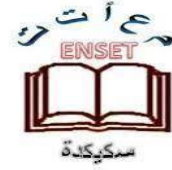


République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement
Technologique-Skikda



Département de Technologie

Filière : Génie Civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur d'Enseignement
Secondaire

Technique

Thème :

**Élaboration d'un mortier mixte (ciment-chaux) à base de
déchet industrielle de marbre.**

Présenté par : DJENDI Ouiam

AOUADI Chourouk

Encadrant(e) : MIROUZI Ghania

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Rôle
DOB Hanane	MCB	ENSET-Skikda	Président
MIROUZI Ghania	MCA	ENSET-Skikda	Encadrant
BISKRI Yasmina	MCA	ENSET-Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

*Nous voulons glorifier et remercier tout d'abord **DIEU**, le tout puissant qui nous a donné la patience, la force et la volonté de continuer toutes ces années d'études et de réaliser ce modeste travail. Nous tenons exprimer notre profonde gratitude envers tous ceux qui nous ont soutenu tout au long de l'élaboration de ce travail.*

*Nos vives gratitude vont à notre encadrante **Dr. MIROUZI Ghania**, pour ses conseils et ses orientations et pour ses efforts intenses de faire un vrai travail de recherche scientifique.*

*Nos remerciements les plus chaleureux aux membres de jury **Dr. DOB Hanane** et **Dr. BISKRI Yasmina**, de nous avoir honoré en présidant et en examinant ce mémoire.*

*Nous tient à exprimer ma profonde gratitude au chef du département de technologie **Dr. RAHMOUNI Salah**.*

*Nos sincères reconnaissances à les ingénieurs de laboratoire Hadjar Soud "**GRAINE Ahmed**", "**MISSADI Fayçel**" et "**LAOUACHERIA Gharib**", aussi l'ingénieur de laboratoire Global concept (Annaba) "**NECIB Toufik**" et chef de laboratoire du département génie civil d'université de Bordj Bou Arreridj "**DJENDI Zoubir**".*

Et finalement un grand merci à nos familles pour leurs sacrifices leurs soutiens et leurs encouragements infinis tout au long de notre parcours scolaire et personnel.

Dédicace

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste Travail de fin d'étude à :

'DJENDI Nour El ddin ', 'BENOUATAS Souria " Mes chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux, que dieu leur prête bonheur et longue vie.

À mes chers grands parents et l'âme de ma grande mère.

À mes chers frères "Imed, Soufian, Taha Amine " et sœurs "Asma, Chourouk " que j'apprécie énormément, je leur souhaite beaucoup de bonheur et de chance.

*À toute ma famille **DJENDI** et **BENOUATAS***

À ma très chère encadrante "MIROUZI Ghania ".

À mes amis qui m'ont soutenu et encouragé.

À mes généreux professeurs et mes chers collègues.

Ouiam

Dédicace

C'est un moment de plaisir de dédier ce modeste travail aux personnes qui ont contribué à cette setenance :

*À ma très chère mère "**Djanette**", ma source de ma vie, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit pour tes sacrifices, ton amour, ta tendresse, ton soutien et ta souffrance.*

*À ma grand-mère "**Aicha**", Que Dieu prolonge votre vie en bonne santé.*

*Au compagnon du chemin, et a l'ami de tous les jours, avec leur bons et leur mauvais côté mon cher époux "**Mouhamed**".*

À tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu.

*À ma binôme "**Ouiam**", ma sœur, mon partenaire de souvenirs, merci pour votre compréhension tous le long de ce projet.*

*À ma chère amie "**Roumaissa**", ma proche, merci de m'avoir accompagné.*

*À ma encadrante "**Mirouzi Ghania**" et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

Chourouk

RÉSUMÉ

La chaux aérienne étant le matériau de base dans l'ancien bâti, elle possède des propriétés compatibles avec les exigences de la réhabilitation, et son usage apporte des avantages, que ce soit sur le côté constructif, esthétique, historique, ou encore environnemental. Son emploi dans le bâtiment comme mortier, enduit ou badigeon remonte à plusieurs millénaires, mais au cours de ses dernières années, elle s'est vue supplantée par le ciment, son successeur artificiel. Avec le développement des idées sur le patrimoine architectural et sa préservation, la chaux retrouve un nouveau souffle. Notre travail a deux objectifs : le premier concerne la substitution de la chaux par le ciment à des taux de 10% jusqu'à 90% et le deuxième sert à valoriser les déchets de marbre et d'utiliser comme filler dans notre mortier.

Pour réaliser cette étude, nous avons analysé l'évolution apportée par la substitution de la chaux aérienne et d'incorporer de déchet de marbre, avec des différents taux sur les propriétés à l'état frais (la densité, l'étalement) et à l'état durci (résistance à la compression et à la traction par flexion trois points).

Les résultats ont montré que la substitution, a modifié les caractéristiques à l'état frais comme à l'état durci des mortiers testés, les résultats sont globalement positifs et prouvent la faisabilité de l'incorporation de la poudre de marbre dans les mortiers mixte (ciment - chaux) de réhabilitation. Ils montrent notamment une amélioration sensible de la prise par rapport au mortier témoin ainsi qu'une nette augmentation de la résistance. Une étude complémentaire sur la durabilité de ces mortiers est cependant nécessaire pour une évaluation totale.

Mots clés : Mortier, chaux aérienne, poudre de marbre, Substitution, réhabilitation, résistance mécanique.

ABSTRACT

Air lime being the basic material in old buildings, it has properties compatible with the requirements of rehabilitation, and its use brings advantages, whether on the constructive, aesthetic, historical, or even environmental side. Its use in construction as mortar, coating or whitewash dates back several millennia, but in recent years it has been supplanted by cement, its artificial successor. With the development of ideas about architectural heritage and its preservation, lime has found a new lease of life. The aim of this work is to study the valorization of lime to make plaster mortars based on the substitution of aerial lime by Portland cement from 10% to 90% with the incorporation of marble waste, in order to have better performance allowing it to meet the needs of the construction market. The recovery and valorization of waste (Marble) from quarries proves to be a solution with two impacts: the environmental impact through the reduction of pollution and the recovery of the space occupied by this waste and the economic impact through the use of the latter in the field of building and public works.

To carry out this study, we analyzed the evolution brought about by the substitution of aerial lime and the incorporation of marble waste, with different rates on the properties in the fresh state (density, spreading) and at the hardened state (resistance to compression and traction by three-point bending).

The results showed that the substitution modified the characteristics in the fresh state as well as in the hardened state of the mortars tested, the results are generally positive and prove the feasibility of incorporating marble powder into mixed mortars (cement - lime) rehabilitation.

In particular, they show a significant improvement in setting compared to the control mortar as well as a clear increase in resistance. However, a complementary study on the durability of these mortars is necessary for a full assessment.

Keywords : Mortar, air lime, marble powder, Substitution, rehabilitation, mechanical resistance.

ملخص

الجير الهوائي هو المادة الأساسية في المباني القديمة، وله خصائص تتوافق مع متطلبات إعادة التأهيل، ويعود استخدامه بمزايا سواء على الجانب الإنشائي أو الجمالي أو التاريخي أو البيئي. يعود تاريخ استخدامه في البناء كملاط أو طلاء أو تبييض إلى عدة آلاف من السنين، ولكن في السنوات الأخيرة تم استبداله بالاسمنت، خليفته الاصطناعي. مع تطور الأفكار حول التراث المعماري والحفاظ عليه، وجد الجير فرصة جديدة للحياة. الهدف من هذا العمل هو دراسة تئمين الجير لصنع الملاط الجبس على أساس استبدال الجير الجوي بالاسمنت البورتلاندي من 10% إلى 90% مع دمج مخلفات الرخام للحصول على أداء أفضل يسمح له بالالتقاء احتياجات سوق البناء.

إن استعادة وتئمين النفايات (الرخام) من المحاجر يثبت أنه حل ذو تأثيرين: الأثر البيئي من خلال الحد من التلوث واستعادة المساحة التي تشغلها هذه النفايات والأثر الاقتصادي من خلال استخدام الأخير في مجال البناء والأشغال العامة. لإجراء هذه الدراسة، قمنا بتحليل التطور الناتج عن استبدال الجير الجوي ودمج نفايات الرخام، بمعدلات مختلفة على الخصائص في الحالة الطازجة (الكثافة، والانتشار) وفي الحالة المتصلبة (مقاومة الضغط والانتشار). الجر عن طريق الانحناء ثلاث نقاط). أظهرت النتائج أن الاستبدال أدى إلى تعديل الخصائص في الحالة الطازجة وكذلك في الحالة المتصلبة للمونة المختبرة، وكانت النتائج إيجابية بشكل عام وتثبت جدوى إعادة تأهيل دمج مسحوق الرخام في الملاط المخروط (الاسمنت - الجير). وعلى وجه الخصوص، فإنها تظهر تحسناً كبيراً في الإعداد مقارنةً بمونة التحكم بالإضافة إلى زيادة واضحة في المقاومة. ومع ذلك، من الضروري إجراء دراسة تكميلية حول متانة هذه الملاط لإجراء تقييم كامل.

الكلمات المفتاحية: الملاط، الجير، مسحوق الرخام، إستبدال، ترميم، مقاومة ميكانيكية.

Sommaire

SOMMAIRE

Titres	Pages
Remerciements	VII
Dédicace	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
Sommaire	VI
Liste des tableaux	XV
Liste des figures	XVI
Liste des notations et symboles	XIX
Introduction générale	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I. Généralité sur les mortiers	4
I.1. Introduction	4
I.2. Historique sur les mortiers	4
I.3. Définition	4
I.4. Constituants des mortiers	5
I.4.1. Le liant	5
I.4.1.1. Le ciment	6
I.4.1.2. La chaux	7
I.4.2. Le sable	8
I.4.3. L'eau de gâchage	9
I.4.4. Les adjuvants	9
I.4.5. Les ajouts	9
I.5. Rôle d'utilisation de mortier	10
I.6. Types des mortiers	10
I.6.1. Mortier de ciment	10
I.6.2. Mortier de chaux	10
I.6.3. Mortier bâtard	10
I.6.4. Mortier réfractaire	10
I.6.5. Mortier rapide	10
I.6.6. Mortier industrielle	11
I.7. Classification des mortiers	11
I.7.1. Selon la masse volumique	11
I.7.1.1. Mortier lourds	11
I.7.1.2. Mortiers légers	11
I.7.1.3. Mortiers (légers) isolants	11
I.7.2. Selon la nature de liant et leur domaine d'utilisation	12
I.7.2.1. Classification selon la nature de liant	12
I.7.2.2. Classification selon leur domaine d'utilisation	12

Sommaire

I.7.3. Classification selon le mode de préparation	12
I.8. Caractérisation des mortiers	12
I.8.1. Ouvrabilité	12
I.8.1.1. Table à secousses	13
I.8.1.2. Le maniabilimètre du LCPC	13
I.8.1.3 Le cône	14
I.8.2. La prise	14
I.8.3. Retraits et gonflements	14
I.9. Propriétés physicomécaniques des mortiers	15
I.9.1. Masse volumique	15
I.9.2. Absorption d'eau	15
I.9.3. Résistance mécanique	15
I.10. Préparation des mortiers	16
I.10.1. Préparation manuelle	16
I.10.2. Préparation mécanique	16
I.11. Emplois des mortiers	17
I.11.1. Le hourdage de maçonnerie	17
I.11.2. Les enduits	17
I.11.3. Les chapes	18
I.11.4. Les scellements et les calages	18
I.12. Valorisation des déchets en génie civil	19
I.12.1. Introduction	19
I.12.2. Définition des déchets	19
I.12.3. Origine de la production des déchets	20
I.12.4. Classification des déchets	20
I.12.4.1. Selon leur nature	21
I.12.4.2. Selon le mode de traitement et d'élimination	21
I.12.4.3. Selon les propriétés du déchet	21
I.12.5. Valorisation des déchets	21
I.12.6. Intérêt de la valorisation	22
I.12.7. Utilisation des déchets et sous-produits dans le domaine de génie civil	22
I.13. Définition de marbre	23
I.13.1. Origine de marbre	23
I.13.2. Type de marbre	24
I.13.2.1. Marbre de Carrare	24
I.13.2.2. Marbre Calacatta	24
I.13.2.3. Marbre Emperador	25
I.13.2.4. Marbre Crema Marfil	25
I.13.2.5. Marbre Staturio	26
I.13.2.6. Marbre Marquina	26
I.13.3. Valorisation des déchets de marbre	26
I.13.4. Propriétés physico-chimique du marbre	27
I.13.4.1. Propriétés physiques du marbre	27

Sommaire

I.13.4.2. Propriétés chimiques	28
I.14. Réutilisation	28
I.15. Recyclage	28
I.16. Conclusion	29
CHAPITRE II : CARACTERESATION DES MATERIAUX EXPERIMENTALES ET FORMULATION DES MORTIERS	
II. Introduction	31
II.1. Cimenterie de Hadjar-Soud	31
II.1.1. Fonctionnement de laboratoire de Hadjar-Soud	32
II.2. Laboratoire Global Concept	33
II.3. Laboratoire de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj	34
II.4. Matériaux utilisés	35
II.4.1. Ciment	35
II.4.2. Sable normalisé	37
II.4.3. Eau de gâchage	37
II.4.4. Chaux aérienne éteinte	38
II.4.5. Poudre de marbre	39
II.5. Caractérisation des matériaux	40
II.5.1 Caractéristique physiques	40
II.5.1.1. La masse volumique absolue	40
II.5.1.2. La masse volumique apparente	41
II.5.1.3. Finesse de mouture (SSB)	41
II.5.1.4. Détermination du temps de prise de « NA 231 »	42
II.5.1.5. Détermination la consistance normale	43
II.6. Méthode de formulation des mortiers	44
II.6.1. Formulation des mortiers témoin	44
II.6.2. Méthode de formulation des mortiers mixte chaux-ciment	45
II.6.3. Méthode de formulation des mortiers adonnée de poudre de marbre	46
II.7. Confection des mortiers d'étude	47
II.7.1. Malaxage et vibration	47
II.7.2. Conservation des éprouvettes	48
II.7.2.1. Conservation des éprouvettes avant démoulage	48
II.8. Caractérisation des mortiers à l'état frais	49
II.8.1. Masse volumique	49
II.8.2. Essai d'étalement à la table à secousses	50
II.9. Essai sur mortier durci	50
II.9.1. Essai de traction par flexion trois points	50
II.9.2. Essai de compression	51
II.10. Conclusion	52
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	
III.1. Introduction	54
III.2. Caractérisation des mortiers à l'état frais	54

Sommaire

III.2.1. Effet de la substitution de la chaux aérienne de la poudre de marbre sur les délais de prise	54
III.2.2. Effet de la substitution de la chaux aérienne sur la compacité des mortiers	56
III.3. Caractérisation des mortiers à l'état durci	57
III.3.1. Masse volumique à l'état durci	57
III.3.2. Résistance en traction par flexion 3 points	59
III.3.2.1. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la flexion des mortiers	59
III.3.2.2. Effet de la substitution de la chaux aérienne sur les résistances à la flexion de mortier mixte (Ciment-Chaux)	60
III.3.2.3. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la flexion des mortiers mixtes (Ciment-Chaux)	61
III.3.3. Résistance en compression	62
III.3.3.1. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la compression des mortiers	62
III.3.3.2. Effet de la substitution de la chaux sur les résistances à la compression de mortier mixte (Ciment-Chaux)	63
III.3.3.3. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la compression des mortiers mixtes (Ciment-Chaux)	64
III.4. Mode de rupture	65
III.5. Conclusion	67
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	69
REFERENCES	
NORMES	
ANNEXES	

Liste des tableaux
Chapitre I : Étude Bibliographique

Tableau I.1	Types de chaux	8
Tableau I.2	Composition chimique de la poudre de marbre	28

Chapitre II : Caractérisation des matériaux expérimentales et Formulation des mortiers.

Tableau II.1	Compositions chimiques du ciment (Voir annexe)	36
Tableau II.2	Composition minéralogique du ciment	36
Tableau II.3	Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ 42.5	36
Tableau II.4	Analyse chimique de l'eau de gâchage	38
Tableau II.5	Composition Chimique de la chaux en (%)	38
Tableau II.6	Caractéristiques physique de la chaux	39
Tableau II.7	Composition chimique de la poudre de marbre	39
Tableau II.8	Propriétés physique de la poudre de marbre	39
Tableau II.9	Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux	44
Tableau II.10	Composition des mortiers mixte	46
Tableau II.11	Composition des mortiers témoin et mixte incorporé de poudre de marbre	46
Tableau II.12	Plages de consistances des mortiers (NBN EN 1015-3, 2007)	50

Liste des figures

Chapitre I : Etude Bibliographique

Figure I.1	Le mortier	5
Figure I.2	Composition des mortiers	5
Figure I.3	Schémas de principe de fabrication des différents types de chaux	8
Figure I.4	Principe de fonctionnement de table à secousses	13
Figure I.5	Principe de fonctionnement de maniabilimètre	14
Figure I.6	Préparation manuelle du mortier	16
Figure I.7	Préparation mécanique du mortier	17
Figure I.8	Déchets	20
Figure I.9	Roche métamorphique	23
Figure I.10	Le marbre	23
Figure I.11	Historique de marbre	24
Figure I.12	Marbre de Carrare	24
Figure I.13	Marbre de Calacatta	25
Figure I.14	Marbre de Emperador	25
Figure I.15	Marbre de Crema Marfil	25
Figure I.16	Marbre de Statuario	26
Figure I.17	Marbre Nero Marquina	26
Figure I.18	Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de marbre	28

Chapitre II : Caractérisation des matériaux expérimentales et Formulation des mortiers.

