine de l'optique. La principale source au Moyen Age est les cendres de bois.

I. 2. 3. 2. Les oxydes modificateurs :

Les fondants : (oxydes alcalins)

La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°C (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail. Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge.

- L'oxyde de sodium (la soude Na2O) : Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne) ou de nitre (grec = nitrons). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage.
- L'oxyde de potassium (K2O) : Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes terrestres comme la fougère ; aujourd'hui, on utilise du salpêtre (nitrate de potassium KNO3). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. Il permet le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage. **[13].**

- L'oxyde de magnésium (MgO) : Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium+magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre flotté, le verre à vitre et en gobeleterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques.

Les stabilisants : (oxydes alcalino-terreux)

L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) provoque la rupture d'une liaison Si - 0 et fait

apparaitre un oxygène "non pontant". Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'eau. **[12].**

- L'oxyde de calcium (CaO) : se trouve sous forme de chaux (qui est le stabilisant le plus employé) ou de dolomie (lorsque le verre doit contenir de la magnésie). Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification. Il était utilisé au moyen âge pour les verres sodiques.
- L'oxyde de zinc (ZnO) : Il augmente l'éclat et l'élasticité. **[13].**
- L'oxyde de fer (Fe2O3) : (c'est un stabilisant et un colorant) souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre. Il faut donc procéder à une décoloration de cette teinte. Pour cela, on peut ajouter du bioxyde de manganèse (MnO2) (savon des verriers).
- L'oxyde de plomb (PbO) : entre dans la composition du cristal. Il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.

I. 2. 3. 3. Les colorants :

Les verres sont le plus souvent teintés dans la masse ; cela signifie que l'on ajoute des oxydes métalliques pendant la fusion. Ils entrent en très faible proportion du mélange (ex : oxyde de cuivre pour du vert). **[15].**

La coloration dans la masse est due à la présence dans le verre d'ions de métaux de transition.

I.2.4 .Les différents types de verre

- **Les verres sodocalciques :**

Exemple de composition : Silice (72%) + soude (13%) + chaux (5%)

C'est le plus commun des verres. Il a une bonne stabilité chimique, mais il est sensible aux chocs thermiques. Il est utilisé pour la fabrication des verres plats et creux, des ampoules électriques et en bouteillerie.

Température de ramollissement pour 70% de silice = 700°C.

Son coefficient de dilatation est élevé : 86 x 10-7 (de 0 à 300°C) **[9].**

- **Les verres borosilicates :**

Exemple de composition : Silice (80%) + anhydride borique (13%) + soude (4%) + alumine (3%)

Le plus connu est le Pyrex (1915) qui possède une bonne résistance aux chocs thermiques. On en fait des ustensiles de laboratoire et de cuisine (résistance à la chaleur et aux agents chimiques). Il sert aussi pour l'isolation (fibres de verre) et le stockage de déchets radioactifs.

Température de ramollissement pour 80% de silice = 820°C.
Son coefficient de dilatation est très faible : 32 x 10-7 (de 0 à 300°C). **[9].**

- **Les verres au plomb :**

Exemple de composition : Silice (62%) + oxyde de plomb (21%) + potasse (7%)
On l'appelle cristal si la teneur en oxyde de plomb est supérieure à 24 %. Il sert en gobeleterie et en verrerie d'art, pour les téléviseurs et en électronique. Le cristal est limpide, très sonore, très résistant à la dévitrification (attention : sa matière n'a rien de cristallisé). En élevant la teneur en plomb (60%), on obtient un verre dense utilisé pour la protection des rayons X.
Le verre contient du plomb s'il noircit lorsqu'on le chauffe au chalumeau. coefficient de dilatation est très élevée : 90 x 10-7 (de 0 à 300°C). **[9].**

- **Le verre de silice :**

Il contient au moins 96% de silice.
Il est très employé grâce à sa grande pureté (transparence optique) et pour sa résistance aux températures élevées, à la corrosion et aux chocs thermiques.
On l'utilise pour la fabrication de tubes de lampe à halogène, des éléments d'optique et des miroirs de télescope.
Température de ramollissement pour plus de 96% de silice = 1700°C.
Son coefficient de dilatation est très faible : 5,6 x 10-7 (de 0 à 300°C)

- **Les vitrocéramiques (ou vitro cristallins) :**

Exemple de composition : Silice (75%) + alumine (15%) + sel de titane (5%) + oxyde de lithium (3%)
Ce sont des dérivés du verre dont la fabrication est basée sur le principe de dévitrification.
La transformation en céramique semi-cristalline s'obtient par un traitement thermique appelé "céramisation" qui permet d'obtenir un début de cristallisation. La température de cristallisation est à environ 800° et la cristallisation dure environ 2 heures. **[9].**
Les vitrocéramiques peuvent posséder une grande résistance à la rupture et un coefficient de dilatation très faible, ce qui leur permet d'être très résistants aux chocs thermiques.
Ils sont notamment utilisés en verrerie culinaire résistante au feu (plaques de cuisson). On les utilise aussi pour fabriquer des miroirs de télescope géant d'environ deux mètres de diamètre.

Note : dans la composition des verres, plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant.

I.2.5 Domaine d'application du verre :

Les domaines d'application du verre trempé sont vastes. Ses performances le rendent souvent indispensable, voire obligatoire pour de nombreux usages.

Nous pouvons répertorier 7 pôles d'activités : l'automobile, l'électroménager**[17].**

L'automobile :

Ce fut la première application du trempé. Il est utilisé pour l'ensemble des équipements : glaces latérales, lunettes arrière, toits ouvrants…

L'électroménager :

Il est utilisé pour les portes de fours et les plaques chauffantes.

Le verre intérieur :

Ce marché couvre des applications diverses comme les meubles, l'agencement, le sanitaire, les vitrines, les cloisons, la tabletterie, le mobilier de laboratoires, les salles blanches, escaliers…

Les équipements industriels :

Comprennent les machines, capteurs solaires, ascenseurs, portes automatiques.

Le matériel mobile :(Hors automobile)

Comprend le ferroviaire, la marine, le para automobile (matériels agricoles, chariots élévateurs, élévateurs, voiturettes…)

Le mobilier urbain :

Comprend les abribus, les panneaux publicitaires, les cabines téléphoniques…

Les façades :

Incluent les murs rideaux, les portes, les vitrines, garde-corps…**[8].**

I.3: Les déchets de verres :

I.3.1.Définition :

Le verre récupéré est constitué de :

- verre industriel provenant des professionnels (embouteilleurs, négociants en vin, restaurateurs, miroiteries,...),
- verre issu des chantiers de destruction du bâtiment,
- verre des automobiles en provenance des garages et des véhicules hors d'usage,
- verre ménager qui représente 13 % du poids des ordures ménagères.

I.3.2.Les types de déchets de verres classée par forme:

- Verre creux : bouteilles, bocaux, gobelets, pots…
- Verre plat : verre trempé, vitrages, glaces…
- Laine et le fil de verre.
- Verre technique : lunettes, ampoules, écrans cathodiques…
- Verre blanc et coloré. **[8].**

I.3.3. Les déchet de verre en chiffres:

Aux États-Unis, par exemple, 11 530 kilotonnes de déchets de verre a été généré 2010 et seulement 27,1% ont été recyclés, principalement pour récipient et l'emballage **[8].**

À Singapour, 72 800 tonnes des déchets de verre a été cédée en 2011 et 29% ont été recyclés **[8].**

en Algérie les statistiques de 2010 nous renseigne qu'on génère 50000 ton/an de déchets de verre. **[8].**

I.4 : les mortiers à base de déchet de verres :

I.4.1. les caractéristiques des mortiers à basse de déchets de verres :

- **La maniabilité :**

Hongjian Du et all, [17 Septembre 2012] ont montré que La fluidité de mortier de verre décroit avec le pourcentage de substitution du sable par du verre de différentes couleurs, comme il est montré sur la **Figure I.2**. La faible fluidité de mortier a également contribué à la teneur de l'air a augmenté, en particulier au verre remplacement de sable de 100%**[18].**

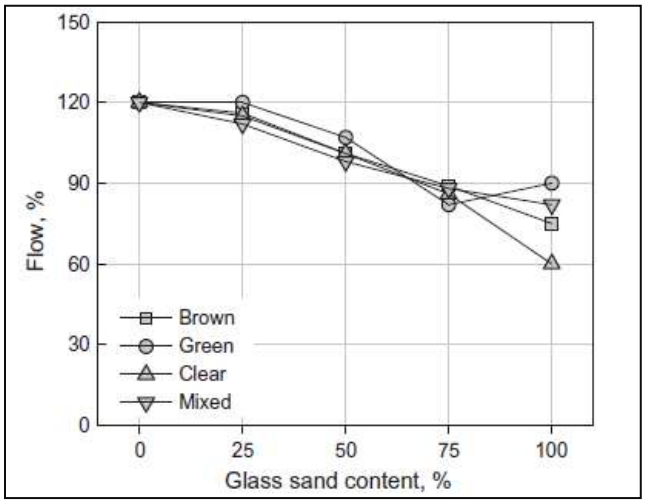


Figure I.2. La fluidité de mortier de verre

- **La densité :**

Kiang Hwee Tan et all, [17 Septembre 2012] ont montré que pour tous les mélanges de mortier, il n'y a pas eu de ségrégation ou des saignements. La densité fraîche diminue au fur et à mesure que la teneur en verre augmente comme représenté sur la **Figure I.3**, car la masse volumique du verre est inferieure à celle du sable. La couleur de verre n'a eu aucun effet sur la densité fraîche, en particulier lorsque la teneur en verre était inférieur à 75%. La densité de mortier frais avec 100% de verre de couleur brun, vert, clair et mélange était inferieur au mortier sans verre de 97%, 96%, 95% et 97% respectivement **[17].**

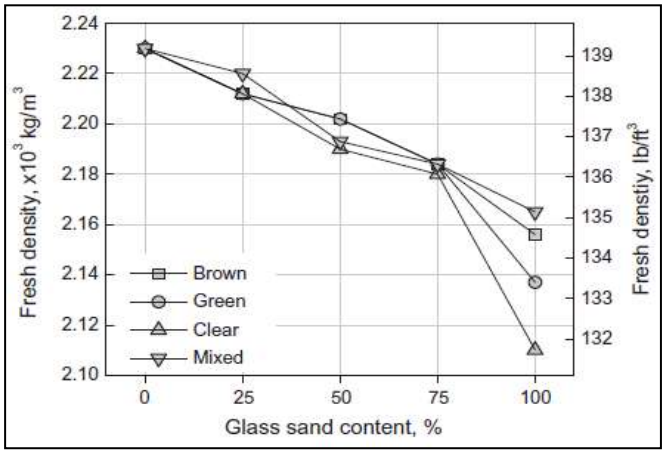


Figure I.3: la densité frais de mortier de verre.

❖ **La résistance à la traction :**

Kiang Hwee Tan et all, [17 Septembre 2012] ont montré que la résistance en traction par flexion varie entre 2,85 et 3,95 MPa. la composition avec 25% de verre donne le meilleur résultat de la résistance en traction par flexion à 28 jours de cure comme il est montré sur la **Figure I.4**.

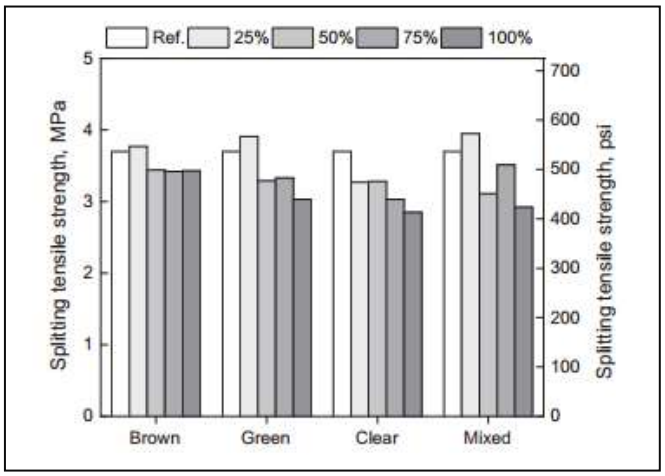


Figure I.4. résistance à la traction par flexion des mortier de verre

Park et all, **[18]**, d'autre part qui fait des essais sur le béton avec des granulats de verre (70%) remarquent que la résistance à la traction par fendage est de 80% de celle du béton ordinaire. Par rapport à la résistance en compression, la résistances à la flexion par fendage était moins importante.

❖ **La résistance à la compression :**

BATAYNEH et all, [2007] et NISHIKAWA et all **[20.21]**, [1995] ont travaillé avec des substitutions de sable. Leurs résultats montrent que le verre est bénéfique pour les bétons étant donné le gain de résistance obtenu. Toutefois, ils proposent une étude plus approfondie concernant la réaction alcali-silice et la durabilité de ces bétons, vu la quantité d'alcalins présente dans le verre.

SHAYAN et all**[23.24.25]**, [2002] ont montré que la substitution de 30% de sable par du verre fin donnait de meilleures résistances que des mélanges témoins sans verre ou avec 10% ou 20 et 30% de substitution de ciment par la fumée de silice et le verre respectivement**[30].**

I.5. La durabilité

I.5.1 Définition

La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée) de justifier la rentabilité de l'investissement **[26].**

La durabilité directement liée à l'environnement immédiat ou futur des ouvrages et partie d'ouvrage est aujourd'hui le paramètre important à considérer pour optimiser la résistance des bétons aux influences externes : intempéries, agressivité des sols, atmosphères chimiquement agressives. La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur.

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Pour s'assurer de cette durabilité, pendant longtemps, les bétons ont été spécifiés en considérant les performances mécaniques requises à 28 jours associées éventuellement à un dosage minimum en ciment.

Pour la construction d'une structure, seules les exigences de résistance et de comportement en service étaient prises en compte.

I.5.2 Indicateurs de durabilité

Des ouvrages ont été réalisés ces dernières années satisfaisant à un cahier des charges exigeant une durée de service de 120 ans. Des indicateurs de durabilité ont été définis (tels que la perméabilité à l'oxygène, la diffusion des chlorures, la vitesse et profondeur de carbonatation, ...etc) et font l'objet d'une surveillance régulière. Une structure durable suppose aussi le respect de l'enrobage des armatures et des performances mécaniques répondant aux sollicitations qu'elle va subir pendant sa durée de service. L'Euro code 2 définit pour les ouvrages structurels, les règles pour déterminer les enrobages en tenant compte en particulier de la classe d'exposition, de la compacité du béton, du type d'armature et de la durée de service prévue **[29].**

aussi on peut solliciter le matériau avec des cycles de vieillissement comme séchage-mouillage, gel-dégel, ...etc, en vu de voir le comportement du matériau vis à vis des agressions physiques. c'est l'objet de notre travail qui consiste à soumettre un mortier de verre à des cycles de séchage-mouillage et de regarder par la suite l'effet sur les propriétés mécaniques et physiques du matériau.

I.5.3 Quelque travaux sur la durabilité des mortiers:

Solution d'attaque sulfatique

La solution d'attaque sulfatique utilisée pour l'expérimentation est une solution de sulfate de sodium *(Na2SO4)* de concentration massique *5%*

Essai mouillage – séchage (ASTM D559 – 57)

L'essai de mouillage-séchage a été réalisé sur des éprouvettes conservées dans l'air du laboratoire. A l'âge de *28* jours les éprouvettes soumises à 12 cycles de vieillissement accélérés. Les variations des résistances à la compression et à la flexion des mortiers, avant et après les cycles de mouillage séchage

Influence de mouillage- séchage sur la résistance des mortiers Les éprouvettes soumises aux cycles de mouillage- séchage montrent que les résistances mécaniques restent pratiquement inchangées. On a constaté pour les mortiers à base du sable mélange (MSAD) une légère amélioration de la résistance à la compression. Par contre les mortiers à base du sable dunaire (MSD) et les mortiers de sable dunaire avec adjuvants

(MSDP) présentent une légère diminution de la résistance à la compression. Les résistances à la flexion pour tous les mortiers sont affectées par les cycles de mouillage-séchage, on remarque une diminution de cette résistance d'après les résultats que nous avons obtenus. Cette légère diminution est bien liée à la modification de la structure des mortiers. Ce qui est certainement affecte les résistances mécaniques des mortiers.

Résistances aux sulfates des mortiers

Les résistances aux sulfates sont déterminées à partir des éprouvettes dont le durcissement était en conditions naturelles pendant *28* jours (temps zéro). Nous avons préparé deux séries des éprouvettes, une série des éprouvettes conservées à l'air libre, et une deuxième série des éprouvettes maintenues sous l'eau, puis les mortiers durcis sont immergés séparément pendant *30, 60, 90* et *180* jours, dans la solution du sulfate de sodium *Na2SO4* de concentration *5 %*. Pour évaluer la durabilité de mortiers vis-à-vis l'attaque des sulfates, nous avons déterminé les résistances à la compression et à la flexion en fonction de la durée d'exposition aux sulfates.
Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes 7
la résistance à la compression et la résistance à la flexion pour les différents types de mortiers en fonction de la durée d'immersion dans la solution des sulfates après 28 jours de conservation en deux différents milieux (sous l'eau et à l'air libre)
Résistance à la compression en fonction de la durée d'exposition aux sulfates
Résistance à la flexion en fonction de la durée d'exposition aux sulfates
Les résultats indiquent un gain de résistances, que ce soit à la compression ou à la flexion pour tous les mortiers de sable pendant environ 90 jours. Au-delà de ce temps, on a observé une réduction de la résistance: L'augmentation de la résistance jusqu'à 90 jours semble être due à l'hydratation continue des produits anhydres de ciment et à la réaction de *Na2SO4* avec *Ca(OH)2* pour former le gypse et l'étrangéité, qui complètent les micropores menant à une structure plus dense, ce qui influe positivement sur les résistances mécaniques que ce soit, à la compression ou à la flexion. La diminution de la résistance aux âges postérieurs (180 jours), indique l'effet d'expansion de l'attaque de sulfate, la formation d'un hydrate sulfaté gonflant conduit à la création des microfissures signe d'une déstructuration ultérieure du matériau. Cela est conforme aux résultats obtenus par d'autres chercheurs **.**

Examen visuel

L'examen visuel des mortiers exposés aux sulfates, est un moyen d'évaluer la détérioration des propriétés et les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes. On observe comme le montre la figure 11 des fissures et des failles produites au niveau des coins et de côtés des éprouvettes après une durée d'exposition de 180 jours, le mortier du sable dunaire (MSD) est le plus dégradé



I.6. Conclusion :

Cette recherche bibliographique a montré que les mortiers de verre ont été étudiés et a confirmé que l'utilisation du verre dans les mortiers et bétons est bien possible. Nous avons vu aussi que la taille des grains influence l'effet qu'apporte le verre au mortier : L'incorporation du verre sous forme de fine améliore les résistances en compression des mortiers **[16].** toute fois peu de travaux existent sur l'aspect vieillissement physique des matériaux

Chapitre II

Matériaux et essais

II. Introduction

Ce chapitre décrit en détail tous les essais expérimentaux faits en laboratoire et les matériaux utilisés au court de la présente recherche. Des essais sont effectués afin d'étudier les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du mortier.

II.1 Programme expérimental et Protocole d'essais

II.1.1 Matériaux utilisées

II.1.1.1 Le ciment

Le ciment utilisé est CPJ-CEM II/A (Mâtine) , est un ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de Lafarge (M'silla) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442]



Figure II.1 : ciment mâtine

Le **tableau II.1.** résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment.

Tableau II.1. : L'analyse chimique du ciment et composition du clinker.

Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%) (NA 5042)	7.00-9.50
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.01-0.03
Composition hypothétique du clincker	Silicates tricalciques C_3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalciques C_3A (%)	6.00-8.00

II.1.1.2 Le sable

On a utilisé un sable corrigé par roulé et concassé.

II.1.1.2.1 Le sable roulé

Le premier sable utilisé provient de la région de **Hessi Bah bah** (**Figure II.2**) , c'est un sable naturel et fin utilisé pour corriger le sable de concassage .

II.1.1.2.2 Le sable de concassage

Le deuxième sable utilisé provient de la région de **Mont Guorno** (**Figure II.2**), situe à 25 km au sud de Médéa .



a. Le sable roulé



b. Le sable de concassage

Figure II.2 : Les sables utilisés.

Les résultats des différents essais de caractérisation réalisés sur les sables sont résumés dans les deux tableaux suivants :

Tableau II.2 : Caractéristiques des sables utilisés

Caractéristiques	Type de sable		Normes
	Roulé	Concassé	
	Hessi bah bah	Mont corno	
Classe granulaire	0/3	0/5	NF EN 933-1**[28]**
Module de finesse	0,947	3,45	NF EN 933-1**[28]**
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,58	2,66	NF EN 1097-6**[31]**
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,4	1,49	NF EN 1097-6**[31]**
Equivalent de sable (%)	65	75	NF EN 933-1 **[28]**
Taux d'absorbation d'eau	0,01	0,2	NF EN 1097-6**[31]**

.

A travers ces résultats, il parait clair que le sable concassé est grossier alors que l'autre est fin, ce qui nous oblige à corriger le fin par le grossier pour avoir un mélange convenable avec un équivalent de sable acceptable.

II.1.1.2.3 Correction des sables

Selon la méthode d'ABRAMS et le module de finesse souhaité (Mf souhaité = 2.5), on calcule les paramètres S1, S2 et S en suivant les demarches décrites par K. ould rouis et all **[27]** :

$Mf_{souhaité} = 2.5$

S1=3.45-2.5= 0.95

S2=2.5-0.94 =1.56

S=0.95+1.56=2.51

Le sable mélange sera composé alors des proportions suivantes :

- ✓ Le pourcentage du sable roulé = (0.95/2.51).100 = 37,84 % → ~ 38%
- ✓ Le pourcentage du sable concassé = (1. 56/2.51).100 = 62,15 % → ~ 62%

Pour les granulats de verre on a : Mf = 2.64

A travers ces résultats trouvés, les courbes granulométriques des différents granulats utilisés sont illustrées dans la figure suivante :

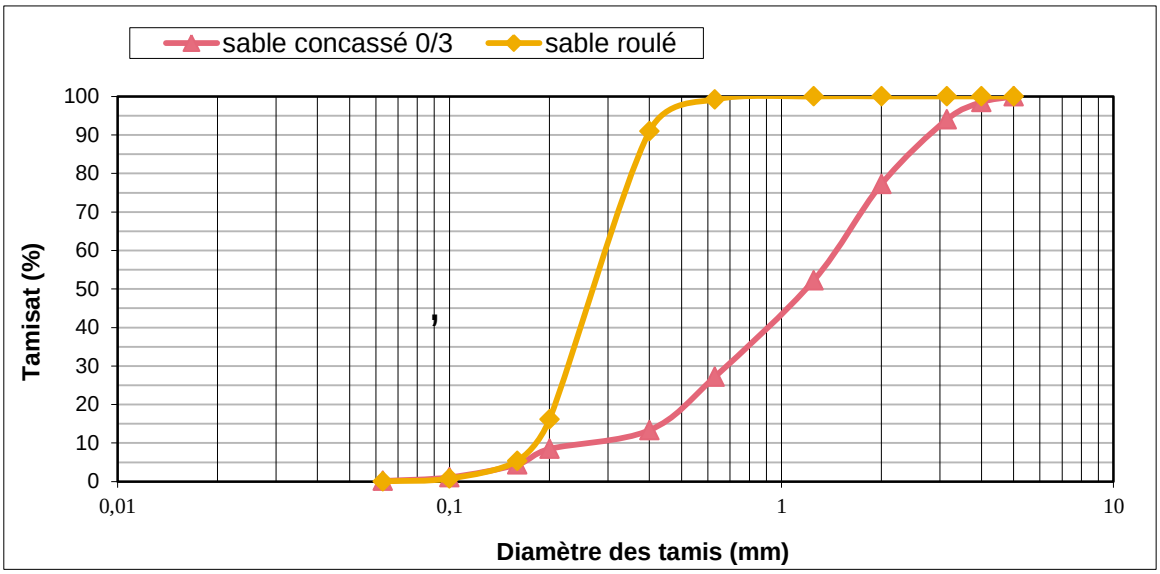


Figure II.3 : La courbe granulométrique des sables utilisée.