Figure II.1	Société de cimenterie de Hadjar-Soud (SCHS)	31
Figure II.2	Laboratoire de Hadjar Soud	33
Figure II.3	Laboratoire Global Concept	34

Liste des figures

Figure II.4	Laboratoire de l'université de Bordj-Bou-Argeridj	35
Figure II.5	Ciment CPJ-CEM II de Classe 42,5 N	36
Figure II.6	Sable Normalisé	37
Figure II.7	Chaux aérienne éteinte	39
Figure II.8	Diffractionogramme de rayons X de la chaux aérienne éteinte	39
Figure II.9	Poudre de marbre	40
Figure II.10	Diffractionogramme de rayons X de la poudre de marbre	40
Figure II.11	Essai de la masse volumique absolue	40
Figure II.12	Essai de la masse volumique apparente	41
Figure II.13	Appareil de Blaine	42
Figure II.14	Appareil prismètre automatique multiposte	43
Figure II.15	Essai de la consistance normale	43
Figure II.16	Malaxeur	45
Figure II.17	Mélange	45
Figure II.18	Exemple de détermination du dosage en eau du mortier	45
Figure II.19	Remblaiement du moule	47
Figure II.20	Table à chocs	47
Figure II.21	Conservation des éprouvettes	48
Figure II.22	Mesure de la masse volumique réelle.	49
Figure II.23	Étalement à la table à secousses.	50
Figure II.24	Dispositif d'essai de traction par flexion 3 points.	51
Figure II.25	Dispositif d'essai de compression.	51

Chapitre III : Résultats et discussion

Figure III.1	Effet de la substitution de la chaux sur les délais de prise.	55
Figure III.2	Effet d'incorporation de poudre de marbre sur les délais de prise.	55
Figure III.3	Effet de la substitution de la chaux aérienne sur la masse volumique du mortier mixte.	56
Figure III.4	Mesure de volume de mortier à l'état durci.	57
Figure III.5	Évolution de la masse volumique en fonction du pourcentage de poudre de marbre.	57

Liste des figures

Figure III.6	Évolution de la masse volumique en fonction de la substitution par la chaux aérienne.	58
Figure III.7	Évolution de la masse volumique en fonction du pourcentage de poudre de marbre.	58
Figure III.8	Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la flexion des mortiers.	59
Figure III.9	Effet de la substitution de la chaux aérienne sur les résistances à la flexion des mortiers.	60
Figure III.10	Effet de de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la flexion des mortiers mixte.	61
Figure III.11	Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la compression des mortiers.	62
Figure III.12	Effet de la substitution de la chaux sur les résistances à la compression de mortier mixte.	63
Figure III.13	Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la compression de mortier mixte.	64
Figure III.14	Mode de rupture des éprouvettes en flexion de mortier mixte additionné de poudre de marbre.	66
Figure III.15	Mode de rupture des éprouvettes en compression de mixte et mortier témoin.	66

Notations et symboles

SCHS	Société de cimenterie de Hadjar-Soud
CEN	Comité Européen de Normalisation
M	Masse
V	Volume
ρ_{abs}	Masse volumique absolue
ρ_{app}	Masse volumique apparente
e	Porosité
E/C	Rapport eau/ciment
NF	Normes françaises
NE	Normes Européennes
MT	Mortier témoin
CH	Chaux
CI	Ciment
MPa	Méga pascal
kg	Kilo gramme
C₃S	Silicate tricalcique
CaCO₃	Carbonate de calcium
CSH	Silicate de calcium hydraté

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Depuis l'époque de la préhistoire où l'homme vivait dans des grottes, jusqu'à nos jours où les constructions modernes atteignent des records de hauteur, les matériaux de constructions ont considérablement évolué. Mais certains matériaux traditionnels ont su garder une continuité à travers le temps. C'est le cas de la chaux, matériau ancien utilisé au cinquième millénaire avant J-C en badigeon puis utilisé avec succès par les Grecs et les Romains comme mortier pour bâtir, décorer et traiter les sols. Aujourd'hui, ce matériau a été délaissé au profit du ciment, plus résistant certes, mais plus rigide et moins adapté aux travaux de réhabilitation et de restauration du vieux bâti.

Mais avec le développement des réflexions sur le patrimoine architectural, et les monuments historiques, la chaux s'est à nouveau imposée grâce à ses propriétés qui répondent aux caractéristiques du bâti ancien, permettant ainsi sa pérennité.

Compte tenu des circonstances auxquelles nous sommes actuellement confrontés en raison de la demande croissante dans les travaux de construction, l'exploration et la recherche sont devenues nécessaires et appropriées.

Devant les besoins croissants des ressources en matériaux et afin de répondre aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels, notamment dans le domaine de Génie Civil. L'idée de recycler et d'ajouter des déchets dans la construction a ces dernières années, en raison de nombreux avantages techniques et écologiques.

Les déchets de marbre constituent une alternative intéressante qui peut augmenter la performance des mortiers, ces déchets sont en effet toujours disponibles sur les chantiers, et leur utilisation représente une solution efficace pour l'industrie en termes technologique, économique et environnemental.

L'objectif du présent travail, d'une part, la substitution de la chaux aérienne par le ciment et d'autre part la valorisation de déchet de marbre pour confectionner des mortiers d'enduits, afin d'avoir des performances meilleures lui permettant de répondre aux besoins du marché de la construction. Il convient, donc, d'étudier les caractéristiques physiques et mécaniques, des échantillons réalisés. A cet effet, nous avons mené une série d'essais sur la résistance mécanique.

Introduction générale

Pour atteindre cet objectif, notre étude en tout en visant ces deux principaux horizons :

La protection de l'environnement par l'élimination de ces déchets nocifs pour la nature.

L'exploitation des quantités colossales de chaux existantes dans notre pays l'Algérie, qui réduit le coût et augmente la résistance mécanique du mortier.

Une étude expérimentale a été réalisée et présentée dans ce mémoire qui comprend trois chapitres :

Le premier chapitre : présente une synthèse bibliographique sur les mortiers et la valorisation des déchets de marbre dans le domaine GC.

Le deuxième chapitre : présente la caractérisation de l'ensemble des matériaux utilisés au cours de cette étude, la procédure adoptée pour la formulation des différents mortiers mixte (Ciment – Chaux), avec l'incorporation de la poudre de marbre et enfin les méthodes expérimentales employées pour faire aboutir notre travail.

Le troisième chapitre : est consacré à l'analyse et la discussion de l'ensemble des résultats obtenus.

Et enfin, ce mémoire s'achève par une conclusion générale rappelant les principaux résultats obtenus au cours de cette étude.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Étude bibliographique

I. Généralité sur les mortiers :

I.1. Introduction :

En général, l'architecture et l'ingénierie sont composées d'éléments en béton (poteaux, poutres, etc.) nous devons nous assurer que ces éléments et protéger avec un revêtement. Ces opérations étaient effectuées au moyen de mortiers, Il est composé habituellement d'un mélange de ciment, d'eau et des granulats, mais il est considéré comme homogène.

Divers domaine sa savoir bâtiments, ouvrages d'arts, constructions spéciales,...Composés essentiellement à partir de liants hydrauliques ,ce sont des systèmes rendus complexes par l'incorporation de nombreux adjuvants, sous-produits et déchets issus des industries de fabrication des matériaux de construction, dont les effets, bénéfiques et parfois antagonistes ne sont pas encore totalement compris [1].

Les propriétés du mortier dépendent des propriétés physiques et mécaniques à l'état frais et durci, (taille et forme des granulats et fabrication des mélanges, proportions, modes de préparation).

Les déchets de marbre constituent un choix intéressant qui peut augmenter les performances des mortiers. Ces déchets sont en effet toujours disponibles sur les chantiers, leur utilisation représente une solution efficace pour l'industrie en termes technologique, économique et environnemental.

Le présent chapitre est une étude bibliographique des connaissances sur les principales propriétés concernant les propriétés des mortiers comprenant des déchets de marbre [2].

I.2. Historique sur les mortiers :

L'histoire du mortier remonte à l'Antiquité et est intimement liée celle de la chaux. Le mortier romain avait des proportions de chaux et de sable fin. La présence de la chaux et la carbonatation permettaient à ce mortier de durcir en vieillissant, lui conférant sa pérennité [3].

Les Romains ont mis aussi au point le mortier de tuileau, un mélange de chaux et défragmentes de briques ou tuiles et parfois de sable. En argile cuite, le tuileau agissait Pen dans la prise du mortier [4].

I.3. Définition :

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différant selon les réalisations et d'adjuvant (figure I.1). Dans ce

Chapitre I : Étude bibliographique

chapitre, nous présentèrent les différents types ainsi que les caractéristiques principales telles que l'ouvrabilité, la prise, le retrait,... [5].



Figure I.1. Le mortier [5].

I.4. Constituants des mortiers :

Les composants principaux des mortiers sont : liant, sable et d'eau.

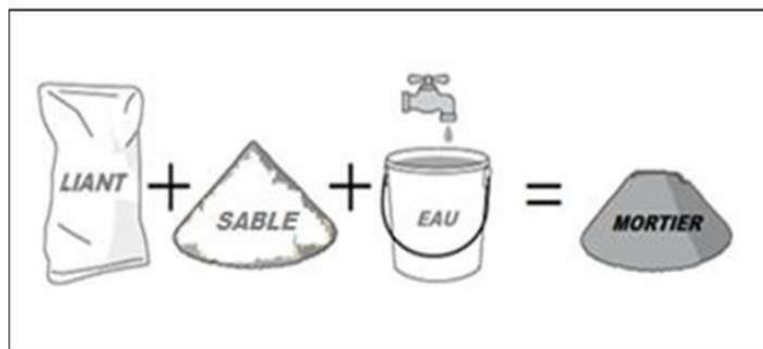


Figure I.2. Composition des mortiers [5].

I.4.1. Le Liant :

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment ou la chaux obtenue par la cuisson, ces dernières sont des matières pulvérulentes à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux [6].

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.

I.4.1.1. Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, finement moulu qui, gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement par suite de réactions d'hydratation. Il est formé de constituants anhydres cristallisés ou vitreux contenant essentiellement de la silice, de l'alumine et de la chaux [7]. Le ciment Portland est un mélange de clinker et de sulfate de calcium. Le clinker est obtenu à la suite de réactions chimiques qui se produisent à haute température (1450°C) et qui transforment la matière première constituée essentiellement de (80%) de calcaire, (20%) d'argile et de fer en silicates et en aluminates de calcium [8].

➤ **Processus de fabrication du ciment :**

En principe, la fabrication du ciment Portland est simple. Elle est faite à partir des matières premières abondantes. Des matières premières mélangées, habituellement calcaire et argile, sont chauffées dans un four de 1400 à 1600 C°, la température à laquelle ces matériaux agissent l'un sur l'autre chimiquement pour former les composants du ciment Portland [9].

➤ **Classification des ciments en fonction de leur composition :**

Les ciments constitués de clinker et des constitués secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [10] :

CEM I : Le ciment portland (CPA-dans la notation française).

CEM II : Le ciment portland composé (CPJ).

CEM III : Le ciment de haut fourneau (CHF).

CEM IV : Le ciment pouzzolanique (CPZ).

CEM V : Le ciment au laitier et aux cendres (CLC).

➤ **Classification des ciments en fonction de leur résistance normale :**

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours, des sous classes (R) sont associés à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5 [9].

➤ **Classification des ciments suivant le type d'environnement :**

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux de type :

- Ciment PM (NF P 15-317) : Résistant à l'eau de mer est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminat tricalcique) [11].
- Ciment ES (XP P 15-319) : Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement [12].
- Ciment CP1 et CP2 (NF P 15-318) : pour béton précontrainte, on distingue deux types de ciment qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure SO_4^{2-} [13].

I.4.1.2. La chaux :

La chaux est une substance solide, blanche lorsqu'elle est pure. Elle est obtenue par calcination des calcaires naturels tendres et craies, avec réduction en poudre par extinction suivie ou non de mouture. On distingue fondamentalement deux catégories de chaux : la chaux grasse aérienne et la chaux hydraulique. Les chaux sont généralement classées en fonction de la proportion d'impuretés argileuses qu'elles renferment [14].

➤ **Procédé de fabrication de la chaux :**

Le processus de fabrication de la chaux hydraulique et de la chaux aérienne est le même. La différence réside dans la qualité des matières premières et la température de cuisson (figure I.3) [15].

Chapitre I : Étude bibliographique

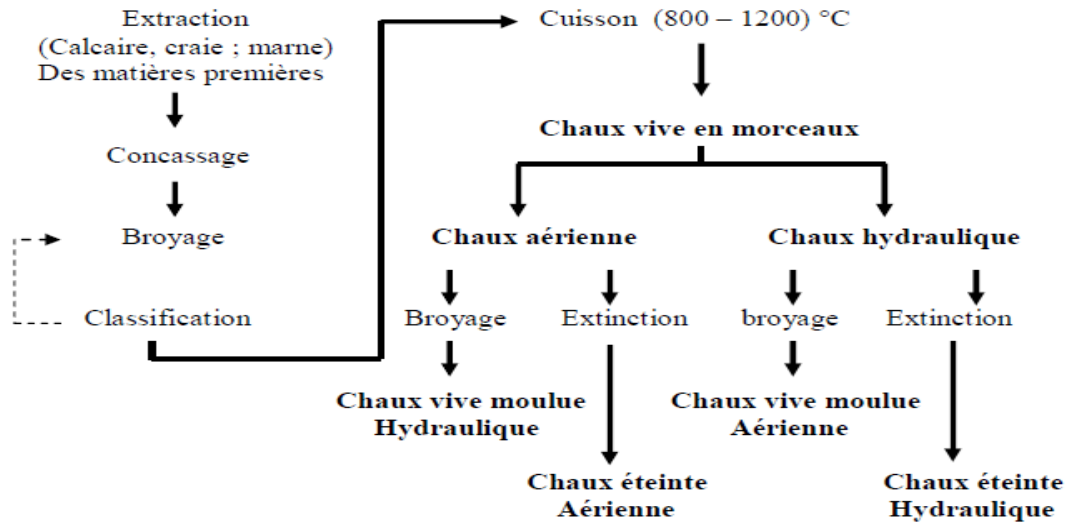


Figure I.3. Schémas de principe de fabrication des différents types de chaux [15].

➤ Types de chaux :

Tableau I.1. Types de chaux [15].

Matières	Calcination (900)°C	Extinction par hydratation	Après tamisage et broyage, produits commercialisés
Calcaire siliceux et alumineux	CHAUX VIVE + silicates et aluminates	CHAUX ÉTEINTE + silicates et aluminates	CHAUX HYDRAULIQUE NATURELLE (NHL)*
Calcaire à faible teneur en silice et alumine	CHAUX VIVE	CHAUX ÉTEINTE	CHAUX VIVE CHAUX CALCIQUE (CL)*
Calcaire dolomitique à faible teneur en silice et alumine			CHAUX DOLOMITIQUE (DL)*

* Désignations issues de la normalisation européenne (ENV 459-1)

- NHL : Natural hydraulic lime (chaux hydraulique naturelle)

- CL : Calcium lime (chaux calcique)

- DL : Dolomitic lime (chaux dolomitique)

I.4.2. Le sable :

Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du mortier ou du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre les particules des composants (ciment, sable et gravier) pour une meilleure cohésion du mortier ou du béton.

Le sable est un matériau granulaire composé de particules (quartz, micas, feldspaths) issues

de la dégradation de roches. Autre type de sables utilisés sont 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. 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 [16].

I.4.3. L’eau de gâchage :

L’eau joue un rôle important, allégera hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du mortier ou du béton, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L’eau doit être propre et ne pas contenir d’impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L’eau potable convient toujours le gâchage à l’eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d’eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale [17].

I.4.4. Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques que l’on utilise dans le cas des mortiers ou des bétons. Ils modifient les propriétés des mortiers et des bétons auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d’adjuvants [16] :

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

I.4.5. Les ajouts :

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d’obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d’une gâchée à l’autre des ajouts doit être utilisés dans les mortiers pour améliorer certaines propriétés [16] :

- Poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice, etc....).
- Fibres de différentes natures.
- Colorants (naturels ou synthétiques).

Chapitre I : Étude bibliographique

- Polymères.

I.5. Rôle d'utilisation de mortier :

La pâte plastique obtenue peut jouer plusieurs rôles essentiels [18] :

- Assurer la liaison, la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux.
- Protéger les constructions contre l'humidité due aux intempéries ou remontant du sol.
- Sous forme d'enduits aériens.
- Sous forme d'écrans étanches.
- Constituer des chapes d'usure, un pour dallages en béton.
- Devenir la matière première dans la fabrication de blocs manufacturés, carreaux, tuyaux et divers éléments moulés.
- Être le constituant essentiel du béton.
- Consolide certains sols de fondations sous forme d'injection.

I.6. Types des mortiers :

Les mortiers se partagent en différents types [19] :

I.6.1. Mortier de ciment :

Les mortiers de ciments, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg pour 1m³ de sable.

I.6.2. 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.

I.6.3. Mortier bâtard :

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

I.6.4. Mortier réfractaire :

Les mortiers réfractaires, sont employés dans le cas où des éléments scellés ou assemblés sont soumis à une température élevée comme dans la fabrication de barbecue. Ces types de mortiers peuvent résister jusqu'à une chaleur de près de 1000 degrés....

I.6.5. Mortier rapide :

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

I.6.6. Mortier industrielle :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins :

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

I.7. Classification des mortiers :

I.7.1. Selon la masse volumique :

À l'état sec les mortiers sont divisés en [20] :

I.7.1.1. Mortiers lourds : à masse volumique de 1500 kg/m^3 et plus ; pour la préparation de ces mortiers, on utilise des sables lourds quartzeux et autres.

I.7.1.2. Mortiers légers : à masse volumique inférieure à 1500 kg/m^3 dont les agrégats sont dessablés poreux et légers de pierre ponce, de tuf, laitiers, céramiques et autres fins agrégats légers.

I.7.1.3. Mortiers (légers) isolants : Maçonnerie dont le poids volumique sec après durcissement est inférieur à 1300 kg/m^3 . Certains adjuvants rendent ces mortiers de maçonnerie plus légers et donc plus isolants son rôle est l'amélioration de la résistance thermique de la maçonnerie. À titre d'exemple de comparaison en termes de masses volumique :

- Le mortier de ciment : 1900 kg/m^3 .
- Le mortier bâtard : 1600 kg/m^3 .

Chapitre I : Étude bibliographique

I.7.2. Selon la nature de liant et leur domaine d'utilisation :

I.7.2.1. Classification selon la nature du liant :

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en [21] :

- Mortier de ciment portland.
- Mortier de chaux.
- Mortiers bâtards.

I.7.2.2. Classification selon leur domaine d'utilisation :

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, et ce dernier qu'est très vaste et leurs domaines permet de citer les catégories suivantes [21] :

- Mortier de pose.
- Mortier de joints.
- Mortier pour les crépis.
- Mortier pour le sol.
- Mortier pour les stucs.
- Pierres artificielles.
- Support pour les peintures murales.
- Mortier d'injection.
- Mortier pour les mosaïques.
- Mortier de réparation pour pierres.

I.7.3. Classification selon le mode de préparation :

Les mortiers peuvent être [22]:

- préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants, adjuvants compris.
- préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs prédosés (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.

I.8. Caractérisation des mortiers :

I.8.1. Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont [23]:

I.8.1.1. La table à secousses : L'essai d'étalement sur table de secousses (**Flow-test**) consiste à utiliser une table à choc comprenant un plateau métallique animé d'un mouvement vertical. Un moule tronconique disposé sur cette table et du matériau à étudier (mortier ou béton). Après arasement et démoulage (en soulevant le moule), on donne à la table, à l'aide d'une manivelle, 15 chocs en 15 secondes. Le matériau s'étale sous forme d'une galette dont on mesure les deux diamètres perpendiculaires. L'étalement en % est donné par la formule [21] :

$$E\% = \frac{D_r - D_i}{D_i} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

D_r = diamètre final

D_i = diamètre initial.