II.1.1.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre laboratoire sans Passer par l'analyse chimique de cette eau. Sa température était comprise entre 10 et 22°C.**[29],** exempte d'impuretés, conforme à l'exigence de la norme NF EN 1008 **[30].**

II.1.1.4 Les granulats de verre

Provenant essentiellement de verre sodo-calcique (verre transparent de vitre), les granulats de verre sont obtenus après le concassage de débris de verre ramassés auprès des miroitiers.

Dans ce travail on utilise les déchets de verre comme granulat ayant la même granulométrie qu'un sable normalisé.

Ces granulats de verre sont incorporés dans le mortier par substitution par rapport à la masse de sable selon les pourcentages suivants : 25%, 35%, 50%, 75% et aussi comme ajout avec des proportions de 10, 20 et 30 % par rapport à la masse de sable dans le mélange.



Figure II.4: Les granulats de verre

Caractéristiques physiques des granulats de verre

Tableau II.3 : Les caractéristiques physiques des granulats.

Caractéristiques	
Masse volumique (g/l)	2,51
Module de finesse	2.64
Couleur	Blanc grisâtre

Par tamisage on détermine la courbe granulométrique des granulats de verre qui est représenté à côté de celle du sable corrigé comme on peut le voir sur la figure suivante :

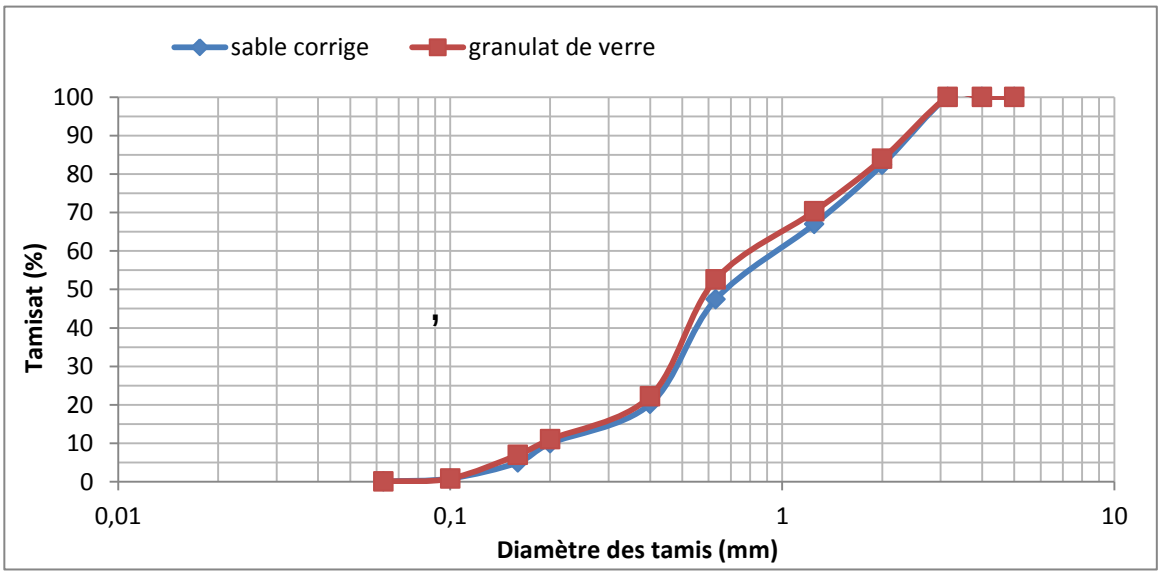


Figure II.5 : Courbes granulométriques de granulats du verre et du sable corrigé.

II.1.2 Protocol d'essais

A raison de trois éprouvettes par essai et deux âges (28 et 68 j), un type de déchets de verre, quatre pourcentages de déchets de verre pour substitution 25%, 35%, 50%, 75%, avec E/C constant, trois pourcentages comme ajout 10%, 20% et 30% et le mortier témoin avec que du sable corrigé, le nombre d'essais effectué sur les mortiers réalisés est résumé comme suite :

- 8 essais sur ouvrabilité ;

- 8 essais d'aéromètre ;

- 184 essais de compression simple ;

- 8 essais d'absorption d'eau ;

- 24 essais de variation dimensionnelle.

II.1.3 préparation des matériaux

* **Lavage du sable de concassage**

Le lavage du sable doit se faire afin d'obtenir un constituant propre, exempte d'éléments nocifs et de fines, Le lavage est effectué sous l'eau de robinet en procédant au tamisage de sable avec un tamis de maille égale à 0.08 mm.

II.1.4 Confection et Cure des éprouvettes

Décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Le mortier préparé, est remplit dans un moule (4 cm x 4 cm x 16 cm). Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide. Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées pour une cure dans l'eau à 20 C° ± 2 C° ou dans l'air libre selon la nature de l'essai, jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes [ENV 197-1] **[32]** et [NFP 15-301] **[33]** définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier

la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges (dans notre cas) ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.4 : Les limites du temps d'écrasement

Age	24h	48h	72h	7j	≥28j
Précision	± 15 min	±30min	± 45min	± 2h	± 8h



Figure II.6: Conservation dans l'eau à 20 °C±2°C.

II.1.5 Composition des mortiers

Deux familles de mortier (MT, MGVR) sont fabriquées à base de sable corrigé et des granulats de déchets de verre avec un rapport E/C fixé à 0.5

Les compositions des différents mortiers obtenus soit par substitution soit par ajout sont résumées respectivement dans les **tableau II.5 et II.6**

Tableau II.5 : Compositions des différentes familles de mortiers réalisés par substitution.

		MTsc (E/C cst)				
			25%	35%	50%	75%
Ciment (g)		450	450	450	450	450
Sable (g)	S_R	540	405	351	270	135
	S_C	810	607,5	526,5	405	202,5
Eau (g)		225	225	225	225	225
E/C		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Granulat de verre (g)		-	308,3	431,7	616,7	925,1

Tableau II.7 : Compositions des mortiers réalisés par ajout.

		MGVR (Maniabilité cst =10s)		
		10%	20%	30%
Ciment (g)		450	450	450
Sable (g)	SR	540	540	540
	SC	810	810	810
Eau (g)		292.5	315	337.5
E/C		0.65	0.7	0.75
Granulat de verre (g)		135	270	405

Avec :

MTsc : Mortier témoin à base de sable corrigé ;

MGVR : Mortier à base de granulat de verre recyclé ;

SR: Sable roulé ;

SC: Sable concassé.

II.1.6 Malaxage des mortiers

La procédure de malaxage pour les types de mortier (sans et avec granulat du verre) est présentée dans les tableaux **II.7 et II.8**.

Tableau II.7: Opérations de malaxage du mortier sans granulat de verre

Opérations	Durée	Etat du malaxage
Introduction de l'eau	-	Arrêt
Introduction du ciment		
Malaxage	30s	Vitesse lente
Introduction du sable	30s	
Malaxage	30s	Vitesse rapide
Raclage de la cuve	15s	Arrêt
	60s	Vitesse rapide

Tableau II.8 : Opération de malaxage avec granulat du verre.

.

Opérations	Durée	Etat du malaxage
Introduction de l'eau	-	Arrêt
Introduction du ciment		
Malaxage	30s	Vitesse lente
Introduction du sable + Le verre	30s	
Malaxage	60s	Vitesse rapide
Raclage de la cuve	15s	Arrêt
Malaxage	90s	Vitesse rapide

II.2 Les essais

II.2.1 Equipement nécessaire

Une salle maintenue à une température de 20 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 % ;

- Un bac d'eau pour la conservation des éprouvettes maintenue à une température de 22 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure à 90 % ;
- Une étuve maintenue à une température de 35 °C ± 5 °C et à une humidité relative inférieure à 18.5 % ;
- Un concasseur ;
- Un broyeur ;
- Un malaxeur à mortier normalisé avec une cuve de 5 L et pale de malaxage en inox;
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée (4cm x 4cm x 16cm);
- Une table à chocs pour le serrage des éprouvettes, permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm ± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s;
- Balances pour la mesure des petites et grandes quantités ;
- Tamiseuse électrique ;
- Les tamis de différentes mailles en inox ;
- Agitatrice ;
- Cône de sable, pour la mesure de la masse volumique apparente du sable ;

- Eprouvettes et béchers en verre et en plastique graduées ;
- Spatules flexibles en acier inox ;
- Pinceaux.

II.2.2 Les essais effectués sur les granulats

II.2.2.1.Masse volumique

Les masses volumiques apparentes et absolues des différents sables utilisés ont été déterminées selon la norme NA 451 **[34].**

II.2.2.1.1.Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

L'essai est répété 3 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente. **[35]:**

ρapp= M / 1 (kg/m3) …… (II.2)



Figure II.7 : Le cône et le récipient.

II.2.2.1.2 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue **ρs** est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il

ne faut pas confondre **ρs** avec la masse volumique **ρapp.** Les masses volumiques s'expriment en t/m3, en kg/dm3, ou en g/cm3. **[35].**

Conduite de l'essai :

- on remplit une éprouvette graduée avec un volume **V1** d'eau.
- on pèse un échantillon sec **Ms** de granulats (environ 100 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. on lit le nouveau volume **V2**.

  La masse volumique est alors :

ρ_{abs}= M / V2-V1 (kg/ m3) …….. (II.3)

À la fin, on peut tirer les indices suivants : (porosité, compacité, indice des vides).

C = ρapp / ρabs ……. (II.4)

P = 1-C ; I = P / C …….. …….. (II.5)

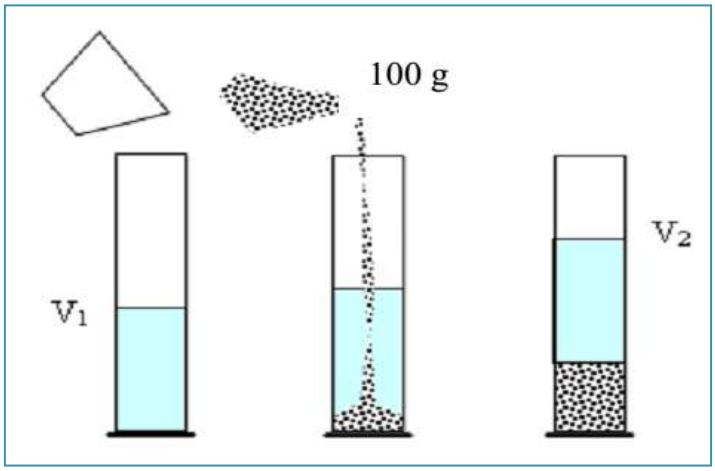


Figure II.8 : Les éprouvettes de mesure.

II.2.2.2.Equivalent de sable (la norme NF P 18 -598) [36]:

Il est défini par la norme NFP 18-598 ; cet essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fin, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fin qui floculent.

But de l'essai :

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'élément fins.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

Hauteur h1 : sable propre + élément fins,

Hauteur h2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

ES =h2/h1 × 100 … … … … … … . . (**II. 6)**

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on déterminer **ESv** (équivalent de sable visuel) ou $\mathbf{ES_p}$ (équivalent de sable au piston) .



Figure II.9 : Procédure de mesure de l'équivalent de sable.

II.2.2.2.1.Granulométrie

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme NA 2607 **[38]** où le sable passant à travers une série de maille décroissante, dont on pèse le refus de chaque tamis **[37].**

On utilise une quantité de 1000 g pour le sable de concassage et 1000 g pour le sable roulé.

On trace les courbes granulométriques pour chaque sable, puis on tire les coefficients suivants:

- ✓ Le coefficient d'uniformité Cu;
- ✓ Le coefficient de courbure Cc;
- ✓ Le module de finesse M f.



Figure II.10 : Série de tamis.

II.2.3 Les essais effectués sur le mortier

II.2.3.1 à l'état frais

II.2.3.1.1.Ouvrabilité du mortier

Selon les normes L.C.P.C NF P 18-452 **[39]** et NF P 15-437 **[40]** le but de cet essai est de quantifier l'ouvrabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps, du mortier avant prise, et classer les mortiers suivant une échelle de fluidité croissante (ferme, plastique, très plastique et fluide) **[37].**

Dans cet essai la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide. L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre à mortier LCPC et comporte :

- ➢ Boîtier parallélépipédique métallique (30 cm x15 cm x15 cm) ;
- ➢ Une cloison amovible ;
- ➢ Un vibrateur ;
- ➢ Un chronomètre.



Figure II.11 : Maniabilimètre à mortier avec la tige de piquage.

Le principe de fonctionnement du maniabilimètre à mortier est résume comme suite :

- ✓ Huiler légèrement les parois internes de la cuve ;
- ✓ Remplir le mortier ;
- ✓ Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place en deux couches ;
- ✓ Chaque couche piquée de 15 coups au moyen de la tige de piquage ;
- ✓ Araser la dernière couche ;
- ✓ La cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre en même temps que la cloison est retirée.
- ✓ Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule.
- ✓ Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier.

Le temps **t** mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance, L'état du mortier avant et après l'essai est illustré dans la figure II. 12



Figure II.12 : Etat du mortier avant et après mesure du temps d'écoulement.

II.2.3.1.2.Air occlus

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le mortier ou le béton, même après la mise en œuvre. Pour réaliser un mortier le plus compact possible, il faut diminuer le volume d'eau sans augmenter le volume d'air occlus et par conséquent sans diminuer la maniabilité du mélange.

Selon la norme NF P 18-353 **[32],** une cuve hermétiquement close accueille un volume donné de mortier. Ce mortier contient de l'air, susceptible d'être comprimé sous l'action d'une pression **[37].**

Lorsque l'on applique une pression à l'ensemble mortier / air occlus par l'intermédiaire d'un fluide incompressible, la pression se transmet intégralement à l'air occlus (on suppose les autres éléments du mortier incompressible). L'air est comprimé sous une pression permettant de négliger son volume final au regard de son volume initial.

Le fluide incompressible occupe la place de l'air occlus dans le mortier. Le rapport de son volume déplacé au volume total utilisé permet de déterminer le pourcentage volumique d'air occlus.

Equipement nécessaire

- Une balance permettant de peser à 1 g près ;
- Un malaxeur normalisé est également requis pour la réalisation du mortier ;
- Un aéromètre à mortier d'une capacité de 1L.



Figure II.13 : Aéromètre à mortier.

Exécution de l'essai

- Introduire le mortier dans la cuve de mesure en trois couches approximativement de même volume. Mettre en place chaque couche de mortier par 25 coups de tige de piquage également répartis sur toute la section, suite au piquage de chaque couche, tapoter de coups secs les parois du bol 10 à 15 fois avec un maillet, jusqu'à ce que tous les vides laissés par le piquage soient comblés et que de grosses bulles d'air n'apparaissent plus à la surface de la couche qui vient d'être mise en place par piquage ;
- Ajouter la couche de mortier finale de manière à éviter un trop plein excessif, araser la surface supérieure à l'aide d'une règle métallique ;
- Mettre en place le couvercle sur la cuve, le fixer en bloquant les attaches rapides diamétralement opposées ;
- Ouvrir les vannes rouges sur le couvercle ;
- Par la vanne de gauche, au moyen d'une pissette remplir l'aéromètre jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles d'air et que l'eau parvienne à la vanne de droite. A la fin du remplissage, incliner légèrement l'appareil de façon à ce que la vanne de droite se trouve plus haut que la vanne de gauche. Fermer les deux vannes ;
- A l'aide de la pompe à main, amener l'aiguille du manomètre en face du repère rouge sur le cadran. Laisser s'équilibrer la pression (qui peut retomber) et pomper de nouveau de sorte à dépasser légèrement le repère. Ajuster alors précisément la position de l'aiguille à l'aide du bouton poussoir noir ;
- Tapoter légèrement sur le manomètre et l'aéromètre pour assurer que la pression ne change pas, Appuyer sur le bouton poussoir vert quelques secondes jusqu'à ce que les pressions entre cuve et chambre de compression s'équilibrent ;
- Le manomètre indique alors directement en pourcentage le volume d'air occlus dans le mortier **[35].**

II.2.3.1.3.La masse volumique

La masse volumique du mortier a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[41].**

Pour notre étude 3 mesures de la masse volumique ont été faites : la masse volumique du mortier frais juste après malaxage, au démoulage et à l'état sec.

II.2.3.2 Sur mortier à l'état durci

II.2.3.2.1.Essai de traction par flexion

Selon la norme [EN 196-1] **[31]** c'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) **(Figure II.18),** une éprouvette prismatique de côté **b** et de longueur **l [37].** Dans notre étude, cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16cm), à 28 et 68 jours.

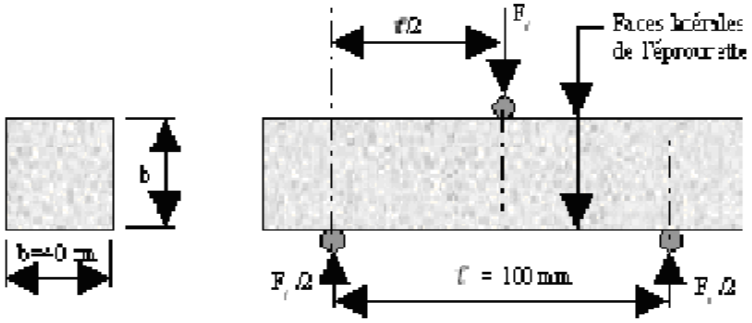


Figure II.14 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction.

La contrainte de flexion sur la fibre inférieure est donnée par la formule suivante :

$\sigma t = (M / I)\ \nu$ …… **(II.8)**

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge :

$M = FfL /4$ …… **(II.9)**

I : Moment d'inertie de la section transversale : $I = b4/12$ …… **(II.10)**

ν : La distance de la fibre la plus éloignée : $\nu = b/2$ …… **(II.11)**

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante :

$\sigma t = (1.5F_fL)/ b^3$ …… **(II.12)**

La rupture de chaque éprouvette en traction est effectuée conformément au dispositif décrit sur la **(Figure II.17)**

II.2.3.2.2.Essai de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme EN 196-1 **[31]**

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN comme indiquée sur la figure **(II.16),** Pendant l'essai la vitesse de chargement est constante.

La contrainte de rupture est calculée comme suit :

$R_c=F_c/b^2$……..**(II.13)**



Figure II.15: Presse Hydraulique (2000kN).

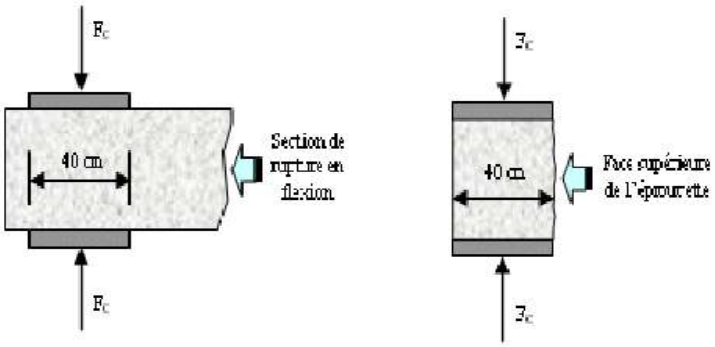
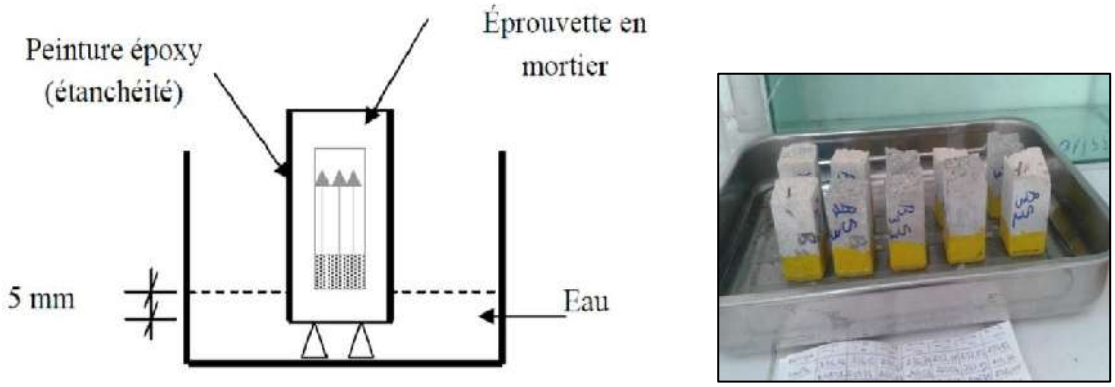


Figure II.16 : Dispositif de rupture à la compression.

II.2.3.2.3.Essai d'absorption d'eau par capillarité

Conformément à la norme NBN NE 13057 **[43],** dans cet essai, on prend un morceau d'éprouvette de mortier déjà utilisé puis séché. On le pèse (m_0) au début, après on l'introduire dans un bac remplit d'un film d'eau (5 mm d'eau) (figure II.21) et pendant chaque intervalle de temps (15 min, 30 min ,1 h, 2 h ,4h ,24h) on ressort les morceaux du bac et on les pèse de nouveau la masse (m_1). La différence de masse entre m1et m_0 est la masse de l'eau absorbée (m_1- m_0).



a- Principe de l'essai b- Déroulement de l'essai

Figure II.17 : Absorption d'eau par capillarité.

II.2.3.2.4.Essai de retrait et gonflement

En l'absence de toute charge, le mortier se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en mortier. Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du mortier **[37].**

Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm) conformément à la norme NF P 18-404 **[44],** Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un rétractomètre **(figure II.21)** munis d'un comparateur qui permet la mesure du retrait à tout moment à cours terme et moyenne terme (de 1j jusqu'à 40j). La conservation des éprouvettes est faite à l étuve à une température de 80 °C et pour le gonflement, la conservation des éprouvettes est faite dans un bac d' eau maintenu à une température entre 18 et 22°C



Figure II.18: Rétractomètre et son étalonnage.

Mesure des variations de longueur

La mesure a lieu, l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Si, d'une mesure à l'autre, la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de 0.03 mm celle de l'éprouvette ayant la variation la plus voisine, il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact de scellement des plots,…etc.). Et si elle ne peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar et protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations) même métal que l'appareil.

Mesure des variations de masse

La variation de masse est déduite après avoir, pesé à 0.1 g chaque éprouvette à chacun des temps utilisés pour mesurer de retrait.

Expression des résultats

Pour chaque éprouvette on calcule les rapports suivants:

ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine ;

L: Longueur de base, prise égale à 160 mm ;

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage ;

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis à zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 160 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps t; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t) \quad \text{(II.15)}$$

Soit l (t_0) la longueur de l'éprouvette au temps t0 choisi origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \quad \text{(II.16)}$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(to)}{L} \quad \text{(II.17)}$$

Δl(t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule.

Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'étuve à 80 °C, Δl(t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau ou le froid, Δl(t) peut être positif : il y a alors gonflement) **[45].**

II. 3 Cycles : mouillage – séchage

L'essai de mouillage séchage se définit comme une suite alternative d'une période de mouillage à 20°C pendant 23.5 heures et d'une période de séchage à l'étuve à 80°C pendant 23.5 heures. Avant trempe et avant étuvage on laisse le matériau à l'air libre pendant 30 min, dans le but d'éviter un choc thermique. Cette période de 48 h, constitue un cycle de vieillissement accéléré. en se référant a la norme ASTM D559-57,B.Benchaa et all **[26]** on utilisée 12 cycles appliques au mortier de sable de dune .Pour notre étude on soumet le matériau à 20 cycles par analogie aux travaux réalisés par Bj Mohr et all **[49]** et M. Bentchikou et all **[50]**

Le cycle que nous avons utilisé est schématisé à **la figure II.19**

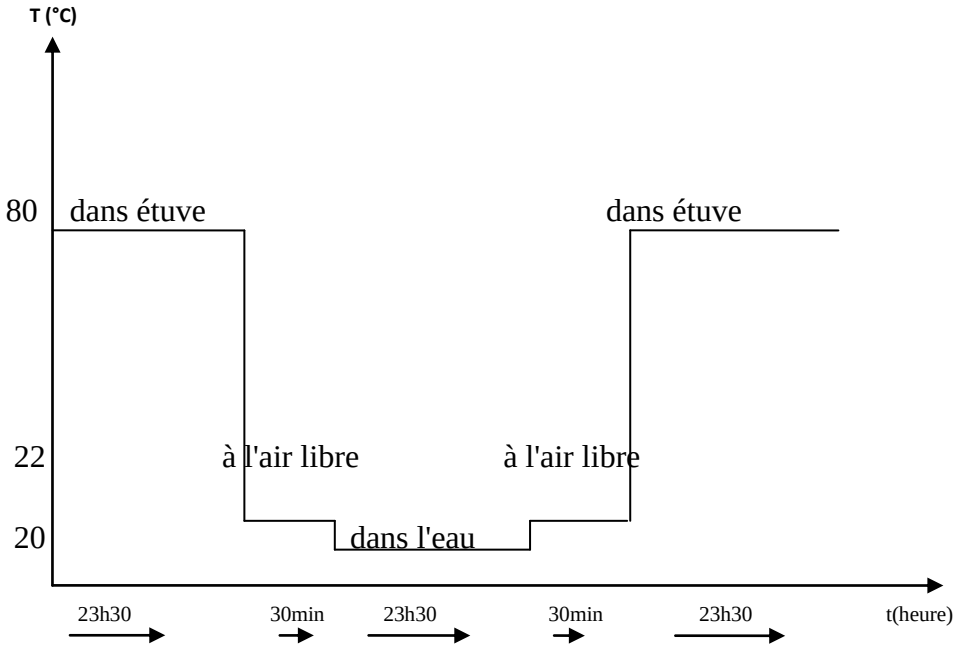


Figure II.19. Cycles : mouillage – séchage

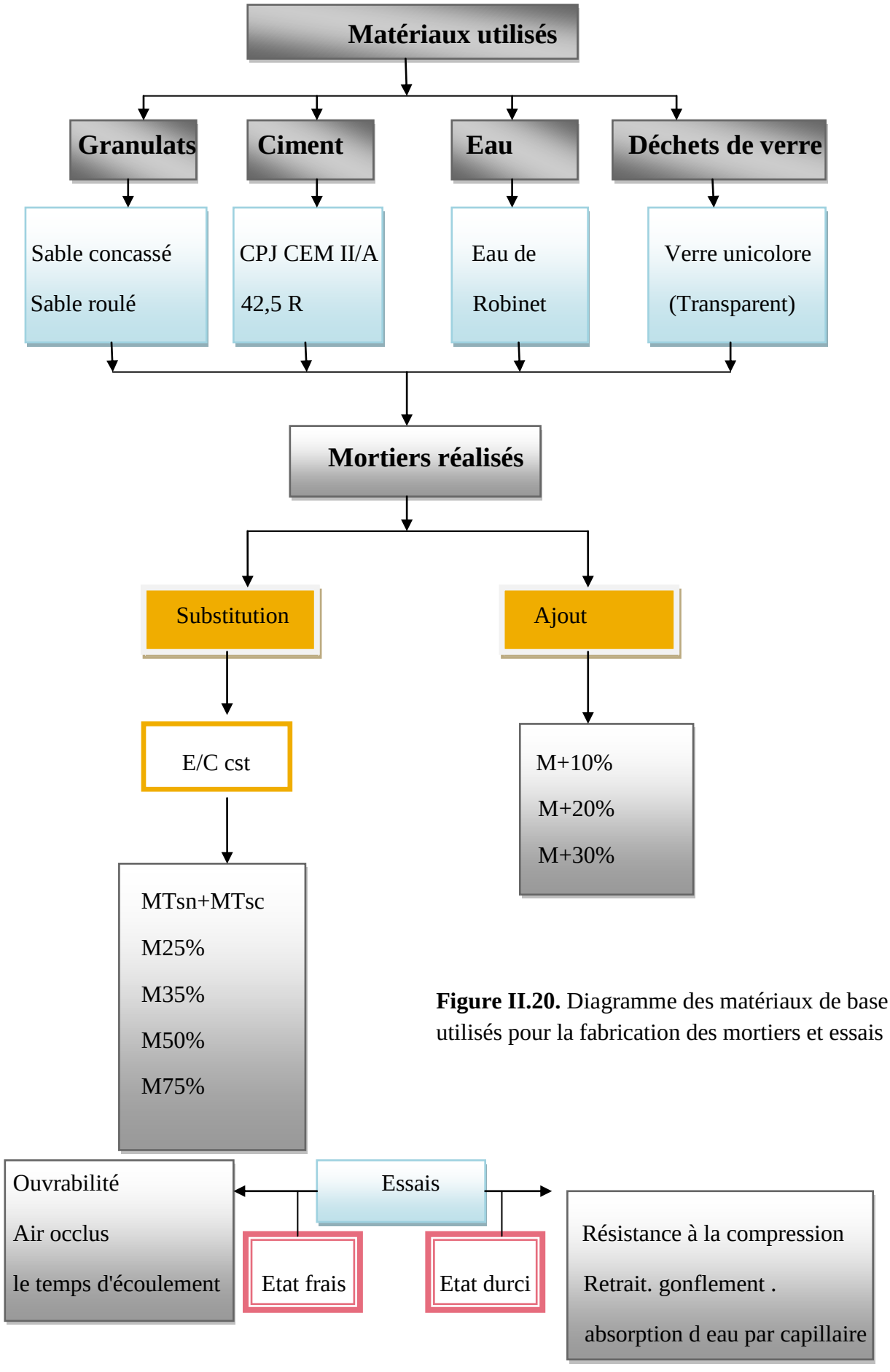


Figure II.20. Diagramme des matériaux de base utilisés pour la fabrication des mortiers et essais

II.4 Conclusion

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le marché Algérien (le ciment, les granulats naturel, le verre)

Les différents essais menés sur des mortiers au cours de cette étude sont décrits dans le chapitre II. Les résultats de la caractérisation seront présentés au chapitre III.

Chapitre III

Résultats et interprétations

III. Introduction

Dans ce chapitre on présente les résultats obtenus pour les différents essais réalisés sur mortier à l'état frais et à l'état durci.

Les résultats sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois mesures.

III.1 Caractérisation des mortiers

III.1.1 Résultats des essais pour le mortier à l'état frais

III.1.1.1 La masse volumique

Dans cette essais, on mesure la masse volumique des trois éprouvettes en Kg/m^3 pour chaque gâché de mortier réalisé, et les résultats obtenue sont présentés dans la figure **(III.1).**

cas de substitution

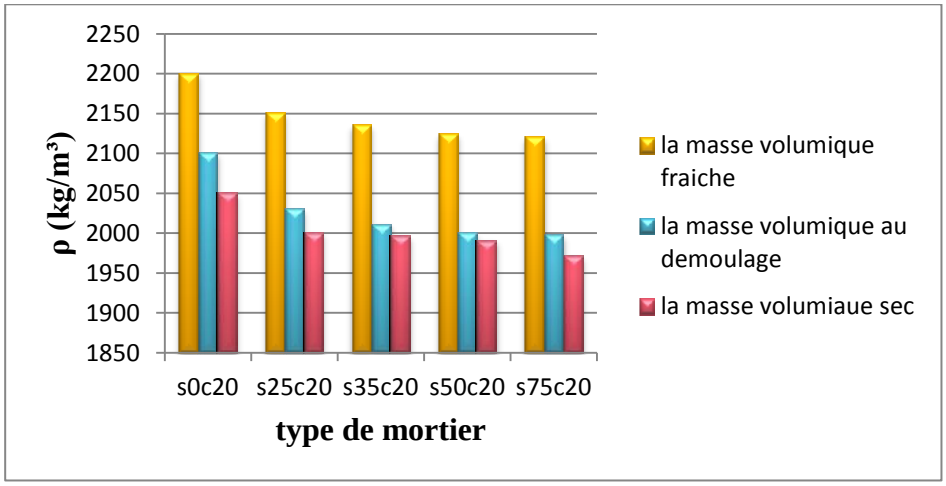


Figure III.1 : masses volumiques des mortiers avec substitution 20 cycles de vieillissement

D'après les résultats de la figure **(III.1),** on peut dire que la masse volumique varie en fonction du type du mortier. avec l'augmentation du pourcentage de substitution, la masse volumique diminue, le matériau devient plus léger. ceci est du au fait que la densités du verre est inferieur a celle du sable

La densité sec est réduite de **9 %** par rapport à la densité fraiche. Et ces résultats sont comparables avec ceux de **Kiang Hwee Tan et all [18**], qui ont trouve une réduction de **11%**.

Cas d'ajout

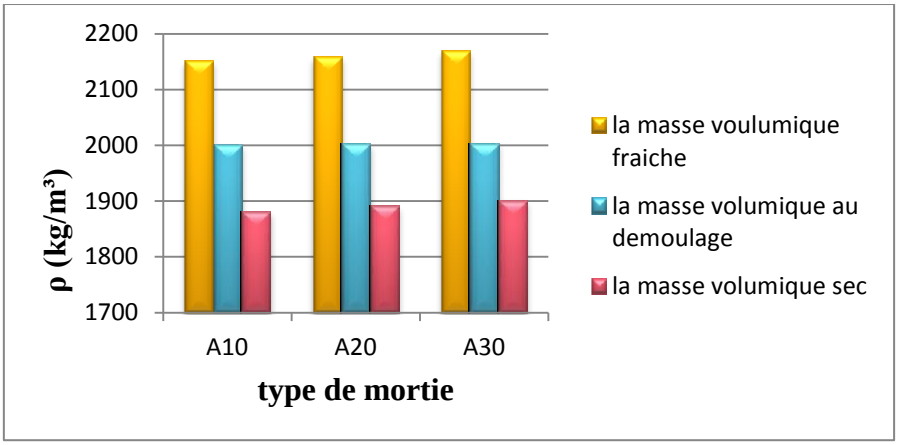


Figure III.2 : masses volumiques des mortiers avec ajout.

A travers la figure **(III.2),** on remarque que pour les mortiers avec ajout, la masse volumique est presque constante au démoulage. d'autre part la densité sec diminuée de **8 %** par rapport à la densité fraiche.