I.8.1.2. Le maniabilimètre du LCPC :

L'essai consiste à caractériser la consistance par la mesure du temps d'écoulement d'un béton ou d'un mortier soumis à une vibration.

Le béton ou le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison. Avec l'appareil **a)**, il est mis en place par piquage en quatre couches ; avec l'appareil **b)**, il est rempli sans tassement, à l'aide d'une pelle de terrassier. Après remplissage, il faut araser la surface libre à la règle. La mise en marche du vibreur (50 Hz) est provoquée par le retrait de la cloison. Au même instant le chronomètre est déclenché. On mesure la durée d'écoulement du matériau pour atteindre un repère donné [19].

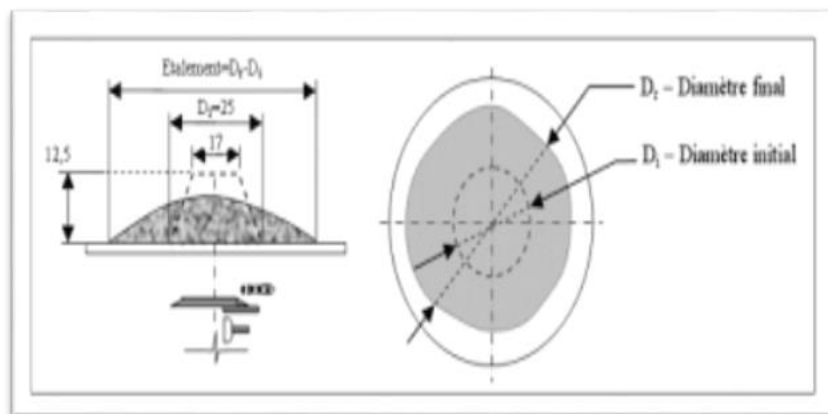


Figure I.4. Principe de fonctionnement de table à secousses [19].

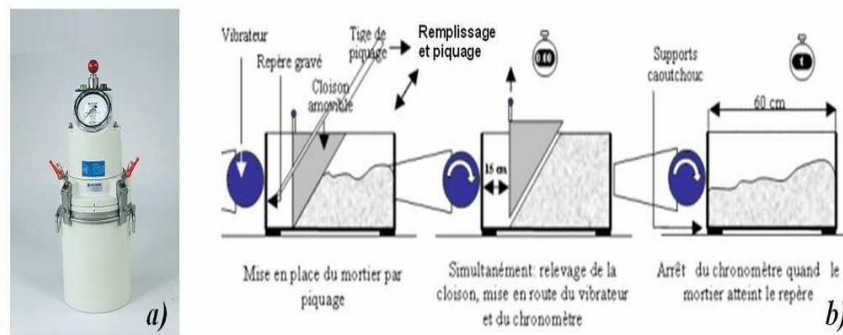


Figure I.5. Principe de fonctionnement de maniabilimètre [19].

I.8.1.3. Le cône :

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur [21].

I.8.2. La prise :

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) à l'aide de l'appareil de Vicat. Il est possible d'obtenir le temps de prise d'un mortier (normal) avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 g sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 g. 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 [23].

I.8.3. Retraits et gonflements :

Les retraits se mesurent sur des prismes 4x4x16cm en mortier 1/3, 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) [23]. Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes

Chapitre I : Étude bibliographique

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) [22].

I.9. Propriétés physicomécaniques des mortiers :

I.9.1. Masse volumique :

La masse volumique est un paramètre physique qui donne des informations sur la masse d'un échantillon ou d'un corps divisé par son volume. La masse volumique est généralement représentée par la lettre rho « ρ ». On utilise aussi fréquemment la lettre latine «d» [21].

$$\rho = \frac{\text{masse}}{\text{volume}} \quad (\text{g/cm}^3, \text{kg/m}^3) \dots\dots\dots(2)$$

I.9.2. Absorption d'eau :

La capacité d'absorption d'eau (CAE) des matériaux de constructions est leurs pouvoirs d'absorber et de retenir l'eau. Elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé dans l'eau et s'exprime en pourcentage de la masse (capacité d'absorption massique) ou du volume (capacité d'absorption volumique). Elle se calcule d'après la formule suivante [20] :

$$\text{CAE} = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sec}}} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

Où :

m_{sat} : la masse du matériau saturé d'eau.

m_{sec} : la masse du matériau sec.

CAE : varie principalement en fonction du volume des pores, de leurs types et de leurs dimensions.

I.9.3. Résistances mécanique :

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de (4x4x16) cm³ 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).

Chapitre I : Étude bibliographique

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs [23] :

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

I.10. Préparation des mortiers :

I.10.1. Préparation manuelle :

Il faut tout d'abord, avec la pelle, mélanger à sec le sable et liant aussi parfaitement que possible et former ensuite au milieu du mélange une cuvette qui recevra l'eau de gâchage.

La masse est humectée progressivement puis malaxée à l'aide d'un robot à mortier.

Ce pendant il faut savoir :

- Que le mélange à sec doit être fait soigneusement pour que le liant soit parfaitement réparti dans toute la masse du sable.
- Que l'eau doit être versée en plusieurs fois, d'abord pour la commodité et la qualité du mélange, ensuite parce qu'il est facile d'ajouter un peu d'eau alors qu'on ne peut pas en enlever [24].



Figure I.6. Préparation manuelle du mortier [23].

I.10.2. Préparation mécanique :

La fabrication des mortiers se fait à l'aide des engins appelés bétonnières. Avec certains modèles, le mélange doit être fait à sec, en partie avant l'introduction dans le tambour mélangeur où il est mouillé convenablement. D'autres font elles-mêmes le mélange

Chapitre I : Étude bibliographique

complet : on introduit soit directement dans le tombeur, soit dans une benne, l'ensemble des éléments constitutifs du mortier. L'opération ne dure que quelques minutes, elle est beaucoup plus rapide et moins pénible qu'à la main [23].

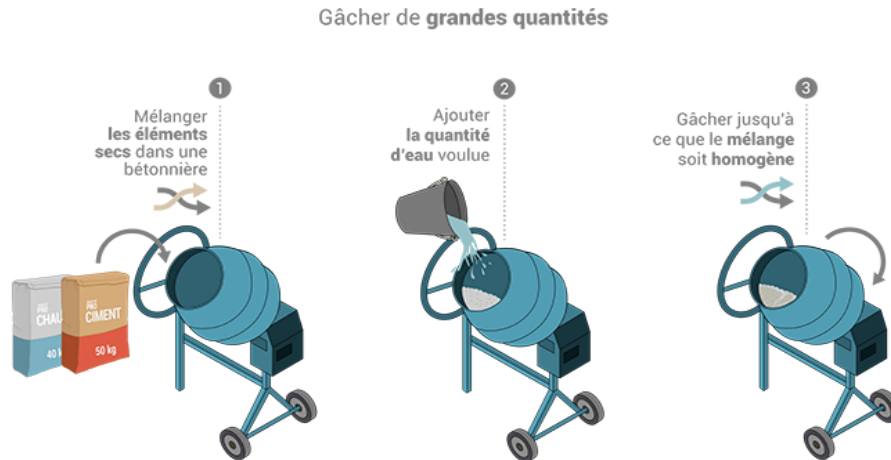


Figure I.7. Préparation mécanique du mortier [23].

I.11. Emplois des mortiers :

Selon les auteurs [25], les mortiers peuvent être employés pour :

I.11.1. Le hourdage de maçonnerie :

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre 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 importante pour être étanche. On a généralement à utiliser un mortier



ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il lie sans se fissurer.

I.11.2. Les enduits :

Les enduits au mortier sont utilisés aussi bien pour les travaux neufs que pour la réparation des façades.

Les enduits remplissent plusieurs rôles :

Chapitre I : Étude bibliographique

- Protection des gros œuvres contre les intempéries.
- Imperméabilisation, tout en laissant respirer le support.
- L'esthétique (aspect décoratif, Couleur).



I.11.3. Les chapes :

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau de dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition. 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.



I.11.4. Les scellements et les calages :

L'évolution des techniques de construction, le positionnement précis de pièces préfabriquées, le scellement d'éléments rapportés sur béton, entraînent une utilisation croissante de produits de scellements et de calage.



Parmi les multiples utilisations, on peut citer :

- Calage d'équipements industriels, machines lourdes à fort couple ou à fortes vibrations.
- Scellement des poutres, poteaux, acrotères, ...,
- Scellement de portes, fenêtres et éléments de second œuvre.
- Scellement de mobilier urbain, d'éléments de signalisation.
- Travaux de scellement en milieu marin.
- Assemblage d'éléments.
- Scellement de regards de visite sur routes à fort trafic avec remise en circulation quasi-immédiate.

I.12. Valorisation des déchets en génie civil :

I.12.1. Introduction :

Le problème de la pollution de l'environnement, lié à la production des déchets par l'homme, est ancien. Il devient de plus en plus un problème mondial. La production mondiale des déchets représente 4 milliards de tonnes par année [26]. Cette impressionnante quantité engendre plusieurs défis pour les villes : environnementaux, financiers, économiques, sociaux et écologiques, particulièrement pour les pays en voie de développement en Afrique. Plusieurs facteurs ont conduit à la présence des déchets dans les villes d'Afrique dont les plus importants sont : le boom démographique, l'extrême pauvreté de la population, l'insuffisance des ressources humaines, financières et matérielles des collectivités locales [27]. Selon les recensements du Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (MATE) sur l'état de l'environnement en Algérie, la production de déchets par habitant dans le milieu urbain a augmenté de 0,76 kg/ jour en 1980 à 2,2 kg/ jour en 2012 [28].

Selon les statistiques de l'agence nationale de soutien des jeunes à l'emploi (L'ANSEJ) de Constantine, plus de 60 micros entreprises de collecte des déchets et 18 autres concernées par le nettoyage des espaces verts, ont été créées [29]. Globalement, les entreprises privées sont très actives dans la récupération et le recyclage des déchets. En 2011 nous en avons recensé 1400 [30].

I.12.2. Définition des déchets :

Un déchet est un objet en fin de vie ou une substance ayant subi une altération physique ou chimique, qui ne présente alors plus d'utilité ou est destiné à l'élimination. Il a considéré comme déchet, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon [31].



Figure 1.8. Déchets [31].

I.12.3. Origine de la production des déchets :

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes [32] :

- Biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites.
- Chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième.
- Technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet.
- Économiques : les produits en une durée de vie limitée.
- Écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique.
- Accidentelles : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

I.12.4. Classification des déchets :

La classification des types des déchets d'après leur nature aboutit à trois catégories essentielles susceptibles de nuire à la santé et/ou à l'environnement [33].

I.12.4.1. Selon leur nature :

- Déchets solides.
- Déchets liquides.
- Déchets gazeux.

I.12.4.2. Selon le mode de traitement et d'élimination :

a) Déchets inertes :

Généralement constitués d'éléments minéraux stables ou inertes au sens de leur incompatibilité avec l'environnement et qui proviennent de certaines activités d'extraction minières ou de déblais de démolition.

b) Déchets banals :

Cette catégorie regroupe essentiellement des déchets constitués de papiers, plastique, cartons, bois produit par des activités industrielles ou commerciales et déchets ménagers.

c) Déchets spéciaux :

Ils peuvent contenir des éléments polluants et sont spécifiquement issus de l'activité industrielle.

d) Déchets dangereux :

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc...

I.12.4.3. Selon les propriétés du déchet [34] :

a) Déchets dangereux :

Il s'agit des déchets qui présentent plusieurs propriétés de danger définies au niveau européen : inflammables, toxiques, dangereux pour l'environnement.

b) Déchets non dangereux :

Il s'agit de déchets qui ne présentent aucune des propriétés de danger définies au niveau européen. Les règles de gestion sont plus souples que pour les déchets dangereux. Il s'agit par exemple de biodéchets, de déchets de verre ou de plastique, de bois...etc.

I.12.5. Valorisation des déchets :

La valorisation est partielle, spécifique ou local, c'est également le réemploi, le recyclage ou toute autre action a pour but d'obtenir à partir de sous-produit de déchets, des matériaux réutilisables, de l'énergie ou bien de constituer un ingrédient d'un autre processus de production en vue de la fabrication d'autres produits finis. Tous les types de valorisation des déchets permettent de ménager les ressources, en effet on distingue trois modes de valorisation [35].

On distingue nombreux types de valorisation des déchets [36] :

Chapitre I : Étude bibliographique

- Valorisation énergétique.
- Valorisation en matière première organique et minérale.
- Valorisation en science des matériaux.
- Valorisation en agriculture.
- Valorisation en technique de l'environnement.

I.12.6. Intérêt de la valorisation :

Le besoin universel de protéger l'environnement et de bien gérer les ressources, nécessitent d'établir des nouveaux lois et d'adapter des nouveaux concepts [37]. La valorisation et le recyclage des déchets est un moyen efficace face aux contraintes d'ordres économiques et écologiques de ces dernières années [38.39]. Les déchets constituent un réel problème, inévitable à toute vie biologique et à toute activité industrielle [40]. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement [41].

POURQUOI VALORISER ? Pour porter de plus en plus à la valorisation des déchets et des sous-produits industriels est lié à la fois à la crise de l'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matières premières et enfin la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement [36].

I.12.7. Utilisation des déchets et sous-produits dans le domaine du génie civil :

En décharge des sous-produits industriels et des déchets des matériaux à une incidence directe sur l'environnement [42], il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités pour éliminer ces déchets et ces sous-produits industriels au moyen de les valoriser et de les réutiliser notamment dans le domaine de génie civil. Devant les besoins universels de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton [43]. Par conséquent, on accordera beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du mortier.

En génie civil, le développement de l'emploi de certains déchets s'est fait en parallèle avec le développement de l'industrie lourde dans le temps. En général, les besoins du génie civil peuvent être résumé en termes de quatre ordres séquentiels [44] :

- Matériaux, sur lesquels pèsent de faibles exigences et consommés en grande masse.

Chapitre I : Étude bibliographique

- Granulats, qui doivent répondre à des spécifications diverses suivant leur utilisation.
- Liants, qui doivent répondre à des spécifications précises et dont les propriétés doivent rester constantes dans le temps.
- Activant, qui seront utilisés en petites quantités, ce qui peut poser des problèmes de collecte, stockage, distribution et régularité.

I.13. Définition de marbre :

Les marbres sont produites par des phénomènes tectoniques qui ont subi des transformations dans la matière, avec des effets physiques et chimiques. Il s'agit d'une roche métamorphique dérivée du calcaire qui présente une grande variété de teintes et peut présenter des veines ou des marbrures (les veines et le coloris sont généralement causés par des inclusions d'oxydes métalliques) [45].



Figure I.9. Roche métamorphique [46].



Figure I.10. Le marbre.

I.13.1. Origine du marbre :

Le marbre est un type de roche métamorphique qui est composé de minéraux carbonatés recristallisés, généralement de la calcite ou de la dolomite. Les origines physiques du marbre remontent à une combinaison de chaleur, de pression et d'activité chimique qui transforme les sédiments ou roches ignées dans ce type de roche distinctif. Lorsque le calcaire ou la dolomite est soumis à des températures et des pressions élevées, il subit une transformation chimique et minéralogique. Les minéraux et les textures d'origine sont détruits et de nouveaux cristaux de calcite ou de dolomite poussent à leur place. Ce processus de recristallisation donne la texture granuleuse caractéristique et la structure cristalline du marbre. Aujourd'hui, le marbre est utilisé dans un large éventail

Chapitre I : Étude bibliographique

d'applications, de la sculpture et de l'architecture à la décoration intérieure et à la joaillerie [46].

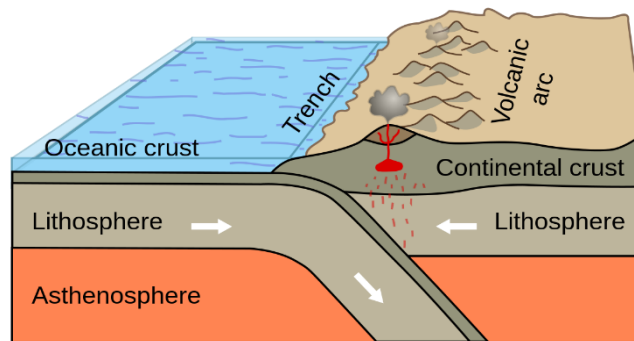


Figure I.11. Historique de marbre [45].

I.13.2. Types de marbre :

Voici quelques-uns des types de marbre les plus courants et leurs principales caractéristiques [47] :

I.13.2.1. Marbre de Carrare : C'est l'un des types de marbre les plus populaires et les plus connus, connu pour sa couleur blanche ou bleu-gris et son grain fin et uniforme. Le marbre de Carrare est extrait en Italie et est couramment utilisé pour la sculpture et les façades de bâtiments.



Figure I.12. Marbre de Carrare [47].

I.13.2.2. Marbre Calacatta : Le marbre Calacatta est un type de marbre haut de gamme qui est connu pour son veinage distinctif et sa couleur blanche brillante. Il est souvent utilisé pour des projets architecturaux haut de gamme et des intérieurs de luxe.



Figure I.13. Marbre de Calacatta [47].

I.13.2.3. Marbre Emperador : Ce type de marbre se caractérise par sa riche couleur brune chaude et son veinage distinctif. Il est souvent utilisé pour les revêtements de sol, les comptoirs et les contours de cheminée.



Figure I.14. Marbre de Emperador [47].

I.13.2.4. Marbre Crema Marfil : Ce type de marbre est connu pour sa couleur beige crémeuse et son grain relativement uniforme. C'est un choix populaire pour les revêtements de sol et les comptoirs.



Figure I.15. Marbre de Crema Marfil [47].

I.13.2.5. Marbre Statuario : Le marbre Statuario est apprécié pour sa couleur blanche brillante et ses veines audacieuses et dramatiques. Il est souvent utilisé pour les projets de sculpture et de design d'intérieur haut de gamme.



Figure I.16. Marbre de Statuario [47].

I.13.2.6. Marbre Nero Marquina : Il s'agit d'un type de marbre rare qui se caractérise par sa couleur noire profonde et son veinage blanc brillant. Il est souvent utilisé pour les accents et les éléments décoratifs dans la décoration intérieure.



Figure I.17. Marbre Nero Marquina [47].

I.13.3. Valorisation des déchets de marbre :

Kirgiz a développé des recherches expérimentales sur la production de clinker à partir de déchets ultrafins de marbre et de céramique, remplaçant respectivement le calcaire et l'argile. Les dosages des crudités ont été définis en fonction de paramètres chimiques tels que le module de l'alumine, le module de la silice, le module hydraulique, le module standard de la chaux et le module du facteur de saturation de la chaux. Les crudités ont été produites avec trois dosages de déchets : 77 % marbre + 23 % céramique, 79 % marbre +

21 % céramique et 81% marbre +19 % céramique. Le meilleur ciment a été produit avec 77 % de déchets de marbre, car il contenait 54% d'oxyde de calcium [48].

L'utilisation du déchet poudre de marbre et granite est très nécessaire, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger les ressources naturelles. Actuellement, la poudre de marbre est l'une des additions minérales les plus utilisées dans la production du béton dans le monde entier notamment en Turquie. Ce pays est très riche en marbre [49].

I.13.4. Propriétés physico-chimique du marbre :

I.13.4.1. Propriétés physiques du marbre : Il existe plusieurs propriétés physiques du marbre [49] :

- **Couleur :** Blanc, rose.
- **Dérivé :** Calcaire, dolomite.
- **Taille d'un grain :** grain moyen ; peut voir s'imbriquer calcite cristaux à l'œil nu.
- **Structure:** Massif.
- **Réservation de groupe :** Roches métamorphiques.
- **Texture:** Granoblastique, granuleux.
- **Formation :** Métamorphique régional ou de contact.
- **Réaction acide :** Étant composé de carbonate de calcium, le marbre réagira au contact de nombreux acides, neutralisant l'acide. C'est l'un des matériaux de neutralisation des acides les plus efficaces. Il est souvent broyé et utilisé pour la neutralisation des acides dans les cours d'eau, les lacs et les sols.
- **Dureté :** Étant composé de calcite, le marbre a une dureté de trois sur l'échelle de dureté de Mohs. En conséquence, il est facile à sculpter, ce qui le rend utile pour la production de sculptures et d'objets ornementaux. La translucidité du marbre le rend particulièrement attrayant pour de nombreux types de sculptures.
- **Capacité à accepter un polonais :** Après avoir été poncé avec des abrasifs de plus en plus fins, il peut être poli à un lustre élevé.
- **Majeurs minéraux de Marbre :** Calcite.
- **Minéraux accessoires du Marbre :** Diopside, trémolite, actinote, dolomite.

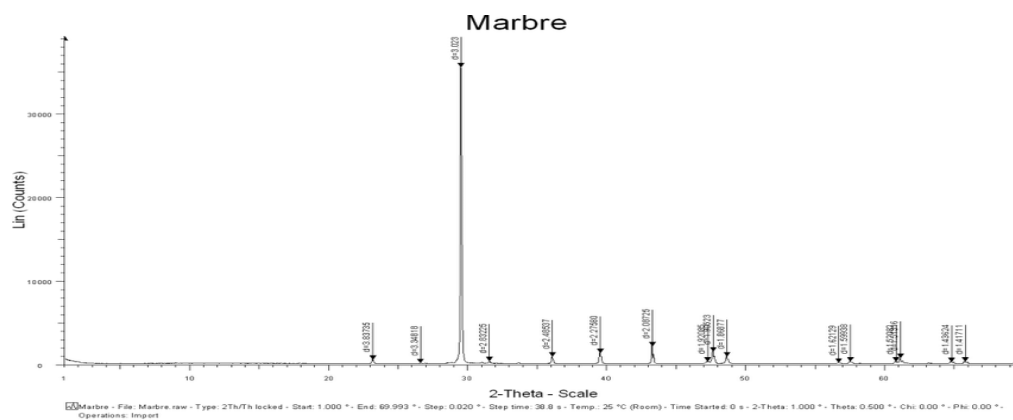
Chapitre I : Étude bibliographique

I.13.4.2. Caractéristiques chimiques :

La poudre du marbre utilisée est le déchet des marbreries dues au découpage des pièces en marbre blanc. Les caractéristiques chimiques de cette poudre sont données dans le tableau suivant [50] :

Tableau I.2. Composition chimique de la poudre de marbre [50].

Eléments	CaO	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	ZnO	SrO	ZrO ₂
%	39.43	1.24	0.382	0.174	2.55	0.18	0.005	0.096	0.021	0.002	0.005



I.16. Conclusion :

Cette section théorique nous permet de conclure que le mortier est un matériau hétérogène et que le choix de ses composants est basé sur les critères recherchés pour lui. Les résistances mécaniques et la fluidité sont les critères principaux, qui dépendent de la porosité, de la qualité et des composants. Le recyclage des déchets, qui est une actualité mondiale très importante, est également important. L'ajout d'une grande quantité d'ajout au ciment et aux mortiers est crucial au niveau économique. De plus, les déchets de marbre sont des matériaux qui peuvent affecter les performances mécaniques du ciment de base. Un traitement et une gestion efficaces des déchets réduisent les effets négatifs sur l'environnement et la santé tout en offrant de nouvelles ressources. D'après les travaux de recherches réalisés à travers le monde, le déchet de marbre a prouvé son efficacité dans les différents types de béton, par l'amélioration à la fois des propriétés physiques, mécaniques et durabilité.

**CHAPITRE II : CARACTERISATION DES
MATERIAUX EXPERIMENTALES ET
FORMULATION DES MORTIERS**

II. Introduction :

Le présent chapitre s'intéresse à l'identification et la préparation des matériaux d'étude et les différentes étapes de caractérisations (nature, composition,...). Nous avons caractérisé les propriétés physico-chimiques et nous avons défini également les différentes méthodes d'essais utilisés ainsi que leurs modes opératoires et les références de normes correspondantes. Enfin, nous avons défini les différents mélanges étudiés, on a fait tous les essais aux niveaux de Laboratoire de Hadjar Soud et de Laboratoire (Skikda), Global Concept (El-Bouni Annaba) et laboratoire de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Borj-Bou-Arredj. Dans cette recherche expérimentale nous avons étudié l'influence des déchets industrielles de marbre sur le comportement mécanique du mortier mixte (Ciment-Chaux) à l'état frais et à l'état durci.

II.1. Cimenterie de Hadjar-Soud :

La cimenterie de Hadjar-Soud est située sur l'axe de la route N°44 reliant ANNABA-CONSTANTINE et SKIKDA, soit à 50 Km d'ANNABA. La cimenterie fait partie de la commune de Bekkouche Lakhdar (Ben Azzouz- SKIKDA). Cette dernière est opérationnelle depuis 1973 intégré dans sa globalité le processus de production du ciment : Gisements de matières premières, Transport, production de clinker et ciment, Stockage, Expédition.

Il exploite 2 carrières, dénommées la carrière de calcaire de Djebel Safia et la carrière d'Argile d'Oued el Kebir. Celles-ci constituent les principales réserves en matières premières de la cimenterie de Hadjar-Soud (figure II.1) [53].



Figure II.1. Société de cimenterie de Hadjar-Soud (SCHS) [53].

II.1.1. Fonctionnement de Laboratoires de Hadjar Soud :

Le laboratoire de contrôle dans l'industrie du ciment possède un rôle important et indispensable (figure II.2). C'est des contrôles effectués à chaque étape du processus de fabrication que dépend la qualité recherchée du ciment. En effet, le prélèvement continu des échantillons permet aux chimistes de contrôler régulièrement le respect des valeurs limites dans les matières premières et les combustibles.

Les essais sont donc réalisés tant sur les produits semi-finis ou finis (analyse chimique et minéralogique), que sur les mortiers pour en vérifier les caractéristiques (prise, résistance mécanique). Jusqu'à présent, les analyses étaient réalisées uniquement en différé en laboratoire. La prise d'échantillon est effectuée périodiquement en plusieurs points du processus et qui sont :

- Le gisement des matières premières afin de définir la composition exacte du cru avec les besoins d'ajouts, de corrections exigées par la fabrication.
- Le cru (farine) pour confirmer l'homogénéisation avant la cuisson.
- L'analyse des combustibles renouvelables et non renouvelables pour en tenir compte dans le calcul des proportions de matières premières (eau, silice et alumine).
- L'analyse du clinker : permettant de déterminer les composants minéraux ainsi que le taux de gypse à ajouter lors du broyage. Il n'y a pas de mode opératoire universel pour évaluer la qualité du clinker. Il existe cependant de nombreuses techniques mises au point par les cimentiers du début du siècle. Ces méthodes sont maintenant perfectionnées avec la mise au point d'analyseurs modernes et l'utilisation de l'outil informatique. La collaboration du laboratoire et des services de production doit être totale car la qualité du clinker dépend de la chimie et de la cuisson de la farine.
- Les essais pour contrôler la qualité du ciment : effectué sur des éprouvettes en mortier fabriqué avec le ciment. La résistance à la compression et à la traction est mesurée à 28 jours [54].



Figure II.2. Laboratoire de Hadjar Soud.

II.2. Laboratoire Global Concept :

GLOBAL Concept est un organisme technique pluridisciplinaire d'étude, d'expertise, de suivi et de contrôle de qualité, Créé en 2005 (Zone B El-Bouni Centre - Annaba). Il est structuré de façon à satisfaire toutes les demandes des maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrages et entreprises en matières d'études géotechniques des sols à bâtir, des sols et ouvrages à stabiliser, d'études et analyses des matériaux de construction et bétons, l'établissement des formules des bétons hydrauliques et bitumineux ainsi que le suivi et le contrôle des études de contraintes géotechniques d'urbanisation, les études d'environnements et d'hydrauliques sont intégrés dans nos interventions.

La société réunissant 06 pôles majeures :

- Ingénierie de la Géotechnique (*stabilité, fondation, sol,*).
- Ingénierie des travaux publics (*Route, OA,*).
- Technicité en laboratoire (*Sol, Béton, Enrobés, Matériaux de construction*).
- Technicité en suivi (*VRD, O.A, Aménagement, Urbain ...*).
- Maîtrise d'œuvre & Économie du Bâtiments.
- Architecture, Ingénierie de l'environnement (*Impact, Danger, Audit et Environnement*) et de l'hydraulique.



Figure II.3. Laboratoire Global Concept.

II.3. Laboratoire de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Borj-Bou Arreridj :

L'université de Bordj-Bou-Arreridj fut construit à partir du 15 juillet 2000 et était dirigé par le professeur CHELALI Nacer. Il était Annexé à 'Université Ferhat Abbas de Sétif dirigé durant cette période par le Professeur BENACHOUR Djaffer.

En vertu du Décret exécutif no 12-244 du 4 juin 2012 l'Université de Bordj Bou Arreridj fut créé et est constituée désormais de sept Facultés MI, SNVSTU, LL, SSH, DSP, SECSG, ST et vingt Départements (Arrêtés 333-339 du 11 Oct. 2012).

L'institut des sciences et de la technologie comprend plusieurs filières, dont la filière Génie Civil, dans laquelle nous avons mené quelques expériences de recherche en fin d'études. Elle est elle-même divisée en 6 laboratoires, qui sont :

- Laboratoire des matériaux de construction.
- Laboratoire de béton.
- Laboratoire de mécanique des sols.
- Laboratoire de topographie.
- Laboratoire de résistance des matériaux.
- Laboratoire de mécanique des fluides.

Les essais sur les matériaux (laboratoire MDC) :

- ✓ La masse volumique apparente et absolue.
- ✓ La surface spécifique.
- ✓ La consistance (temps de prise).
- ✓ Équivalent de sable.
- ✓ Analyse granulométrie.

- ✓ L'absorption.
- ✓ La dureté (los Angelos, micro Deval).
- ✓ Malaxeur (automatique et manuel).
- ✓ Table à choc et table de maniabilité.
- ✓ Presse d'écrasement (compression/ traction par flexion).
- ✓ Les moules (acier, plastique, retrait).
- ✓ Air mètre (1L).

Sous la supervision du chef de laboratoire monsieur DJENDI Zoubir.



Figure II.4. Laboratoire de l'université de Bordj-Bou-Argeridj.

II.4. Matériaux utilisés :

Pour la réalisation de ce travail nous avons utilisé les matériaux suivants :

- Un ciment CEM II/A de classe 42.5 (CPJ).
- Un Sable normalisé.
- Une poudre de déchets de marbre de la carrière de marbre de Sidi Brahim –Annaba.
- Un Eau du robinet pour gâchage (E).
- Un Chaux aérienne éteinte.

II.4.1. Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé de type CEM II/A 42.5 (CPJ) conformes à la norme Algérienne (NA 442 2005), produit par la cimenterie de Hdjar-Soud (figure II.5). Ses caractéristiques techniques sont représentées ci-après :



Figure II.5. Ciment CPJ-CEM II de Classe A 42,5N

Les différentes caractéristiques chimiques et minéralogiques et les caractéristiques mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau du laboratoire de la cimenterie de Hdjar-Soud sont données dans les tableaux II.1 - II.2 et II.3.

Tableau II.1. Compositions chimiques du ciment (Voir annexe).

Éléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CL-
Masse (%)	55-65	22-28	5-6	3-3.6	1-2	0.3-0.6	0.1-0.16	1.8-2.5	0-.01

Tableau II.2. Composition minéralogique du ciment.

Minéraux	Désignation	Teneur calculée (% massique)
Silicate tricalcique	C ₃ S	52-58
Silicate bicalcique	C ₂ S	10-25
Aluminate tricalcique	C ₃ A	8-12
Ferro-aluminate-tétra calcique	C ₄ AF	9-13

Tableau II.3 : Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ 42.5.

Désignation	7jours	21jours	28jours
Résistance en traction par flexion en MPa	6.33	7.80	7.74
Résistance en compression en MPa	39.3	51	51.6

II.4.2. Sable normalisé :

Le sable utilisé est appelé le sable normalisé CEN (Comité Européen de Normalisation) doit être conforme aux exigences de la norme (EN 196-1). Le sable de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les interstices entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées.

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 [55]. Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun $1350 \pm 5g$ (figure II.6).



Figure II.6. Sable Normalisé.

II.4.3. Eau de gâchage :

L'eau potable sert de référence pour la formulation du mortier à cause de sa disponibilité (distribuée par les services publics) qui provient du robinet de laboratoire de la cimenterie de Hdjar Soud Skikda. Cette eau est propre et sans matières en suspension. L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des mortiers (résistance, propriétés esthétiques). L'eau de gâchage utilisée provient du robinet sa température est de $28^{\circ}C$. L'analyse chimique est représentée dans le Tableau II., les résultats montrent qu'elle répond à toutes les prescriptions des normes (NF P18-404). L'échantillon d'eau prélevé de réservoir du laboratoire est conforme pour le gâchage de mortier selon (NF EN 1008 du 07/2003).

Tableau II.4. Analyse chimique de l'eau de gâchage.

Paramètres	Résultat	Unité	Observation
T°	28	C°	Turbidité :1,44ntu Eau de bonne qualité chimique
PH	7.5	--	
Cl	0.1	Mg/l	
TDS	297	Mg/l	
Conductivité	541	Us/cm	
Salinité	0.2	--	

II.4.4. Chaux aérienne éteinte :

La chaux utilisée durant notre étude est celle de la région de Constantine, c'est une chaux aérienne éteinte qui provient de l'usine Cevital Minerals d'El Khroub – Constantine, elle répond à la norme (NF EN 459, 2012). Présentant une faible concentration en éléments oxydes comme les silicates SiO_2 , et aluminates Al_2O_3 et une forte concentration en éléments basiques comme la chaux libre CaO , ce qui donne à notre liant son aspect aérien. Pour caractériser notre chaux on doit se référer aux valeurs données par les tableaux II.5 et II.6, L'analyse aux rayons X de la chaux aérienne éteinte illustrées par les figures II.7 – II.8.

Tableau II.5. Composition Chimique de la chaux en (%).

Hydroxyde de calcium	Ca(OH) ₂ Totale	98,61
Hydroxyde de calcium	Ca(OH) ₂ Soluble	94,57
PH	-	12,4
Humidité	-	< 1
Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	0,0093
Oxyde d'Aluminium	Al ₂ O ₃	0,0182
Oxyde de Magnésium	MgO	< 0,2
Oxyde de Manganèse	Mn ₃ O ₄	0,0015
Oxyde de Silicium	SiO ₂	0,0477
Fer	Fe	0,0065
Aluminium	Al	0,0096
Silicium	Si	0,0223
Manganèse	Mn	0,0011
Dioxyde de carbone	CO ₂	< 1

Tableau II.6. Caractéristiques physique de la chaux.

Désignation	Unités	Valeurs
Finesse	%	88,39 ≤ 90
Densité Absolue	kg/m ³	2460
Densité apparente	kg/m ³	460
Aspect	-	Fine poudre blanche inodore



Figure II.7. Chaux aérienne éteinte.

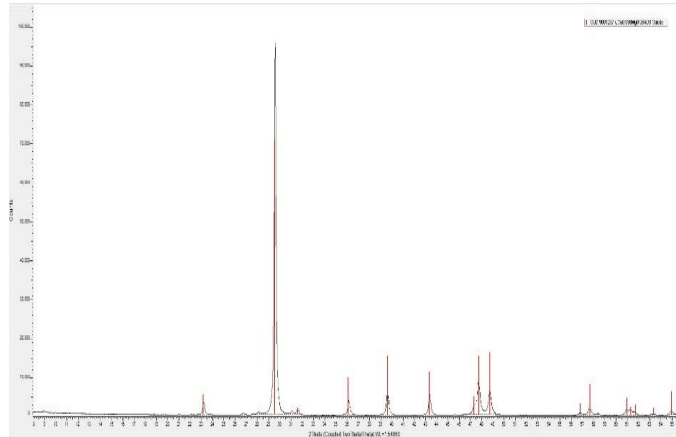


Figure II.8. Diffractogramme de rayons X de la chaux aérienne éteinte.

II.4.5. Poudre de marbre :

La poudre du marbre utilisée est le déchet des marbreries dues au découpage des pièces du marbre blanc. Les caractéristiques chimiques et les propriétés physiques de cette poudre sont données dans les tableaux II.7 et II.8. L'analyse aux rayons X de la poudre de marbre illustrées par les figures II.9 et II.10.

Tableau II.7. Composition chimique de la poudre de marbre.

Eléments	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Perte au feu
%	54.09	0.31	0.25	1.23	1.03	0.09	0.06	0.01	42.93

Tableau II.8. Propriétés physiques de la poudre de marbre.

Désignation	Unités	Valeurs
Surface spécifique	cm ² /g	4065
Densité Absolue	g/cm ³	2.73
Perte au feu	%	42.93
Couleur	-	Blanche



Figure II.9. Poudre de marbre.

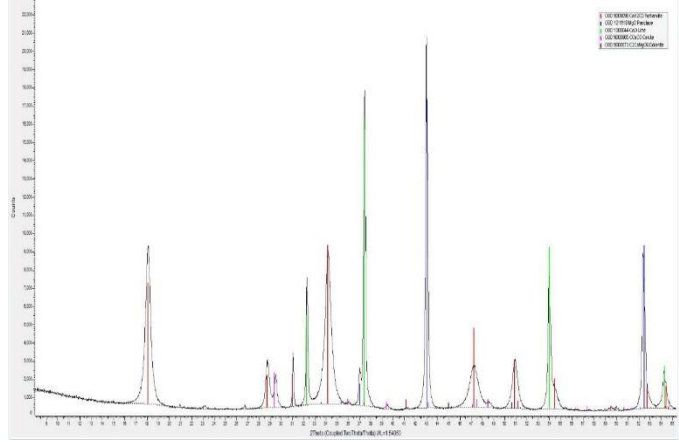


Figure II.10. Diffractogramme de rayons X de la poudre de marbre.