III.1.1.2 Air occlus

Dans cet essai on a mesuré l'air occlus en (%) pour chaque gâché de mortier réalisé, et les résultats obtenus sont résumés dans la Figure **(III.3).**

Cas de substitution

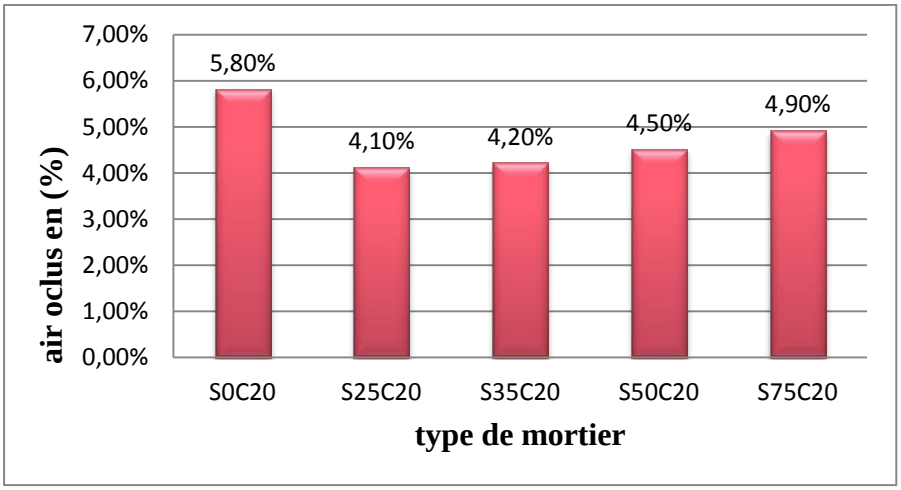


Figure III.3 : Air occlus des mortiers pour substitution réalisés après 20 cycles de vieillissement

.

A partir des résultats montrés sur la figure **(III.3),** on remarque que le mortier avec sable corrigé entraine plus d'air par rapport au mortier à base de granulats de verre, Aussi le mortier à base de 25% de granulats de verre présente moins d'air occlus par rapport aux autres compositions. c' est à dire plus la quantité du verre augmente plus l'air occlus augmente

Cas d'ajout

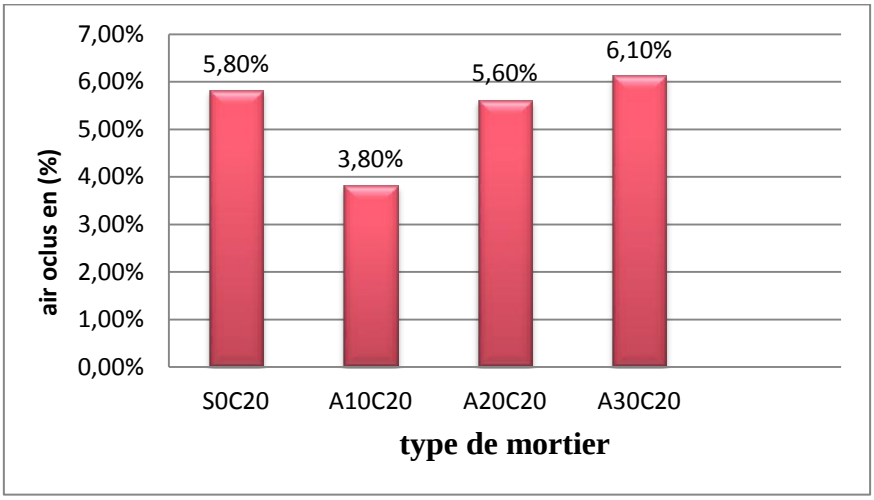


Figure III.4 : Air occlus du mortier de verre comme ajout après 20 cycles de vieillissement

On enregistre d'après la figure **(III.4),** que l'introduction du 10% du granulat de verre dans les mortiers comme ajout cause moins d'air occlus par rapport au autres types de mortier (témoin, 20% et 30%).

III.1.1.3 Ouvrabilité

Les résultats sont représentés dans la figure suivante qui permet de comparer les valeurs du temps d'écoulement des différents mortiers fabriqués.

1. Cas de substitution d'une fraction du sable par du verre

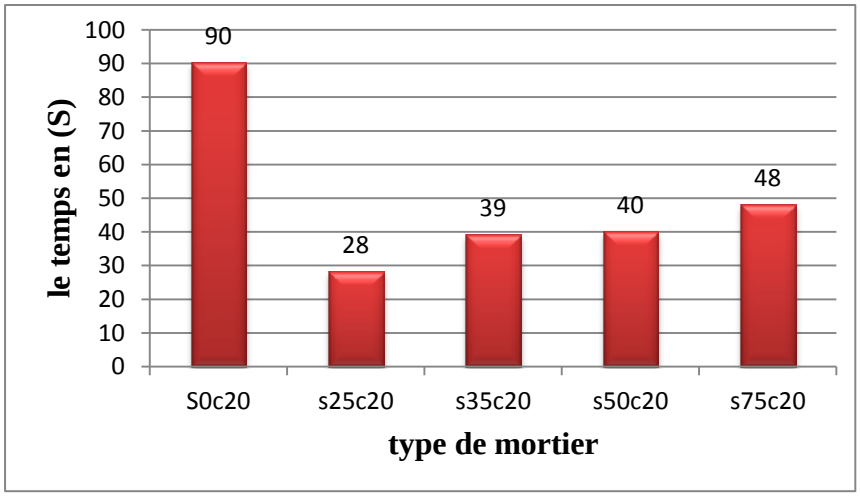


Figure III.5 : Variation du temps d'écoulement pour E/C= 0,5 maintenu constant

D'après les résultats de la figure **(III.5),** on peut dire que l'ouvrabilité varie entre le témoin et le mortier de verre. les granulats de verre favorisent l'écoulement du mortier.

avec l'augmentation du taux de verre, le mortier devient de plus en plus ferme mais dans tout les cas le temps d'écoulement reste inferieur à celui du mortier témoin. la même tendance est observée sur les mortiers préparés avec des granulats de verre de différentes couleurs par **Kiang Hwee Tan et all [17].**

III.1.2 Résultats des essais pour le mortier à l'état durci

III.1.2.1 Résistance à la compression

Pour chaque essai, le résultat est la moyenne de trois mesures prises sur trois éprouvettes à l'âge de 68 jours ceci est valable pour les trois types (témoin, substitution et ajout), les résultats sont illustrés sur les figures suivantes :

Cas de substitution

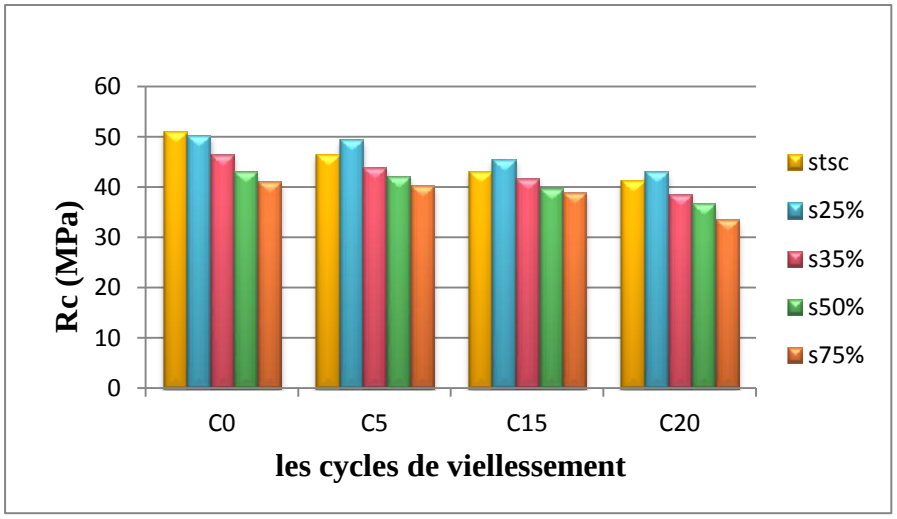


Figure III.6 : Variation de la résistance à la compression du mortier pour substitution

D'après la figure **(III.6),** on remarque que quelque soit le nombre de cycle de vieillissement, la résistance en compression diminue en fonction du pourcentage de substitution du verre sauf le cas du mortier témoin dont la résistance sans cycle est la plus élevée et avec cycle, la résistance vient en deuxième position après le mortier avec 25 % de substitution.

d'autre part, on remarque qu'après 5 cycles de vieillissement, le mortier à 25 % de verre garde sa résistance initiale et 25 % de verre représente le taux optimum en terme de résistance.

Cas d'ajout

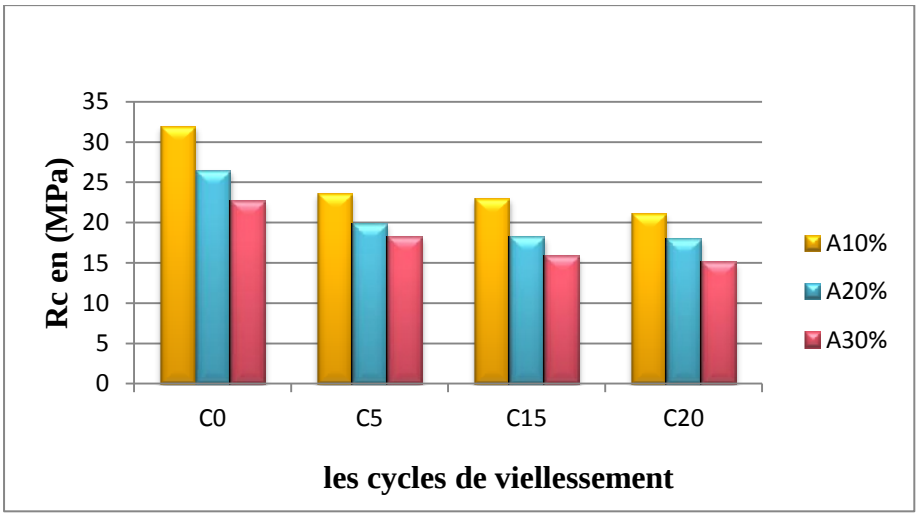


Figure III.7: Variation de la résistance à la compression du mortier pour ajout

Selon la Figure **(III.7) :** Les résultats indiquent une perte de résistances à la compression pour tous les mortiers à base de granulat de verre pour tous les cycles.

pour 10 % de verre introduit comme ajout, on enregistre une chute de résistance égale à 38% par rapport au témoin et cela pour le matériau n'ayant pas subit un vieillissement (C0).
en comparant les résistances des mortiers à 10% et vieillis après 5, 15 et 20 cycles à leurs témoins, on s'aperçoit que la chute de résistance est autour de 48%.
entre 0 et 20 cycles la chute de résistance est régulière pour les mortiers à 10, 20 et 30%; elle est évaluée à 34%.

III.1.2.3 Absorption d'eau par capillarité

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité des différents mortiers étudiés sont résumés dans les figures suivantes

Cas de substitution

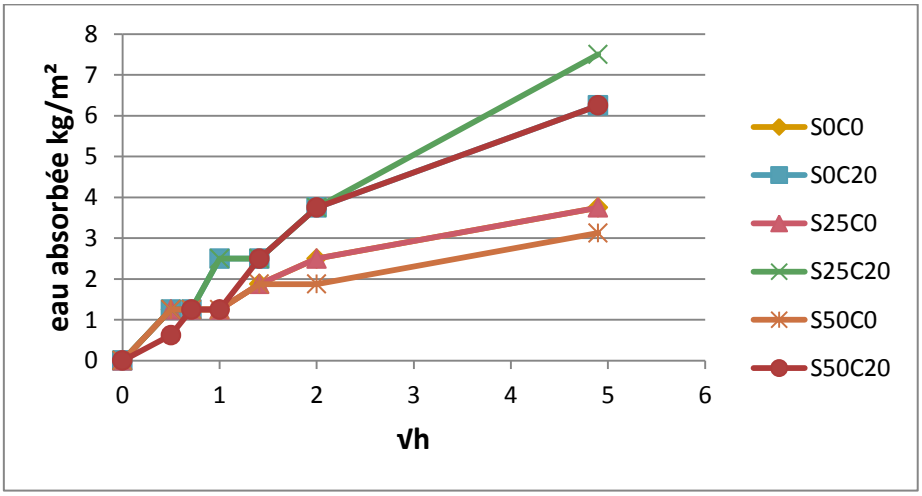


Figure III.8 : Absorption d'eau des mortiers (témoins+ mortiers de verre) pour E/C cst. après 20 cycles de vieillissement

D'après la figure **(III.8)** on remarque la même cinétique d'absorption d'eau pour tout les mortiers. si on compare les cycles 0 et 20 pour les mortiers avec des taux de 25 et 50%, on remarque que l'absorption des éprouvettes soumises au cycle 20 (C20) est supérieure à celle des éprouvettes soumises au cycle 0 (C0) pour les cas de mortier (25 et 50%), ce qui laisse supposer que le nombre de cycle crée une porosité dans le matériau en le fragilisant et cela se répercute sur la résistance comme on l'a vu sur la figure III.6.