II.5. Caractérisation des matériaux :

II.5.1. Caractéristiques physiques :

II.5.1.1. La Masse volumique absolue (ρ_{abs}) :

Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de la poudre dans un liquide inerte, si la matière est hydraulique, sinon, dans de l'eau (figure II.11). La différence de volume rapporté à la masse de matériau nous donne la masse volumique absolue [56]. Cet essai est réalisé selon la norme (NF EN 1097-3).

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_{abs}} \quad (\text{g/cm}^3) \dots \dots \dots (1)$$



Figure II.11. Essai de la masse volumique absolue.

II.5.1.2. La Masse volumique apparente (ρ_{app}) :

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume y compris les vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon la norme (NF EN 1097-3). L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume connu de matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau [57] (figure II.12).

$$\rho_{app} = \frac{M}{V_{app}} \quad (\text{g/cm}^3) \dots \dots \dots (2)$$



Figure II.12. Essai de la masse volumique apparente.

II.5.1.3. Finesse de mouture (SSB) :

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique : C'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en 2 cm de surface des grains de ciment par gramme de poudre. Il existe deux méthodes, selon la norme (NA231), pour déterminer la finesse du ciment :

- La méthode par tamisage.
- La méthode de perméabilité à l'air (méthode de Blaine).

a) Tamisage

La finesse du ciment est mesurée par tamisage sur des tamis normalisé, Ainsi est déterminé le pourcentage du ciment dont les dimensions des grains sont supérieures aux dimensions de la maille spécifiée. L'emploi d'un échantillon de référence ayant une proportion connue de grains plus gros que la dimension de la maille spécifiée pour vérifier le tamis spécifié (NA231). On a effectué un tamisage sur un tamis de diamètre 0.08 mm, et il faut que le refus soit inférieur à 15 % [58].

b) Appareil de Blaine

On a utilisé l'appareil de Blaine (schématisée sur la figure II.13) conforme à la norme (NF P 15-442), du laboratoire de la cimenterie de Hadjar-Soud (Skikda) [55], schématisée sur la figure. La détermination de la SSB s'obtient soit par la méthode à porosité constante (équation 3), soit par la méthode de masse constante (équation 4) ;

$$m = \rho(1 - e) \dots \dots \dots (3)$$

$$e = 1 - m/\rho v \dots \dots \dots (4)$$

- ρ : masse volumique du ciment.
- V : volume de la cellule de l'appareil.
- e : porosité, $e = 0.5$.
- e : porosité, $e = 0.5$.

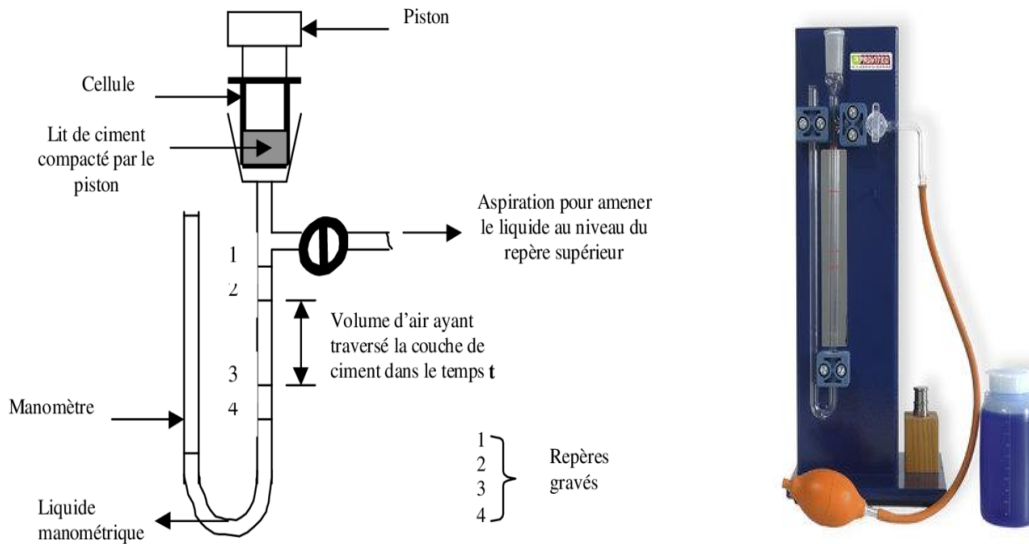


Figure II.13. Appareil de Blaine [55].

II.5.1.4. Détermination du temps de prise de « NA 231 » :

Le début et la fin de prise dépend de plusieurs paramètres, il varie notamment suivent la composition chimique et la finesse de mouture de ciment étudié, il dépend aussi de la température ambiante et le cas échéant, des dosages en adjuvant, utilisés à une même température et sans adjuvant, deux ciments différents pourront se distinguer, par une plus ou moins grande rapidité de prise, l'objective de c'est essai est définir pour un ciment donné un temps qui soit de cette rapidité de prise (EN 196 – 3) figure II.14.



Figure II.14. Appareil prisomètre automatique multiposte.

II.5.1.5. Détermination la consistance normale :

Le but de l'essai de consistance est précisément de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage. La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement, dans la pâte d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « consistance Vicat » figure II.15 (NF EN 196 – 3).

Pour avoir la consistance normale de chaque type de matériau élaboré on fait varier le rapport E/C.

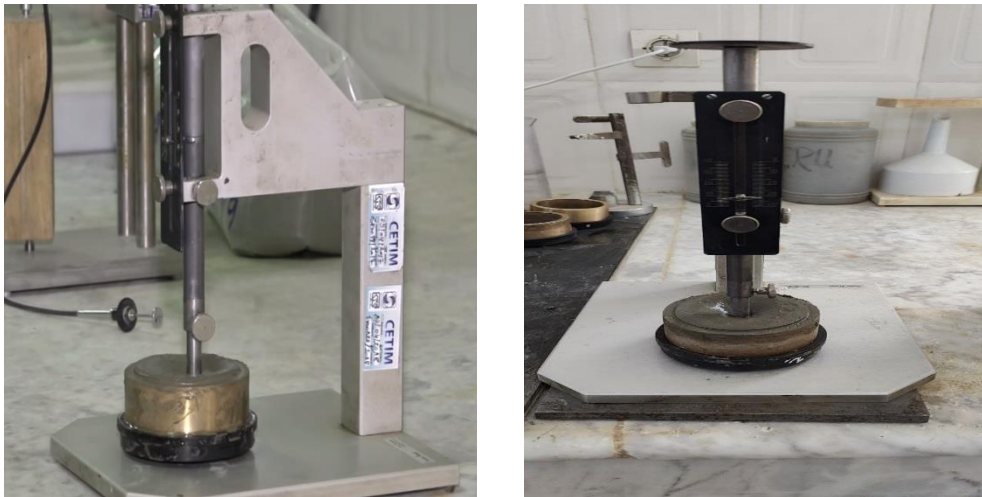


Figure II.15. Essai de la consistance normale.

Les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux sont mentionnées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II .9. Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux.

Caractéristiques	Unités	Chaux aérienne éteinte	Poudre de Marbre	Ciment
ρ_{app}	g/cm^3	5.47	1.11	1.12
ρ_{abs}	g/cm^3	2.72	2.75	3.06
Consistance normale	%	/	/	27
SSB (BLAINE)	g/cm^3	3562	4065	3232
Temps de prise	heures	/	/	> 1h30

II.6. Méthode de formulation des mortiers :

II.6.1. Formulation des mortiers témoin :

La méthode de composition du mortier classique utilisée est celle donnée par la norme (EN-196-1) [60]. La composition massique du mortier classique utilisée est donner par les quantités suivants :

- Ciment : une partie pondérale (01).
- Sable : trois parties pondérales (03).
- Eau : une demi partie pondérale (0,5).

Le mélange doit être effectué au moyen d'un malaxeur tel que spécifié dans la norme algérienne (NA 442/2000).

Le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- Verser l'eau dans le récipient ; Lui ajouter le liant.
- Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute ; Dans les 30 dernières secondes, introduire le sable. Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant 2 minutes.
- Arrêter le mouvement pendant 90s ; Avec le batteur démonté de son axe, racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage (figures II.16 et II.17).
- Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 mn à vitesse rapide.



Figure II.16. Malaxeur.



Figure II.17. Mélange.

II.6.2. Méthode de formulation des mortiers mixte chaux-ciment :

L'approche de formulation qui a été choisie dans ce travail est de proposer par la substitution entre la chaux et le ciment partant sur l'idée que ces proportions permettent d'avoir des mortiers à l'épreuve du temps (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% et 90%). Néanmoins, en ce qui concerne le dosage en eau, nous avons choisi de travailler avec une consistance fixe. Ce qui entraîne un dosage en eau variable pour chaque formulation. Pour cela, la consistance des mortiers d'étude a été réalisée sur la table à secousses pour un étalement de $150 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ce qui correspond à une consistance plastique. La figure II.18 présente un exemple de détermination du dosage en eau pour le mortier témoin.

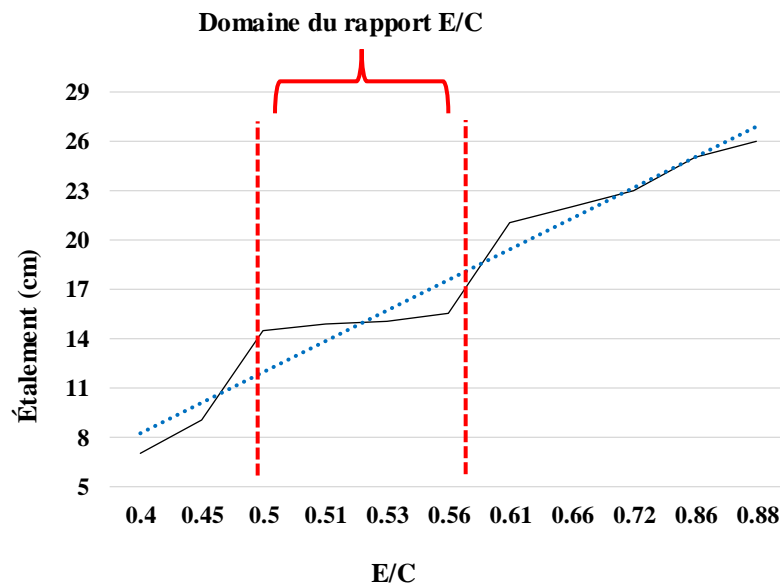


Figure II.18. Exemple de détermination du dosage en eau du mortier.

Chapitre II : Caractérisation des matériaux expérimentales et Formulation des mortiers

La composition des différents types de mortiers utilisés dans cette étude est donnée au tableau II.10 :

Tableau II .10. Composition des mortiers mixtes.

Mélanges	Sable normalisé (g)	E /C	Taux de substitution (%)	
			% de Ciment	% de Chaux
Témoin (MT)	1350	0,5	100	0
M1	1350	0,51	90	10
M2	1350	0,52	80	20
M3	1350	0,53	70	30
M4	1350	0,56	60	40
M5	1350	0,61	50	50
M6	1350	0,66	40	60
M7	1350	0,72	30	70
M8	1350	0,86	20	80
M9	1350	0,88	10	90
M10	1350	0,88	0	100

II.6.3. Méthode de formulation des mortiers adonnée de poudre marbre :

L'incorporation de la poudre de marbre c'est fait par substitution volumique de mortier témoin et du mortier de mixte (chaux-ciment) à des taux de 5, 10, 15 et 20 %. Le tableau II.11 résume les différentes compositions des mortiers.

Tableau II.11. Composition des mortiers témoin et mixtes incorporé de poudre de marbre.

Mélanges	Sable normalisé (g)	% de Marbre	E /L	Taux de substitution (%)	
				% de Ciment	% de Chaux
Témoin (MT)	1350	0	0,5	100	0
(MT)	1350	5	0,5	100	0
(MT)	1350	10	0,5	100	0
(MT)	1350	15	0,5	100	0
(MT)	1350	20	0,5	100	0
M1	1350	5	0,51	90	10
M2	1350	10	0,51	90	10
M3	1350	15	0,51	90	10
M4	1350	20	0,51	90	10

II.7. Confection des mortiers d'étude :

II.7.1. Malaxage et vibration :

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs, décrit dans la norme algérienne (NA 442/2010) conformément au mode opératoire suivant :

- Le malaxage du mélange – mortier - étant terminé, disposer celui - ci sur une plaque non réactive au liant et non absorbante ; former une galette approximativement rectangulaire, la partager en 6 fractions sensiblement égales. Le moule ayant été muni de sa hausse, le fixer sur la table à chocs (figure II.20); introduire dans chacun des 3 compartiments une fraction de la galette; Egaliser la surface du mortier au moyen de la raclette maintenue verticale, déplacée dans un double aller et retour en prenant appui sur le bord supérieur de la hausse.
- Mettre la machine en marche pour 60 chocs.
- Recommencer les mêmes opérations pour la deuxième couche. Après 60 nouveaux chocs, le moule et la hausse sur une faible hauteur sont remplis de mortier (figure II.19).
- Le moule étant retiré de la machine et débarrassé de sa hausse, araser le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate maintenue verticale par un mouvement de scie de faible amplitude et perpendiculaire à la longueur des éprouvettes.
- Inscire les marques d'identification des éprouvettes sur le moule.

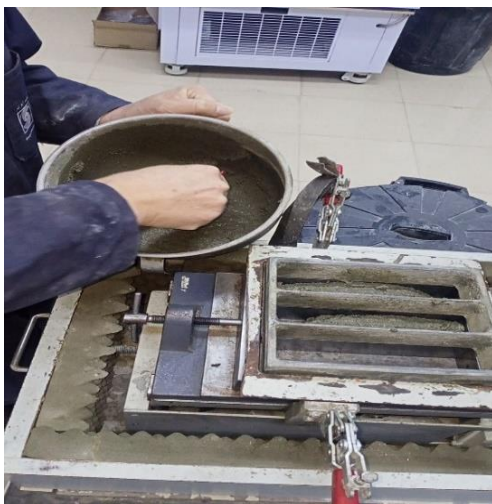


Figure II.19. Remblaiement du moule.

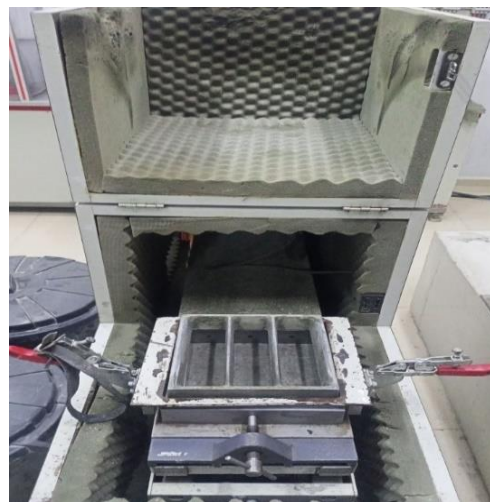


Figure II.20. Table à chocs.

II.7.2. Conservation des éprouvettes :

II.7.2.1 Conservation des éprouvettes avant démoulage :

Après le malaxage on procède à la préparation des moules prismatiques (4x4x16) cm le moule rempli de mortier marqué et recouvert d'un couvercle (qui doit laisser un vide de l'ordre de 2 mm au-dessus de la surface des éprouvettes) est placé jusqu'au moment du démoulage dans une enceinte humide à la température de $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dont l'humidité relative aussi voisine que possible de la saturation est d'au moins 90%. Les moules destinés aux essais suivants :

- Essais de traction par flexion trois points (trois éprouvettes 4x4x16 cm).
- Essai de compression (six demi-éprouvettes 4x4x16 cm).

Les opérations de mise en place des éprouvettes ont été réalisées conformément au mode opératoire décrit par la (NBN EN 1015-2, 2007). À la suite du coulage, les moules ont été conservés 72 heures à une température ambiante au laboratoire. Une fois le démoulage effectué, les éprouvettes sont référencées et conservées à l'air libre jusqu'aux échéances des différents essais qui sont de 7, 21 et 28 jours. La figure II.21 montre le mode de conservation des éprouvettes en mortiers.



Figure II.21. Conservation des éprouvettes.

II.8. Caractérisation des mortiers à l'état frais :

II.8.1. Masse volumique :

La masse volumique réelle ρ d'un mortier frais est déterminée par le quotient de sa masse par le volume réel qu'il occupe lorsqu'il est introduit et compacté, lorsqu'ils sont placés sur la table à chocs. La variation dans le poids du moule (plain et vide) de dimensions 4x4x16 cm conformément à la réglementation (NF EN 196-1) fabriqués en utilisant des moules de dimensions 4x4x16 cm. Les moules vides et remplies sont soumises à la pesée (figure II.22). La masse volumique réelle ρ est obtenue par déduction. Chaque valeur est la moyenne de 3 observations.

La densité du mortier frais est toujours mesurée. Cela aide à confirmer le processus. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique.

Cette dernière caractérisée par la masse d'une quantité de mortier frais rapporté à son volume après vibration, il est exprimé par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M_1 - M_2}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \dots \dots \dots (5)$$

M_1 : le poids du moule plain.

M_2 : le poids du moules vides.

V : le volume du moule.

ρ : Masse volumique.



a) poids du moule vide.



b) poids du moule plain.

Figure II.22. Mesure de la masse volumique réelle.

II.8.2. Essai d'étalement à la table à secousse :

Selon la norme (NBN EN 1015-3, 2007), cet essai d'étalement est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du mortier à s'étaler par écoulement. L'essai est exécuté sur une table à laquelle un moule tronconique ($D_0 = 100$ mm ; $d_0 = 70$ mm ; $h = 60$ mm) est rempli en deux couches compactées par au moins 10 coups brefs de dame. La surface libre du disque doit être propre et sèche. Au bout de 15 s, le moule est soulevé lentement et verticalement. 15 secousses à la table sont imprimées à une fréquence constante d'environ 1 secousse par seconde. Ensuite on mesure deux diamètres perpendiculaires d_1 et d_2 (Figure II.23).



Figure II.23. Etallement à la table à secousse.

La moyenne de ces deux diamètres nous renseigne sur la consistance du mortier testé grâce au tableau II.12.

Tableau II.12. Plages de consistances des mortiers (NBN EN 1015-3, 2007).

Consistance d'utilisation	Valeur d'étalement	Mode opératoire
Mortier raide	< 140 mm	La méthode de vibration
Mortier plastique	Entre 140 et 200 mm	La méthode des chocs
Mortier fluide	> 200 mm	La méthode de remplissage

II.9. Essais sur mortier durci :

II.9.1. Essai de traction par flexion trois points :

Les essais de traction par flexion trois points sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm selon la norme (NF EN 196-1, 2006). Ces essais ont été réalisés sur une machine de la marque Toni-Technik (Baustoffprüfsysteme) de type 1543 numéro de série N240. Il s'agit d'une machine d'essai électromécanique d'une capacité de 10 KN avec une précision égale à $\pm 1,0$ % de la charge enregistrée, dans les 4/5 supérieurs de l'échelle de mesure utilisée, à une vitesse de mise en charge de (50 ± 10) N/s. (Figure II.24).

Les mortiers d'étude ont été testés à l'âge de 7, 21 et 28 jours, les résistances de la flexion représentent la moyenne de trois éprouvettes.



Figure II.24. Dispositif d'essai de traction par flexion 3 points.

II.9.2. Essai de compression :

La résistance à la compression des mortiers est mesurée conformément à la norme (NF EN 196-1, 2006) sur les demi-prismes obtenus après rupture en flexion. Les essais ont été réalisés sur une la même machine que celle de la flexion avec la même vitesse de traverse (figure II.25). Les mortiers d'étude ont été testés à l'âge de 7, 21 et 28 jours, les résistances de la compression représentent la moyenne de six éprouvettes.



Figure II.25. Dispositif d'essai de compression.

II.10. Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la description des différents matériaux utilisés pour les formulations des mortiers mixte ciment – chaux avec de la poudre de marbre qu'on a réalisés par la substitution des composants (ciment – chaux – marbre). Le respect du plan du travail et des normes des différents essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers. La compréhension de ce sujet conduit à une division en deux volets distincts dans cette étude, dans un premier part les caractéristiques physiques des matériaux utilisés pour la formulation du mortier élaboré. D'autre part l'effet du déchet de marbre.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux. L'ensemble des résultats de cette étude sont présentés et analysés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'influence de la substitution de la chaux aérienne et de poudre de marbre sur les propriétés des mortiers mixte (Ciment – chaux aérienne). Les mortiers de chaux aérienne sont employés dans les travaux de réhabilitation de l'ancien bâtiments, leurs lenteurs de prise est leur principale inconvénient. La chaux aérienne ainsi que la poudre de marbre sont des produits qu'on a substituées en différent taux, la variation du taux de chaux par les proportions suivants : 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% et 90% par rapport au poids du ciment, la variation de poudre de marbre se fait avec des proportions inférieure à 20% au poids du mélange (90% ciment – 10% chaux) afin d'améliorer les propriétés à l'état frais et à l'état durci et examinerons également l'effet de la combinaison de déchets de marbre sur les différentes propriétés physiques et mécaniques du mélange. Des essais normalisés ont été effectués au laboratoire : masse volumique à l'état frais et à l'état durci, résistance à la compression et la traction par flexion 3 points à 7, 21, et 28 jours.

Les résultats obtenus ont été comparés avec les résultats d'un mélange de mortier mixte et témoin pour évaluer l'efficacité des déchets de marbre dans l'amélioration des performances de différents mortiers.

III.2. Caractérisation des mortiers à l'état frais :

III.2.1. Effet de la substitution de la chaux aérienne et la poudre de marbre sur les délais de prise :

L'estimation de l'apport de la poudre de marbre en fonction des proportions de substitution de la chaux aérienne sur le temps de prise ont été effectuée à l'aide de l'appareil de prisomètre automatique multiposte, ce qui nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans la figure III.1. Les résultats obtenus ont été comparés à leurs tours à ceux de la formulation de base.

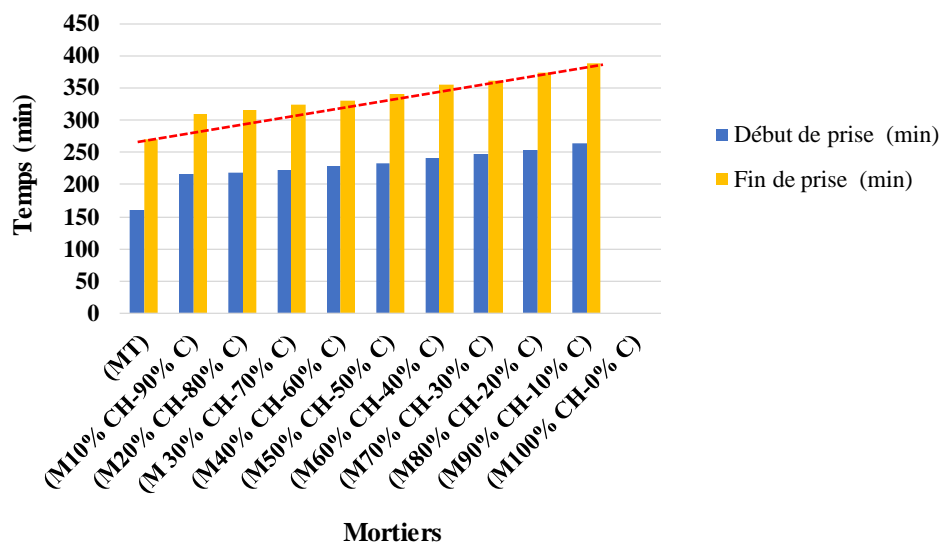


Figure III.1. Effet de la substitution de la chaux sur les délais de prise.

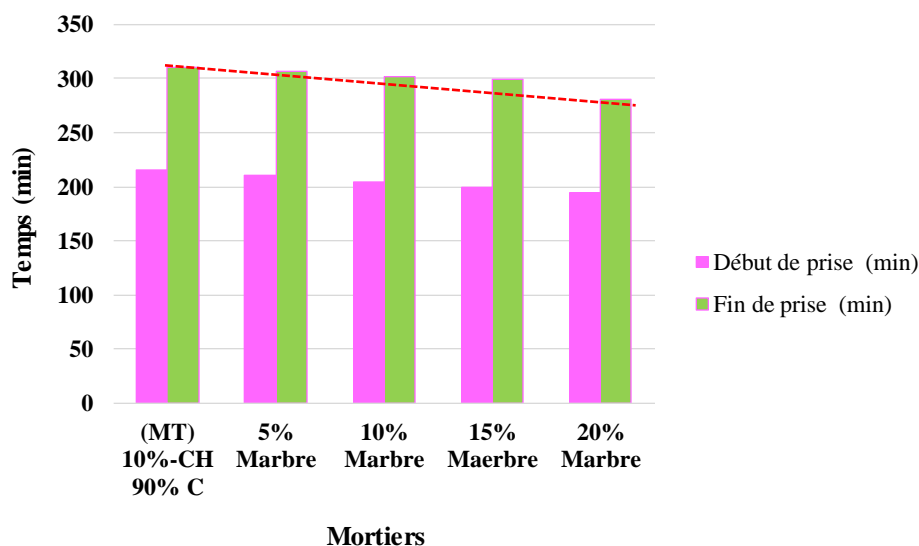


Figure III.2. Effet d'incorporation de poudre de marbre sur les délais de prise.

D'après les figures III.1 et III.2 on constate que la substitution de la chaux dans le mortier mixte (Ciment – Chaux) ne réduit pas le début de prise par rapport du mortier témoin (MT), on assiste à une augmentation des temps de début de prise avec l'augmentation du taux de substitution de la chaux. À titre d'exemple, une substitution de la chaux par 10 % et 90% de ciment du mortier mixte augmente le début de prise du mortier de 135 %, tandis qu'une substitution à 60 % et 40% de ciment du mortier mixte augmente le début de prise de 150

%. Jusqu'à un taux de substitution de 20 % en poudre de verre, la fin de prise décroît, au-delà de ce taux, on assiste à une augmentation de la fin de prise.

La substitution de la poudre de marbre dans le mortier mixte réduit significativement les délais de prise des mortiers, l'ensemble des substitutions présentent des débuts et des fins de prises inférieurs au mortier témoin. Un taux de 20 % de la poudre de marbre réduit respectivement le début et fin de prise de 90 % et 91 %.

III.2.3. Effet de la substitution de la chaux aérienne sur la compacité des mortiers :

L'estimation de la compacité des mortiers à l'état frais en fonction de la substitution de chaux aérienne ont été effectuée à l'aide de la masse volumique des mélanges à l'état frais, ce qui nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans la figure III.3. Les résultats obtenus ont été comparés à leur tours à ceux de la formulation de base mortier témoin (mortier normalisé).

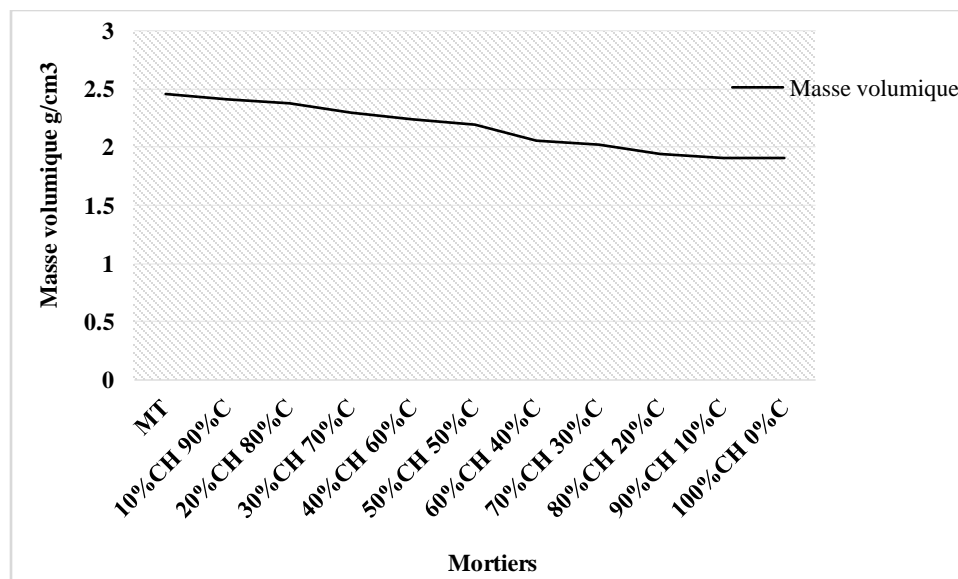


Figure III.3. Effet de la substitution de la chaux aérienne sur la masse volumique du mortier mixte.

La figure III.3 décrit l'évolution de la valeur moyenne de la masse volumique en fonction de la substitution de la chaux aérienne. ρ diminue proportionnellement à l'augmentation de pourcentage de la chaux aérienne. La densité des mortiers mixte varie entre 1.91 g/cm^3 et 2.41 g/cm^3 par comparaison à celle du mortier de ciment portland qui est égale à 2.5 g/cm^3

celle-ci est due à la densité intrinsèque de la chaux aérienne. Ainsi, les mortiers de chaux sont généralement classés comme des matériaux légers.

III.3. Caractérisation des mortiers à l'état durci :

III.3.1. Masse volumique à l'état durci :

La masse volumique du mortier à l'état durci est mesurée à partir de la masse de l'éprouvette rapportée à son volume final après 28 jours de durcissement (figure III.4) selon la norme (NF EN 12390-7). Les essais de la masse volumique ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques de dimension (40x40x160) mm. La masse volumique des mortiers d'étude a été mesurée à l'état durci après 24 heures de séchage et jusqu'à la masse constante, les résultats obtenus illustrés par la figure III.5 – III.6 et III.7.



Figure III.4. Mesure de volume de mortier à l'état durci.

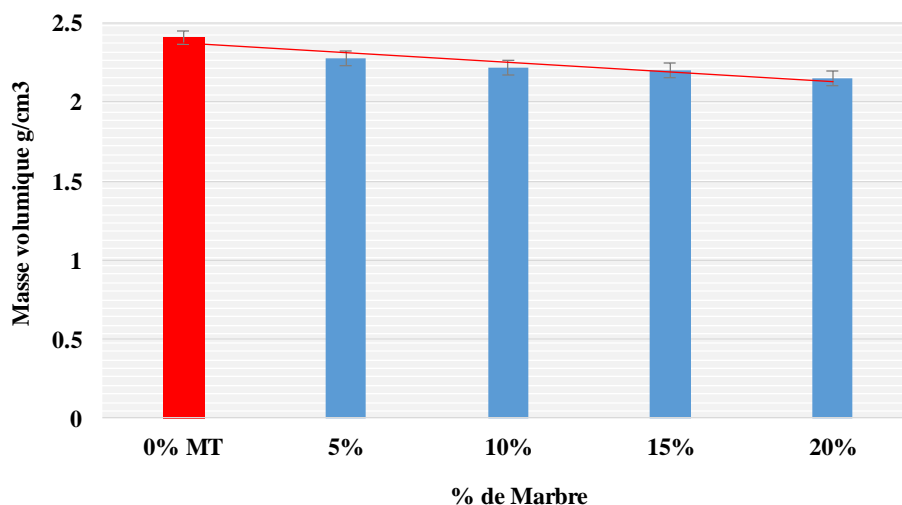


Figure III.5. Évolution de la masse volumique en fonction du pourcentage de poudre de marbre.

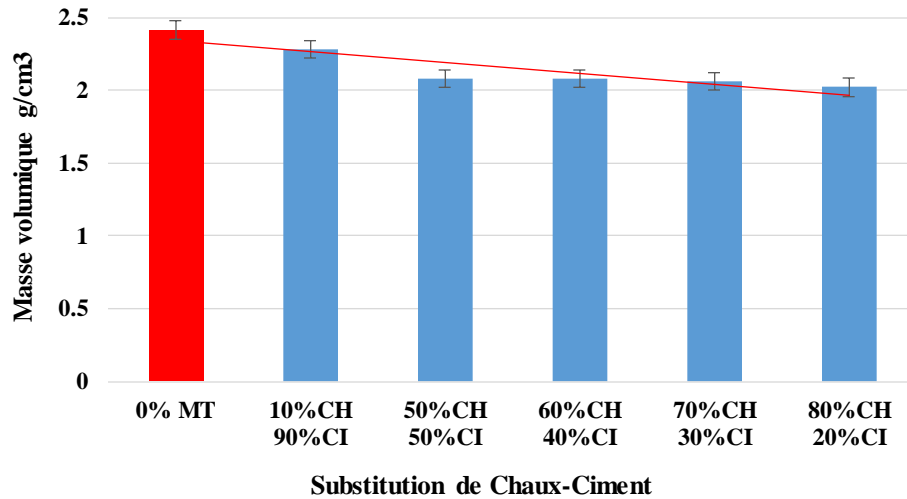


Figure III.6. Évolution de la masse volumique en fonction de la substitution par la chaux aérienne.

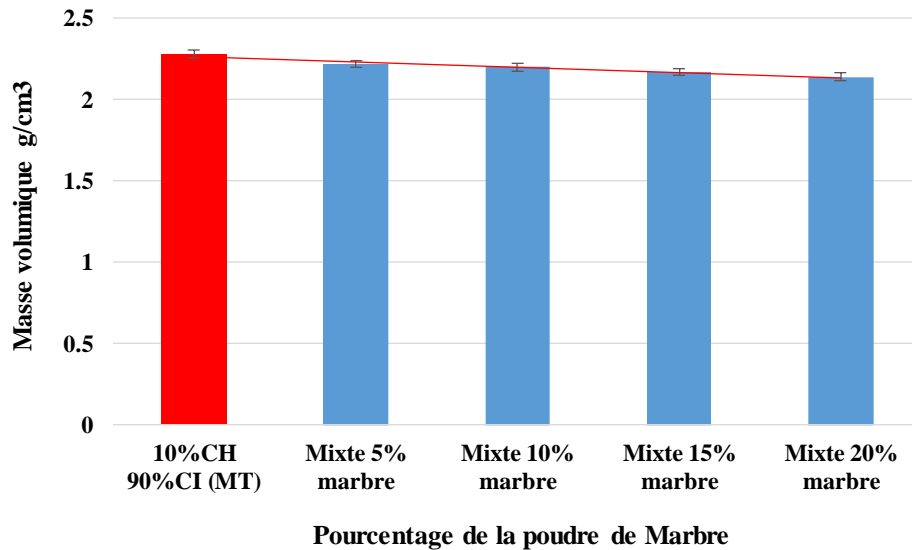


Figure III.7. Évolution de la masse volumique en fonction du pourcentage de poudre de marbre.

Les figure III.5 – III.6 et III.7 décrit l'évolution de la valeur moyenne de la masse volumique en fonction de la substitution par la chaux aérienne et d'incorporation de taux de poudre de marbre. ρ diminue proportionnellement à l'augmentation de pourcentage de poudre de marbre est inférieur à celle des mortiers témoin cela est due à la densité

intrinsèque de poudre de marbre figure III.5. Ceci s'explique par le fait que la masse volumique de poudre de marbre est plus faible que la masse volumique du ciment.

D'après la figure III.7 on remarque qu'il y a une légère diminution de la masse volumique avec l'augmentation du pourcentage du déchet de marbre incorporé est due aux éléments grossiers dans poudre de marbre par rapport au ciment.

III.3.2. Résistance en traction par flexion 3 points :

III.3.2.1. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la flexion des mortiers :

Les essais mécaniques de traction par flexion ont été réalisés sur des éprouvettes de mortier témoin et des éprouvettes de mortier incorporé de l'ajout de poudre de marbre.

Les résultats obtenus de la résistance à la traction par flexion des différentes échéances (7, 21 et 28) jours du mortier témoin et pour les différents taux de poudre de marbre expérimentés sont illustrés par la figure III.8. Ces résultats sont représentés par la moyenne de six éprouvettes, sont associés par l'écart type.

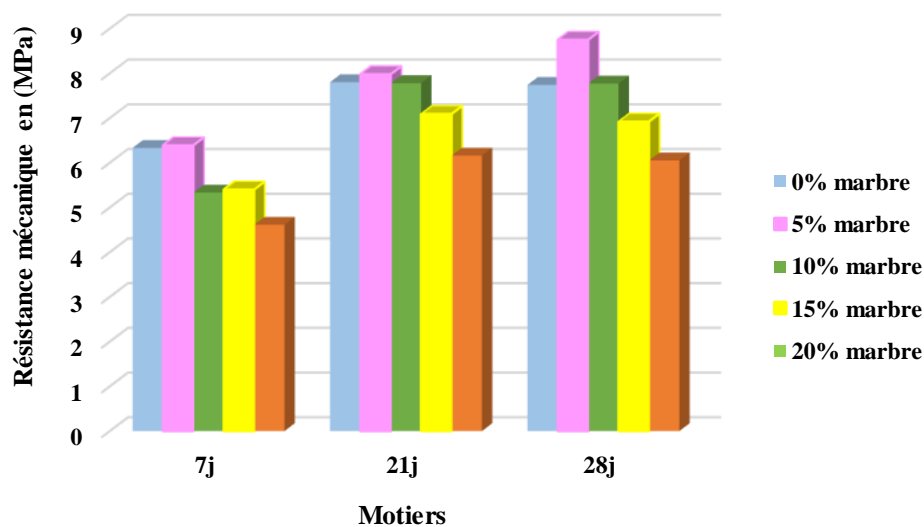


Figure III.8. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la flexion des mortiers.