On remarque aussi que l'absorption reste constante pour les éprouvette ayant été soumise à 20 cycles de séchage- mouillage , indépendant de taux de substitution

lors des essais d'absorption d'eau par capillarité

Remarque l'éprouvette est tombée du main de l' operateur , ce qui suppose qu'elle a eu un choc et s'est fissurée , ce qui a engendre une absorption d'eau qui n'est pas ordinaire ,en la comparant aux pourcentages de substitution .

Cas d'ajout

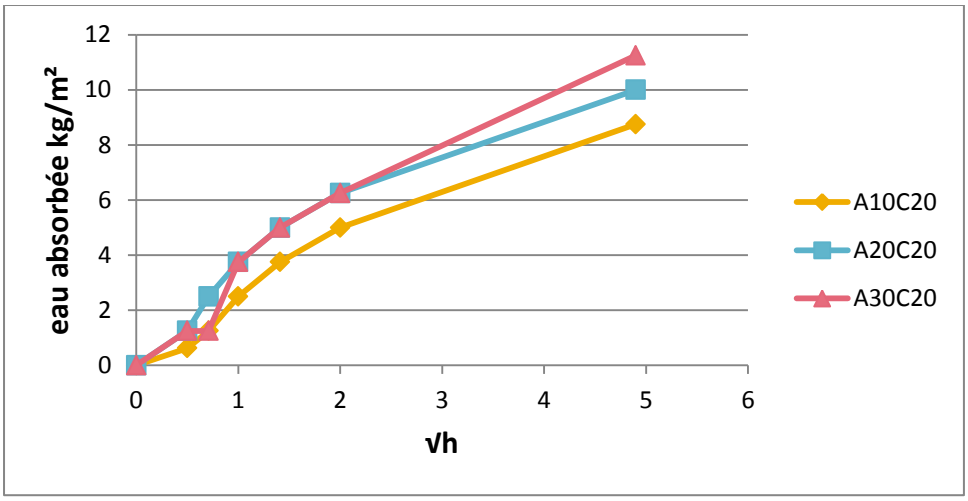


Figure III.9 : Absorption d'eau pour les mortiers de verre avec ajout.

Selon la figure **(III.9),** on remarque que le mortier avec ajout absorbe plus d'eau par rapport aux mortiers avec substitution Cette absorption d'eau étant liée au volume des pores, d'autre part, on remarque que chaque fois que la quantité de verre augmente, l'absorption augmente.

III.1.2.4 variation dimensionnelle

Cas de substitution

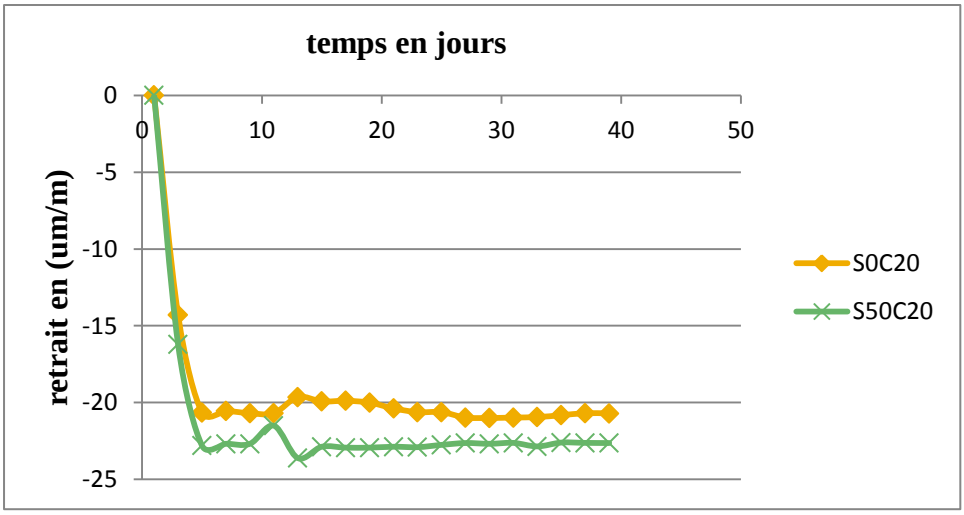


Figure III.10 : variation dimensionnelle du mortier pour substitution avant Trempe après 20 cycles de vieillissement

.

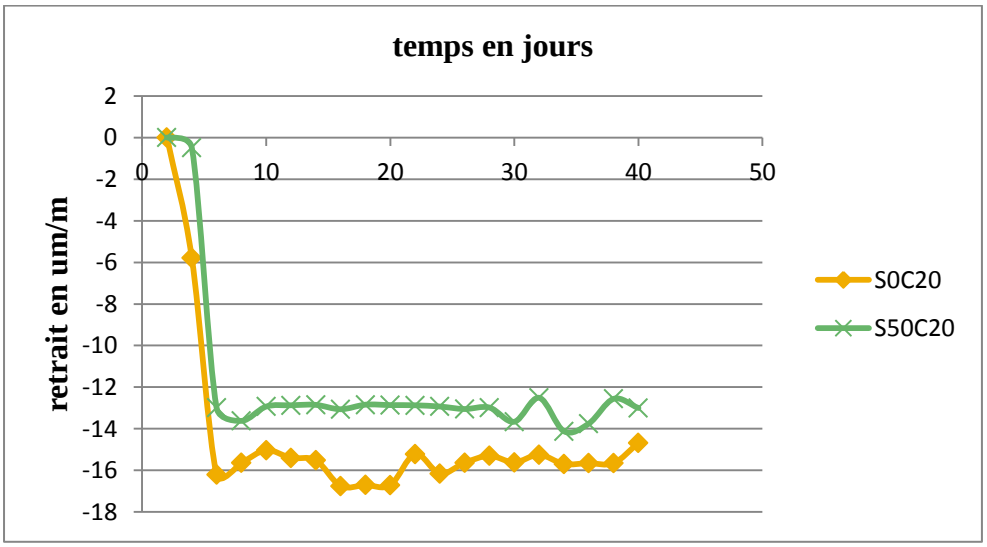


Figure III.11 : variation dimensionnelle du mortier pour substitution avant étuvage après 20 cycles de vieillissement

.

en comparant les résultats de variation dimensionnelles des éprouvettes du mortier témoin avec celles du mortier avec 50% de substitution du verre, on observe un retrait avant trempe et un gonflement avant étuvage dont la valeur n'est pas vraiment significative.

Cas d'ajout

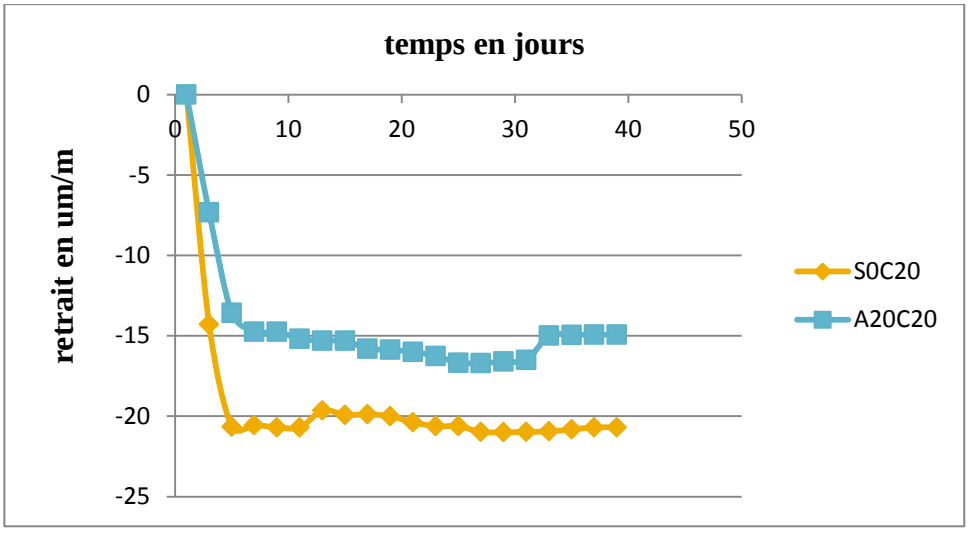


Figure III.12 : variation dimensionnelle du mortier pour ajout avant Tremp après 20 cycles de vieillissement

.

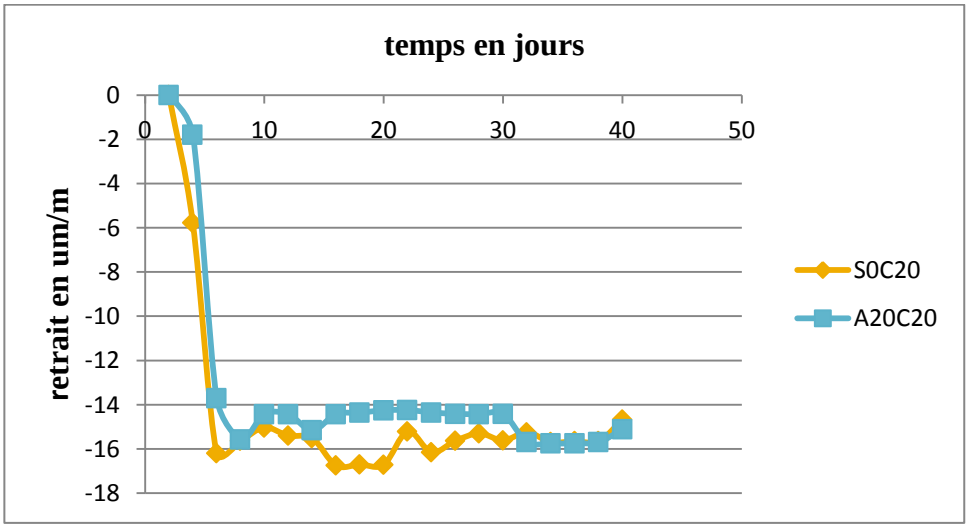


Figure III.13 : variation dimensionnelle du mortier pour ajout avant étuvage après 20 cycles de vieillissement

.

en comparant les résultats de variation dimensionnelles des éprouvettes du mortier témoin avec celles du mortier avec 20% d'ajout de verre, on observe toujours un gonflement.

la différence n'est pas assez importante.