Les résultats de l'essai de flexion obtenus pour les différentes éprouvettes des mortiers des différentes échéances (7, 21 et 28) jours (figure III.8), montrent que l'incorporation de poudre de marbre avec différents taux dans le mortier témoin jusqu'à 20%, a entraîné une

augmentation de résistance de flexion dans le taux de 5% par rapport à celle de mortier de référence (témoin).

A l'âge de 7 jours, on observe une augmentation, mais dans le cas que la poudre de marbre a dépassé le taux de 5% à différents âges la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de ce taux, on peut dire que le déchet de marbre a amélioré la résistance à la flexion surtout avec l'utilisation du taux de 5% grâce à sa finesse et la bonne cohésion le liant (ciment). Au-delà de 5% la résistance diminue à cause de l'absorption d'eau par le marbre pendant le malaxage.

III.3.2.2. Effet de la substitution de la chaux aérienne sur les résistances à la flexion de mortier mixte (Ciment – Chaux) :

Les essais mécaniques de traction par flexion ont été réalisés sur des éprouvettes de mortier mixte (Ciment – Chaux). Les résultats obtenus de la résistance à la traction par flexion des différentes échéances (7, 21 et 28) jours du mortier mixte pour les différents taux de chaux aérienne expérimentés sont illustrés par la figure III.9. Ces résultats sont représentés par la moyenne de six éprouvettes, sont associés par l'écart type.

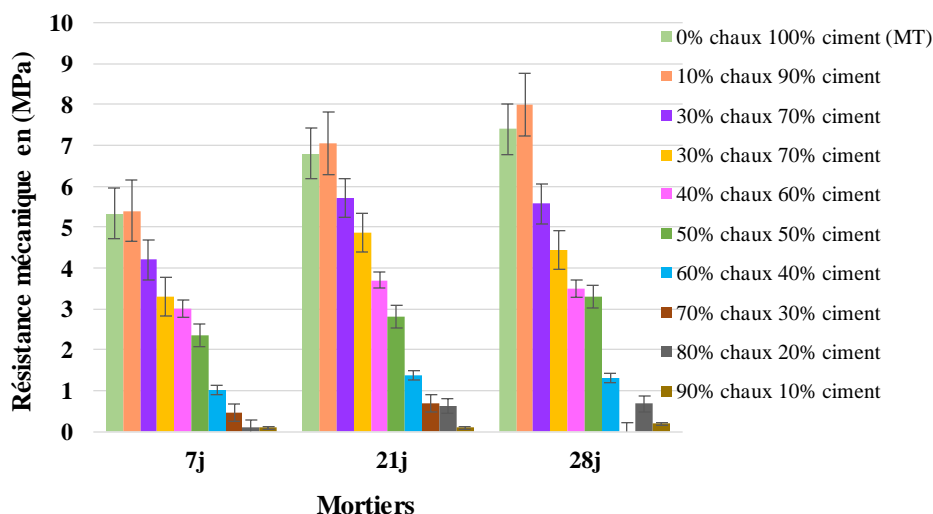


Figure III.9. Effet de la substitution de la chaux aérienne sur les résistances à la flexion des mortiers.

La figure III.9 décrit l'évolution de la valeur moyenne de la résistance à la flexion en fonction de la substitution de la chaux aérienne. La résistance diminue proportionnellement au l'augmentation de la substitution de la chaux aérienne.

Pour la résistance à la flexion les plus élevées ont été obtenues par le mélange de 10% de chaux et 90% de ciment. La résistance à la flexion a chuté avec l'augmentation du taux de substitution de 20% à 90%. On peut dire que la substitution n'a pas amélioré la résistance à la flexion de nos mélanges. Un optimum autour de 10% de substitution ont trouvé que la résistance à la traction par flexion permet d'avoir le maximum de résistance. avec différentes échéances (7 – 21 et 28). De ce fait ont conclu que la demande en eau dans le mortier augment avec l'augmentation de pourcentage de la chaux.

III.3.2.3. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la flexion des mortiers mixte (Ciment – Chaux) :

Les essais de traction par flexion trois points ont été effectués après, 7jours, 21jours et 28jours de maturation sur les éprouvettes du mortier mixte (Ciment – Chaux) avec l'incorporation de l'ajout de poudre de marbre.

Les résultats obtenus de la résistance à la traction par flexion des différentes échéances (7, 21 et 28) jours du mortier mixte pour les différents taux de poudre de marbre expérimentés sont illustrés par la figure III.10. Ces résultats sont représentés par la moyenne de six éprouvettes, sont associés par l'écart type.

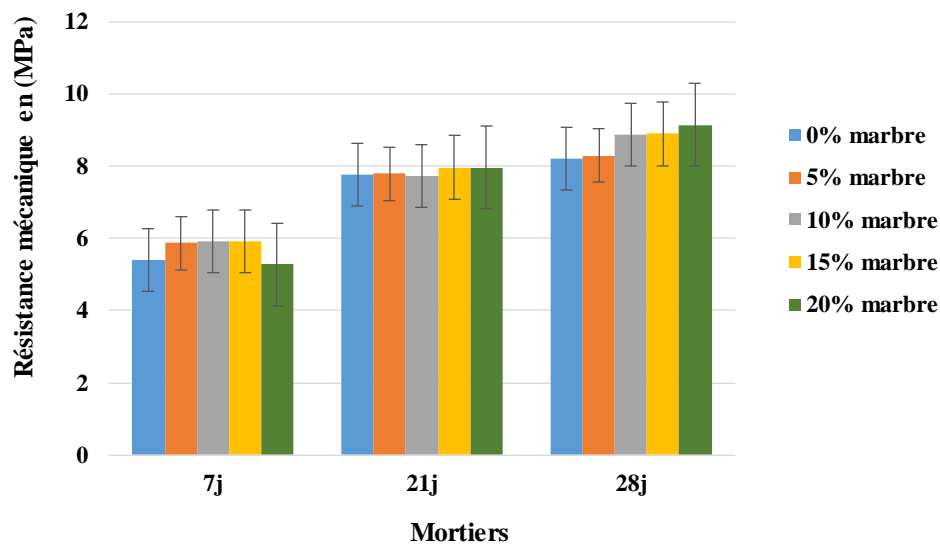


Figure III.10. Effet de de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la flexion des mortiers mixte.

Pour étudier l'effet de l'incorporation de poudre de marbre sur la résistance à la traction par flexion du mortier de mixte (Ciment – Chaux) figure III.10, différents taux (5% - 10% 15% et 20%) de la poudre de marbre ont été étudiées en utilisant le mélange (10% ciment et 90% chaux). On observe une augmentation de la résistance à la traction par flexion trois points en fonction de l'augmentation de du taux de la poudre de marbre ceci s'explique par l'effet fillers ou effet de remplissage des additions minérales qui améliore la maniabilité des mortiers. Cela est dû à l'utilisation du marbre comme poudre fine et peut s'expliquer par le broyage poussé malgré la faible réactivité de la poudre de marbre par rapport au ciment. Si on parle sur le plan physico-mécanique, la poudre de marbre réagit par sa finesse, engendrant ainsi un squelette plus cohérent, une peau de mortier relativement plus imperméable et par conséquent un mortier plus résistant. Il paraît intéressant, d'insister sur le fait que l'influence de la finesse de la poudre de marbre est d'autant plus significative que l'on cherche à fabriquer des mortiers plus performants. L'emploi de la poudre de marbre en ajout au mortier permet d'améliorer les résistances en traction par flexion.

III.3.3. Résistance en compression :

III.3.3.1. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la compression des mortiers :

Chapitre III : Résultats et discussion.

Après les essais de flexion, des essais de compressions sont réalisés sur les demi-prismes du mortier témoin et des mortiers additionnées de poudre de marbre. La figure III.11 représente les résultats de la compression des différentes échéances (7, 21 et 28) jours du mortier témoin et pour les mortiers additionnées de poudre de marbre, chaque valeur est la moyenne de six valeurs de compression.

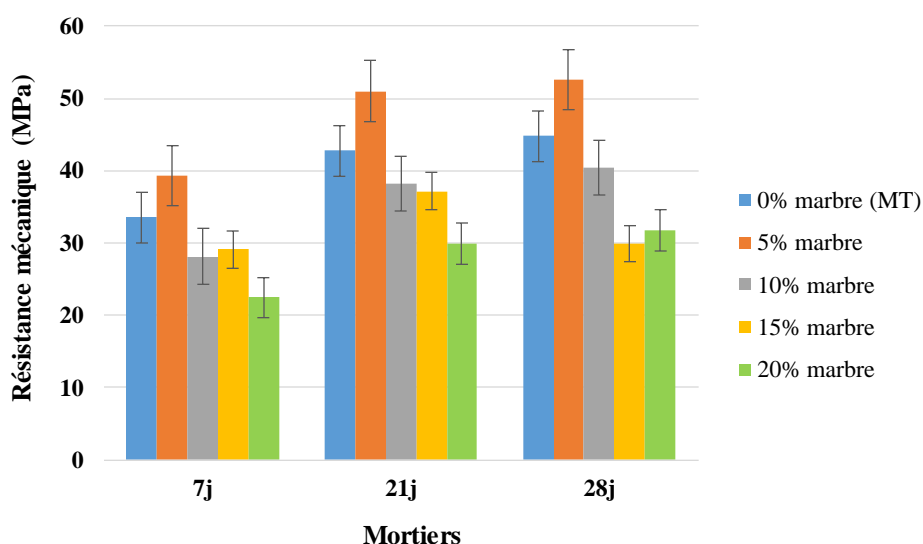


Figure III.11. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la compression des mortiers.

La figure III.11 présente la diminution de la résistance à la compression en fonction du taux de d'incorporation de la poudre de marbre, la résistance la plus élevée est obtenue par le mélange avec le taux de 5% de poudre de marbre ce mélange a donné une résistance à la compression supérieure à celle du mélange témoin 0% indiquant que la poudre de marbre contribue à la résistance en compression plus que ce que hydratation du ciment considéré seul pouvait apporter. Notons que la finesse favorise l'effet physique de la poudre de l'addition. L'amélioration de la compacité peut être expliquée par l'effet physique et chimique de la poudre de marbre qui augmente en fonction de sa finesse. Ce dernier ajuste la granulométrie des granulats, en augmentant ainsi la compacité de la pâte (Effet physique). Elle présente une réaction pouzzolanique avec le ciment [61].

III.3.3.2. Effet de la substitution de la chaux sur les résistances à la compression de mortier mixte (Ciment – Chaux) :

Les résultats obtenus de la résistance à la compression après les essais de traction par flexion des mortiers mixte (Ciment – Chaux) des différentes échéances (7,21 et 28) jours pour les différents taux de substitutions expérimentés sont illustrés par la figure III.12. Ces résultats sont représentés par la moyenne de six éprouvettes, sont associés par l'écart type.

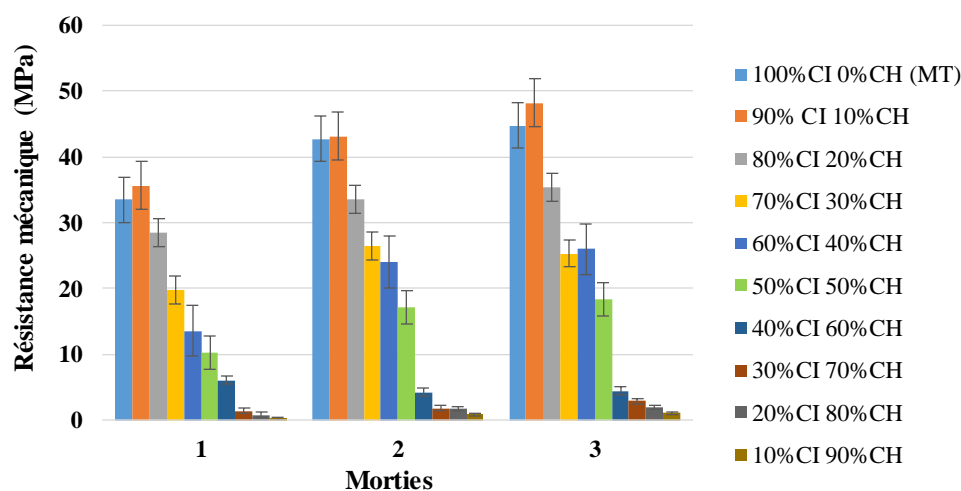


Figure III.12. Effet de la substitution de la chaux sur les résistances à la compression de mortier mixte.

La figure III.12 montre que la résistance à la compression du mortier mixte (Ciment – Chaux) s'accroît seulement pour le taux de 10%, avant de diminuer en augmentant le taux de substitution ciment-chaux, donc cette chute a été affectée par la présence de la chaux libre dans le clinker ou dans le ciment qui été le responsable sur les propriétés et les caractéristiques du ciment portland (elle provoque des gonflements et fissurations dans le mortier et diminue la résistance mécanique, influe sur le temps de prise.....) donc on peut dire dès que le pourcentage de la chaux augmente la résistance mécanique du mortier diminue.

Le mortier MII présente la meilleure résistance à la flexion et la compression (Il est composé du 10% de Chaux et de 90% de Ciment). La résistance à la compression diminue proportionnellement au l'augmentation de pourcentage la chaux aérienne.

III.3.3.3. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la compression de mortier mixte (Ciment-Chaux) :

Les résultats obtenus de la résistance à la compression ont été réalisés sur des éprouvettes du mortier mixte (Ciment – Chaux) avec de l'ajout de poudre de marbre des différentes échéances (7,21 et 28), sont illustrés par la figure III.13. Ces résultats sont représentés par la moyenne de six éprouvettes, sont associés par l'écart type.

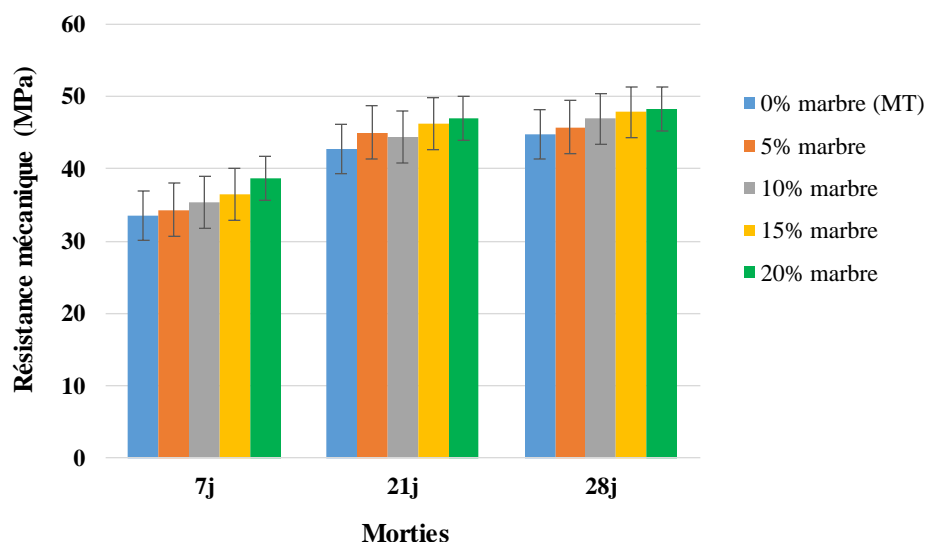


Figure III.13. Effet de l'ajout de poudre de marbre sur la résistance à la compression de mortier mixte.

Le même constat peut-être tiré de la figure III.10 et III.13. montrent une augmentation de la résistance à la compression des mortiers avec addition de la poudre de marbre par rapport au celui témoin. Ces résultats s'expliquent par l'hydratation du C_3S en présence du $CaCO_3$ de la poudre de marbre ce qui produit des hydrates de carbosilicate de calcium qui affectent de bonnes performances mécaniques. En ce qui concerne les pâtes avec ajout de poudre de marbre, les amas de CSH sont très denses ce qui induit une grande compacité [62].

Le facteur le plus responsable de cette amélioration de la résistance mécanique serait bien sûr la finesse de la poudre de marbre utilisée qui remplit un maximum de vides entre les grains et chimiquement parlant, le composé dominant dans le marbre CaO . La réaction de

CaO avec l'eau donne Ca(OH)_2 qui va réagir avec SiO_2 forme le silicate de calcium secondaire hydraté qui est chimiquement stable est structurellement dense [63].

L'incorporation du la poudre de marbre avec la substitution de la chaux aérienne, dans un mortier a amélioré la résistance à la compression et à la traction à cause de deux facteurs : Ces mortiers contiennent une certaine quantité de fines, ce qui favorise l'empilement granulaire lors du malaxage et provoque ainsi l'augmentation de la contrainte.

La poudre de marbre est caractérisé par ses particules argileux ce qui favorise le collage pate/sable.

L'amélioration des résistances des mortiers à base de la chaux aérienne et la poudre de marbre est essentiellement liée à la réaction pouzzolanique entre la silice amorphe contenue dans l'addition et l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 contenue dans la chaux aérienne, le résultat de cette combinaison est la formation de C-S-H qui favorise le développement des résistances. Cependant, les réactions pouzzolaniques dans les mortiers à base de (Ciment – Chaux) sont plus importantes que celle de la poudre de marbre.

III.4. Mode de rupture :

Les figures III.14 et III.15 montrent des exemples de modes de rupture observés sur des éprouvettes rompues en flexion et en compression pour les différents mortiers expérimentés.

D'après la norme (EN 12390-3) le mode de rupture des éprouvettes des différents mortiers expérimentés est incliné par un angle de 45° , ce mode est conditionné par les forces de frottement qui se développent entre les plateaux de la presse et les faces de l'éprouvette dans le cas de compression, ces forces de frottement sont dirigées vers l'intérieur de l'éprouvette et freinent l'évolution des déformations transversales du mortiers (Figure III.15).

La comparaison des modes de rupture des mortiers de référence (témoin) et celui des mortiers mixte (Ciment – Chaux) et les mortiers additionnées de poudre de marbre en traction par flexion trois points, illustrée par les photos de figure III.14 montre clairement que ce dernier possède un caractère fragile lors de la rupture. Le mode de rupture général des éprouvettes de mortier (témoin) est fragile. La rupture est brutale avec la séparation de l'éprouvette en deux parties. Les éprouvettes de mortier mixte (Ciment – Chaux) représente un mode de rupture très fragile par rapport au mortier témoin.



Figure III.14. Mode de rupture des éprouvettes en flexion de mortier mixte additionné de poudre de marbre.



Figure III.15. Mode de rupture des éprouvettes en compression de mixte et mortier témoin.