III.2 Conclusion

à l'issu de cette partie d'étude, l'analyse des résultats expérimentaux nous a permis d'arriver à la conclusion:

- **A l'état frais :**
- Les granulats de verre ↗ ⟹ Le temps d'écoulement augmente.
- Les granulats de verre ↗ ⟹ L'air occlus augmente.
- Les granulats de verre ↗ ⟹ La densité diminué
- **A l'état durci :**
- Les granulats de verre ↗ ⟹ RC augmente à 25% de verre, et diminue aux autres pourcentages.
- Les granulats de verre ↗ ⟹ la variation dimensionnelle n'est pas significative
- Les granulats de verre ↗ ⟹ pour les éprouvette vieillis l'absorption d'eau par capillarite reste constante

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de cette partie d'étude, l'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes :

- **A l'état frais :**

  On remarque que le temps d'écoulement et l'air occlus augmente avec le pourcentage de verre dans le mortier aussi bien en cas de substitution qu'en cas d'ajout .

  d'autre part qu' a chaque fois que le pourcentage du verre augmente la densité du mortier diminue pour le simple raison que le verre est plus léger que le sable

- **A l'état durci :**

  Un gain de résistance pour le cas du mortier au 25 % du verre est a remarque en comparaison aux le mortier témoin après 20cycle de vieillissement.

  la variation directionnelle n'est pas significative entre les mortiers vieillis et non vieillis

  après 20 cycle de vieillissement l'absorption d'eau reste presque constante pour tous les pourcentages de substitution

REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **[1]** Y. Ghernouti1, B. Rabehi2. « Récupération Et Valorisation De Déchets des sacs en plastiques dans le domaine de construction », SBEIDCO – 1stInternational Conférence on Sustainable Built Environnement Infrastructures in developing Countries ENSET Oran(Algérie) - Octobre 12-14, 2009.
- **[2]** CIM Béton centre d'information sur le ciment et ces applications, Am principe Paris, Edition 2005.
- **[3]** ACI 305R –91: "Hot Weather Concrete" ACI Materials Journal, Vol. 88, 1991, pp.417-436.
- **[4]** BRAHMA.A «Le béton», Office des publications universitaires, Alger, 1996.
- **[5]** laboukh.a le mortier a base de déchet de verre mémoire de licence uni de Médéa
- **[6]** W.H. ZACHARIASEN, the atomic arrangement in glass, journal of the American chemical society, vol.54. 1932.
- **[7]** M.F. ASHBY, et MF JONES ,Matériaux- propriétés et applications, paris 2eme édition, Dunod 1996.
- **[8]** J. ZARZYCKI, A direct électron microscope study of glass, physic and chemistry of glass, vol.3.1962.
- **[9]** H, SCHOLZE. Le verre, Nature, Structure et proprietes ; institut du verre, Paris 1980.
- **[10]** ApplicaSciences Cellule de diffusion des sciences de la FPMs Rue de Houdain, 97000Mons.http://www.canalu.education.fr/canalu/index.php?q=diagramme+de+phase+de+1%27eau.
- **[11]** Bouriah sihem.Hamdane nassima faisabilité d utilisation de verre dans un mortier de ciment mémoire de master univ de Médéa 2015
- **[12]** Fédération de industrie du verre asbl ver bond van glas industrie de vzw avenue Louise 89, Bte 1/ Louizalaan 89, Bus 1 1050 BRUXELLES/ BRUSSEL.
- **[13]**Ahmed Use of Waste Materials in Highway Construction, Department of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana(May 1991).
- **[14]**projet de valorisation du verre récupéré dans la construction de chaussées Rapport présenté à RECYC-QUÉBEC par Claude Lupien, ing. Professeur Département de genie civil Université de Sherbrooke. Juin 2006.
- **[15]** Louis Gagné Le verre Fiches informatives, RECYC-QUÉBEC , avril 2010.
- **[16]**PIKE, RG, HUBBARD, D. et NEWMAN, E,S. Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction, Highway Research Board Bulletin, n°275, 1960.
- **[17]**Kiang Hwee Tan et all, use of ground glass as a pozzolan; Albuquergue symposiums on utilisation of waste glass in secondary products, Albuquergue, New Mexico, U.S.A 17 Septembre 2012

- **[18]** KOJIMA, T., TAKAGI, N. et HARUTA, K. Expanding characteristics of mortar with glass powder produced from waste bottles, 11th international conference on Alkali Aggregate Reaction, Quebec, p.673-682.
- **[19]** Norme ACI (American concrete institute) 116R-90 (ACI 1990 b).
- **[20]** BARRET, P., MENETRIER, D. et COTTIN, B. Study of silica-lime solution reactions, Cement and Concrete Research, vol.7, n°1, p.61-67 (1977).
- **[21]** BATAYNEH, M., MARIE, I. et ASI, I. Use of selected waste materials in concrete mixes, Waste Management, vol. 27, n°.12, p.1870-1876 (2007).
- **[22]** NISHIKAWA, T., TAKATSU, M. et DAIMON, M. Fracture behavior of hardened cement paste incorporating mineral additions, Cement and concrete research, vol.25, n°6, p.1218-1224 (1995).
- **[23]** SHAYAN, A. et XU, A. Value-added utilisation of waste glass in concrete, IABSE symposium, Melbourne, p.1-11(2002).
- **[24]** NF P 15-471, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments -Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques», Aout 1995.
- **[25]** Fiche technique: « Sable normalisé », 2009.
- **[26]**Benchaa Benabed, Lakhdar Azzouz mémoire d'ingéniorat: «Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes», Département de génie civil, Université Amar Telidji de Laghouat, Algérie
- **[27]**OULD ROUIS Kheir-Eddine, OUDJOUADJ Zakaria, mémoire d'ingéniorat: « Influence de la combinaison du sable de dunes avec le sable de concassage sur les performances du mortier », Université de Médéa, Juin 2010.
- **[28]**NF EN 933-1, ,<< Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques Des granulats, Partie 1 : Détermination de la granularité, Analyse granulométriques par Tamisage >>, AFNOR. 1997.
- **[29]**GEORGES DREUX, JEAN FESTA « Nouveau guide du béton et ses constituants, 8eme édition, Eyrolles ,1998**.**
- **[30]**NFP 18-303, Normes AFNOR: « Eau de gâchage pour béton », Aout 1990.
- **[31]**NF EN 1097-6, , <<Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et Physiques des granulats, Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle du coefficient d'absorption d'eau >>, AFNOR 2001
- **[32]**ENV 197-1, Normes Européenne: « Ciments courants », 1994.
- **[33]**NF P 15-301, Normes AFNOR: « Liants hydrauliques - définitions, classification et spécification des ciments », juin1994.

- **[34]**NA 451, Normes Algérienne: « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée », 1989.
- **[35]**CHERAIT Yacine, NAFA Zahredine: « Eléments de matériaux de construction et essais », Direction de la publication universitaire de Guelma, 2007.
- **[36]** NF P 18-598, Normes AFNOR: « Granulat- Equivalent de sable », Octobre 1991.
- **[37]**DUPAIN.R , « Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire »,2eme édition CASTEILLA, Paris ,2000.
- **[38]**NA 2607, Normes Algérienne: « Granulats - Analyse granulométrique par tamisage», 1990.
- **[39]**[NF P 18- 452], Normes AFNOR: « Béton- mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètre », Mai 1988.
- **[40]** [NF P 15-437], Normes AFNOR: « Liants hydrauliques –Techniques des Essais – Caractérisation des ciments par mesure de la fluidité sous vibration des Mortiers », Juin 1987.
- **[41]**NF EN 12350-6, << Essais pour béton frais .partie 6 : masse volumique>>AFNOR1999.
- **[42]**[NF P 18-412], 1981, << Essais pour béton frais .partie 6 :masse volumique >>
- **[43]**NBN NE 13057, Normes Belge, « Produits et systèmes pour la protection et La réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire », Octobre 1997, Mai 2002.
- **[44]** [NF P 18-404], Normes AFNOR: « Essais pour béton durci - Partie 1: Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules », Décembre 1989.
- **[45]** NASR-EDDINE KEDJOUR « Le laboratoire de béton »: office des Publications universitaires, Alger, 2003.
- **[46]** Krobba b formulation et durabilité du mortier ak base sable dunaire, recueil des act du colloque international pp 297-305 9-11 fevrier 2007
- **[47]**NBN B24-213, Norme Belge, « Essais des Matériaux de maçonnerie, Absorption d'eau sous vide», Octobre 1976**.**
- **[48]**Tung-chai Ling , Chi-Sun Poon, Shi-Cong Kou, Feasability of using recycled glass in architectural cement mortars, Cement and concrete composites , Dept. Faculty of construction and land Use, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong[b].22 July 2010.

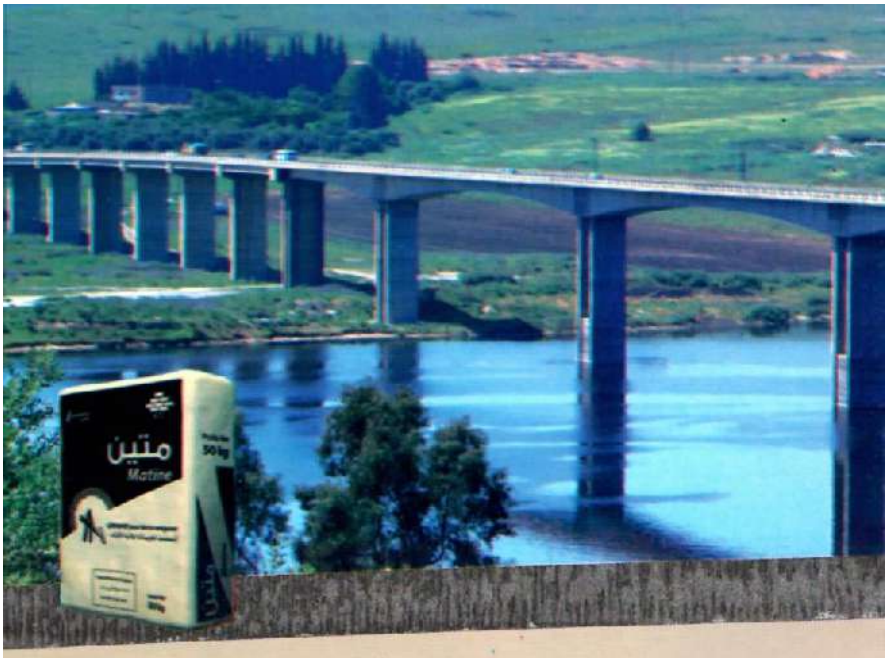
[49] Mohr B.J. , Nanko b H., Kurtis K.E.: Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling. Cement & Concrete Composites 27 2005, 435–448.

[50] Bentchikou M., Debieb F., Beldjaouhar née Blaifi H. Hanini S., Silhadi K. Effect of the unstable climate on the mechanical and thermal performances of a composite with mineral matrix and recycled cellulose fibers, in 8 th International colloquium Industrial floors 2014, 233-236

[51] HADJOUDJA M., Contribution à l'étude physico-mécanique et durabilité du béton de sable de dunes: Influence du traitement de cure et de l'ajout de fillers, mémoire de magister,U. Laghouat 2001.

ANNEXES

Fiche technique du ciment



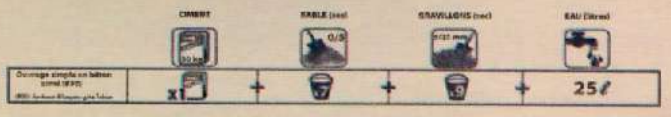
Ciment

MATINE

Ciment pour béton exigeant

- Destiné aux bétons de performances avec une résistance caractéristique à la compression Rc 28> 25 MPa
- Compatible avec les différents adjuvants et ajouts cimentaires
- Approprié à la réalisation des bâtiments élancés, tunnels, barrages et ponts

Nous pouvons utiliser les proportions moyennes mentionnées ci-dessous dans le cas de l'absence d'une formulation étudiée.



Remarque : Ces dosages ne sont donnés qu'à titre indicatif, les résultats de ces formulations peuvent varier selon la nature des matériaux utilisés et les conditions de mise en oeuvre.



LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42.5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), **(NA 5042)**:	7.00 – 9.50
Résidus insolubles (%), **(NA 5042)**:	1.5– 3.0
Teneur en sulfates SO_3 (%), **(NA 5042)**:	2.00 – 2.50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1.90 – 2,30
Teneur en chlorures (%), **(NA 5042)**:	0,01 – 0,03

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C_3S (%) :	58.00 – 64.00
Aluminates tricalciques C_3A (%) :	6,0– 8,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25,5 – 28,00
Finesse suivant la méthode de Blaine **(NA 231)**:	4300 – 4 800
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,5 – 2.5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	120 - 180
Fin de prise (min)	210 - 280

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (Mpa)	> 20
28 jours (Mpa)	≥ 42.5 & 62,5

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Les étapes de fabrication des éprouvettes de mortier

Lors du malaxage



Coulage et compactage



Après le coulage



L'écrasement des éprouvettes

Eprouvette avant écrasement



Eprouvette après écrasement