III.5. Conclusion :

Les résultats obtenus dans cette recherche peuvent mener aux conclusions suivantes :

- La substitution partielle de la chaux aérienne et de la poudre de marbre a une influence significative sur le comportement du mortier mixte à l'état frais et l'état durci.
- La contribution de la poudre de marbre a un rôle structurant par rapport aux liaisons de la matrice cimentaire du point de vue mécanique. Cette contribution structurante se traduit en termes de durabilité par une réduction des déchets industrielles.
- La substitution par la chaux aérienne ne réduit pas le début de prise par rapport du mortier témoin (MT), on assiste à une augmentation des temps de début de prise avec

l'augmentation du taux de substitution de la chaux vis-à-vis à l'incorporation de la poudre de marbre dans le mortier mixte réduit significativement les délais de prise des mortiers.

- La masse volumique (ρ) à l'état frais et à l'état durci des mortiers mixte diminue proportionnellement au l'augmentation de pourcentage de la chaux aérienne.
- L'incorporation de poudre de marbre a entraîné une augmentation de résistance de flexion et de compression dans le taux de 5% par rapport à celle de mortier de référence (témoin) au-delà de 5% la résistance diminue.
- Un optimum autour de 10% de substitution par la chaux aérienne ont trouvé que la résistance à la traction par flexion et à la compression permet d'avoir le maximum de résistance.
- On observe une augmentation de la résistance à la traction par flexion trois points et à la compression en fonction de l'augmentation de du taux de la poudre de marbre dans le mortier mixte. Donc nous avons montré la possibilité de la valorisation des déchets de marbre dans le mortier mixte (Ciment – chaux).

Notre objectif c'est l'encouragement de valoriser et d'éliminer de grandes quantités de déchets, tels que le marbre, dont la valorisation dans le domaine du génie civil pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante et une respectueuses de l'environnement.

**CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES**

Conclusion générale et Perspectives

Le mortier est l'un des matériaux les plus importants utilisés dans la construction, il a contribué dans les techniques et les matériaux de la réhabilitation du vieux bâti, ainsi les avantages des mortiers de chaux dans ce domaine sont plus à prouver. Notre objectif dans ce travail était d'étudier l'influence de la substitution de la chaux aérienne par le ciment et de l'incorporation des sous-produits industriels (déchet de marbre) à caractères pouzzolaniques, sur les différentes propriétés des mortiers mixte et témoin.

L'étude était basée sur la comparaison du comportement d'un mortier témoin avec celui d'un mortier mixte (Ciment – Chaux) avec des taux de substitution allant de 10% à 90%.

On a essayé par ce travail de voir l'influence de la poudre de marbre sur les caractéristiques des mortiers mixte. Ce matériau dont le caractère pouzzolanique, sont couramment utilisés dans les bétons non le mortier, il apporte beaucoup d'avantages surtout sur le plan résistance mécanique et durabilité.

Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Concernant le temps de prise, la substitution de la chaux dans le mortier mixte (Ciment – Chaux) ne réduit pas le début de prise par rapport du mortier témoin (MT), on assiste à une augmentation des temps de début de prise avec l'augmentation du taux de substitution de la chaux.
- La substitution de la poudre de marbre dans le mortier mixte réduit significativement les délais de prise des mortiers, l'ensemble des substitutions présentent des débuts et des fins de prises inférieurs au mortier témoin cette amélioration est significative surtout pour les mélanges.
- La masse volumique (ρ) a l'état frais et a l'état durci des mortiers mixte diminue proportionnellement au l'augmentation de pourcentage de la chaux aérienne.
- S'agissant des résistances mécaniques à la traction par flexion 3pts, et à la compression, la poudre de marbre augmente la résistance mécanique dans le taux de 5% par rapport à celle de mortier témoin, au-delà de 5% la résistance diminue.
- Un optimum autour de 10% de substitution par la chaux aérienne ont trouvé que la résistance à la traction par flexion et à la compression permet d'avoir le maximum de résistance.

Conclusion générale et Perspectives.

- On observe une augmentation de la résistance à la traction par flexion trois points et à la compression en fonction de l'augmentation de du taux de la poudre de marbre dans le mortier mixte.
- La poudre de marbre influe de façon significative sur le comportement du mortier à l'état frais et l'état durci.

Vu que ces résultats sont acceptables et comme notre étude consiste à donner une valeur à un déchet (valoriser), l'étude technico-économique effectuée présente un point de départ réel dans le monde de l'industrie et de l'investissement qui permet de récupérer cette richesse, créer des postes d'emplois et motiver la production nationale.

Cette modeste étude a proposé des projets réels qu'on peut réaliser pour valoriser les déchets de marbre.

Et enfin, pour bien présenter l'importance de la valorisation de façon générale et des déchets de sociétés de marbre de façon particulière, on a estimé la dispersion des poussières de ses déchets dans le champ de la société et dans un point donné de décharge et leur dangerosité sur la santé et globalement sur l'environnement.

Concernant la continuité de la recherche dans le sens de la valorisation du mortier mixte de déchet de marbre, on propose les recommandations suivantes :

- Consacrer une étude à la durabilité du mortier mixte (Ciment – Chaux) à base de déchet de marbre sous différents phénomènes et milieux agressifs.
- Des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) pour voir la matrice mixte avec la combinaison de la poudre de marbre.
- Caractériser les mortiers à long terme (jusqu'à 365 jours).
- Augmenter les taux de substitutions au-delà de 20% de poudre de marbre.

En fin, cette étude nous a permis d'ouvrir d'autres perspectives, pour améliorer encore plus les performances du mortier mixte à base de déchets de de marbre, afin de contribuer à résoudre un problème à la fois environnemental et économique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Références bibliographiques

- [1] ALI BOUACIDA. L. «*Effet de la qualité de ciment sur les propriétés mécaniques du béton*». Mémoire de magister, Centre Universitaire de Tébessa.
- [2] MICHEL.M, «*Valorisations des déchets et des sous-produits industriels* », Paris: Ed, Massion, 1981.
- [3] LATTEUR. J. P. «*Les ciments belges composition et classification suivant la norme NBN*». Guide abrégé d'application. Febelcem, 1996.
- [4] ČERNÝ, R., KUNCA, A., TYDLITÁT, V., DRCHALOVÁ, J., ROVNAŇÍKOVÁ, P. «*Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters*». Construction and Building Materials, 20(10), 849-857. 2006.
- [5] BOUALI. KH "Élaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires" 2013 _2014
- [6] WILLIAM.D, CALLISTER. JR «*Science et génie des matériaux* » modolu Editeur, 2001.
- [7] THOMAS. P. «*Influence des hydroxy propylguars sur les propriétés des mortiers de ciment à l'état frais* »; École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Français. 2013.
- [8] HUMBOLDT K.D.H., WEDAG A.G., «*L'évolution technologique du four rotatif avec préchauffeur à cyclones vers le four court, Pyrorapid*». 1986.
- [9] PLINSKIN. L. «*La fabrication du ciment*», Edition eyrolles, Paris, p 217.1993.
- [10] NOUI. A, «*Cours de matériaux de construction 3^{ème} année génie civil*», université de Bordj Bou Arreridj, 2012.
- [11] AITCIN.P.C et BARON. J «*Les adjuvants normalisés pour bétons, les bétons bases et données pour leur formulation*» ed. eyrolles,1996.
- [12] AITCIN.P.C et NEVILLE. A. M, et ACKER.P, Sep «*Integrated .view of shrinkage deformation*» Concrete International, vol. 19, no 9, p. 35-41, 1997.
- [13] ALEXADERSON. J «*Strength losses in heat cured concrete swedish cement and concrete*» Research Institute at The Royal Institute of Technology Stockholm, 1972.
- [14] RÉUNION D'INGÉNIEUR , matériaux de construction , Edition Eyrolles 1979.
- [15] COUTELAS,A. «*Le mortier de chaux* ». Éditions errance, Paris. P 15. 2005.

- [16] HEMIL. S «*EFFET COMBINE DES BILLES DU POLYSTYRENE ET LES FIBRES PLASTIQUE SUR LES MORTIERS AU CIMENT BLANC*» These de Doctorat. Université Mohamed Boudiaf- Msila. 2018.
- [17] LATASTE. JF, BEHLOUL. M, BREYSSE. D, «*Caractérisation d'un béton fibré par méthode non destructive*», Université Bordeaux 1 – CDGA (GHYMAC), 2007.
- [18] FESTA. J, DREUX. G, «*Nouveau guide du béton et ses constituants, 8^{ème} édition*», EYROLLES, 2007.
- [19] GCI712 «*Durabilité ET réparation du béton*», département Génie Civil ,Université de Sherbrooke-Canada, 2009 .
- [20] KOMAR. A., «*Matériaux et éléments de construction*», Edit. Mir, Moscou, Russie.
- [21] SYLVER. P «*Science des matériaux*», Université Pierre et Marie Curie 2005 ,2006.
- [22] AMR, H. A. RUSSLAN, A. M., SHARKAWI, S., FAKHRY M. A. «*Performance of modified lime mortar for conservation of ancient buildings*». 2nd International Conference on Innovative Building Materials. Caire, Egypt, December 2-4. 2018.
- [23] AREZKI TAGNI. H « *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons, chapitre 8* ».
- [24] COURARD L., DARIMONT A., SCHOUTERDEN M., FERAUCHE F., WILLEM X., DEGEIMBRE R. «*Durability of mortars modified with métakaolin Cement and Concrete Research*», Vol. 33, p. 1473-1479.2002.
- [25] «CIMENT-BÉTON». «*Documentation technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses application*». Paris; France 1994.
- [26] SMTR, «*Planetoscope - Statistiques : Statistique Mondiale en Temptréel, Production de déchets dans le monde*», [Online]. 2014. Avalable at.: <http://www.planetoscope.com/dechets/363-production-de-dechets-dans-le-monde.html>.
- [27] SWEEPNET, «*Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie*». Tech. rep. 2014, Available at:http://www.sweep-net.org/sites/default/files/ALGERIERAFRWEB_0.pdf.
- [28] MATE, «*Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés*». The Ministry of Land Planning and the Environment, 2010.
- [29] L'ANSEG, «*L'agence nationale de soutien des jeunes à l'emploi Constantine*», [Online], 2014.

- [30] UNECA, «*L'économie verte en Algérie : une opportunité pour diversifier et stimuler la production nationale*». Tech. Rep, 2012.
- [31] DAVID. L, «*Politique des déchets : l'approche du Royaume –Uni, Économie et statique*», 1995.
- [32] PIMIANTA. P & REMOND., «*Bétons de déchets : prévenir les risques*», CSTB magazine, n°109, novembre 1997.
- [33] ALLAOUI. A «*Valorisation des certains déchets dans le traitement de différent effluets*» Thèse de Doctorat. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA. 2019.
- [34] M. .M, «*Valorisation des déchets et des sous –produits industriels*», Paris, 1981.
- [35] PROOT, «*Technologie Propres Appliquées aux Industrie Agroalimentaire*», pp12. 2002.
- [36] CNERIB «*Valorisation des déchets de construction ‘ Rapport interne, Algérie, 2002.*
- [37] Faiz Z., Fakhi S., Bouih A., Idrissi A., Mouldouira M., J. Mater. «*Radioactive waste management : optimization of the mechanical property of cemented Ion Exchange Resin*». Environ. Sci. 3 (6) - 1129-1136. 2012.
- [38] KHERBACHE S., BOUZIDI N., BOUZIDI M. A., MOUSSACEB K., TAHAKOURT A.K., J. Mater. «*The behavior of the concretes and mortars reinforced by metallic fibers wastes as substitution of cement* ». Environ. Sci. 7 (1) - 18-29. 2016.
- [39] HANDEL N., HAFSI B., TOUATI A., DJABBAR Y., J. Mater. «*Substitution of the aggregate by solid waste of blast furnance in the preparation of concrete* ». Environ. Sci. 2 (S1) - 520-525. 2011.
- [40] CHAID R., JAUBERTHIE R., ZEGHICHE J., KHERCHI F., Eur. J. «*Valorisation du déchet de marbre et de la pouzzolane naturelle dans les mortiers (Valorization of waste marble and natural pozzolan in mortars)* ». Environ. Civil Eng. 15(3) - 427-445. 2011.
- [41] HEBHOUB. H., BELACHIA. M., «*Use of the marble wastes in the hydraulic concrete*» . Revue Nature et Technologie. 4 (1) - 41-46. 2011.
- [42] HEBHOUB. H.; BELACHIA. M. «*Marble waste sand introduction into the hydraulic concrete*» rapport de recherche, Nature Technologie 2011,08pages.
- [43] HEBHOUB. H, BELACHIA. M. «*Introduction of sand marble wastes in the composition of mortar*» rapport de recherche , Structural Engineering & Mechanics, pp 6 . 2014

- [44] COURARD. L., «*Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil*», *Notes de cours* Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux de Construction, 1998.
- [45] CHAN S Y N, «*Durability of High Strength Concrete Incorporation Carrier Fluidifying Agent*» *Magazine of Concrete Research*, 52, No. 4. August, pp. 235-242.
- [46] <https://fr.geologyscience.com/rocks/metamorphic-rocks/marble/?amp>
- [47] *En ligne Bonewitz, R. (2012). Roches et minéraux. 2e éd. Londres : DK Publishing.*
<https://www.amazon.com/Nat-Gd-Minerals-Nature-Guides/dp/0756690420>
- [48] L. BATALHA VIEIRA, V. FRANCIOSO, B. BUENO MARIANI, C. MORO, J. DANTAS VIANA BARBOSA... Sustainability, «*Valorization of Marble Waste Powder as a Replacement for Limestone in Clinker Production: Technical*», *Environmental and Economic Evaluation*, 2023.
- [49] VITALIANI. R.V. SAETTA A V, «*Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures*» Part I: Theoretical formulation”. *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 571-579, 2004.
- [50] A.H. MOHAMMED BELHADJI*, A. MAHI², M.Z. KAZI AOUEL¹, R. DERBAL¹, H. ABDELHADI, «*Valorisation du déchet de marbre et de la pouzzolane naturelle dans les mortiers*», *Smart Structures Laboratory (SSL) UnivCtr of Ain Temouchent, Po Box 284,46000,Algeria.*
- [51] GUNAYISI. E, «*Effects of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars*», *Materials and Structures*, 42: 813–26, 2009.
- [52] ERGUN.A, «*Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete*», *Construction and Building Materials*, 25: 806–12,, 2011.
- [53] GRAINE.A «*Rapport présentation de Cimenterie de Hadja-Soud* ». 2013.
- [54] BOUNABE AYACHE. B ; «*Automatisation du stackeur et le moteur four;* » Rapport de stage à ERCE et SCHB. Université de Paul Cézanne Aix Marseille 3.
- [55] MAKHLOUF.N, «*Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux* » *Mémoire Magister Université de Tizi-Ouzou*, 2010.
- [56] BOUKLI. H, SIDI ,M. A, «*Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen* », *Thèse de Doctorat à L'université, Tlemcen* -pp. 13-18-19-28, 2009.

- [57] ZEKRI .K, «*Formulation et comportement physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé* », Mémoire de Master, Université, Badji Mokhtar, Annaba, pp. 32, 2019.
- [58] KOMMAR. A.. « *Matériaux et éléments de constructions* ». Moscou, Édition Mir, 1975.
- [59] AFNOR. « *Bétons et constituants du béton : ciments et chaux* ». Tome 2. 3^{ème} édition, AFNOR 1990.
- [60] EN 196-1, «*Méthodes d'essais des ciments,*» Partie 1 : détermination des résistances. Norme : NBN EN 1015-2. (2007). *Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 2 : échantillonnage global des mortiers et préparation des mortiers d'essai.*
- [61] MIROUZI, G. AND HOUDA, A, «*Effect of mineral additions on the mechanical behavior of polymer concretes*», World Journal of Engineering, doi: 10.1108/WJE-12-2022-0513. 2023.
- [62] CHAID. R., «*Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux,*» Thèse Doctorale, École nationale Polytechnique, Edition : Presses académiques francophones, 2015.
- [63] OMAR,M.O., GHADA,D.A.E., MOHAMED,A.SHERIF AND HASSAN,A.M., «*Influence of Limestone Waste as Partial Replacement Material for Sand and Marble Powder in Concrete Properties*», HBRC Journal 8, 193-203.

NORMES

Normes

NF EN 1097-3. (1998). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats –Partie 3 : méthode pour la déterminer de la masse volumique en vrac et de la porosité inter-granulaire.

NA 442 .(2005). Ciment composition spécification et critères de conformité des ciment courant.

NF EN 12390-3. (2000). «Essai pour béton durci -partie3: résistance à la compression sur éprouvette».

NF EN 12390-7. Essais pour béton durci- partie 7 : masse volumique du béton durci.

NF P18-404. (2003). Béton – Essais d'étude, de convenance et de contrôle –Conservation des éprouvettes.

NF EN 1008. (2003). Eau de gâchage pour béton- Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

NA 231. (2010). Méthodes d'essais des ciment, détermination de la finesse.

NF EN 196-1. (2006). Méthodes d'essais des ciments-Partie 1 : détermination des résistances.

NBN EN 1015-2. (2007). «Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (à la table a secousses),»

NA 442. (2010). Ciment composition spécification et critères de conformité des ciment courant.

NF EN 459. (2012). Chaux de construction - Partie 2 : méthodes d'essai.

NF EN 196-1. (2006). Méthodes d'essais des ciments – Détermination des résistances mécaniques.

NF EN 196-3. (1955). Méthodes d'essai des ciment-Détermination du temps de prise et de stabilité (Indice de classement : P 15-473).

ANNEXES

Annexe – A : Fiche technique de la Chaux Éteinte

FICHE TECHNIQUE



CHAUX ÉTEINTE (El Khroub)

Unité de production

Daira: El Khroub

Wilaya: Constantine

Produits

Chaux Éteinte

Fleur de Chaux

Chaux Hydratée

Capacité de production

Four à Chaux d'une capacité 126T/j

Caractéristiques physiques

Finesse	88,39 % ≤ 80µm
Densité apparente	0,65g/cm ³
Poids moléculaire	74,09 g/mole
Blancheur	L* : 97,19 a*:+0,08 b*:+1,21
Aspect	Fine poudre blanche inodore

Caractéristiques chimiques

Hydroxyde de Calcium	Ca(OH) ₂ Totale	98,61%
Hydroxyde de Calcium	Ca(OH) ₂ Soluble	94,57%
PH		12,4
Humidité		< 1%
Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	0,0093%
Oxyde d'Aluminium	Al ₂ O ₃	0,0182%
Oxyde de Magnésium	MgO	< 0,2%
Oxyde de Manganèse	Mn ₂ O ₃	0,0015%
Oxyde de Silicium	SiO ₂	0,0477%
Fer	Fe	0,0065%
Aluminium	Al	0,0096%
Silicium	Si	0,0223%
Manganèse	Mn	0,0011%
Dioxyde de Carbone	CO ₂	< 1%



Nom Chimique

Hydroxyde de calcium Ca(OH)₂

N° C.A.S: 1305-62-0

EINECS: 215-137-3

Méthode de production

La chaux vive résulte de la cuisson à environ 1100- 1200 C. de pierres calcaires qui devient avec l'eau de la chaux hydratée (éteinte):
 $CaO + H_2O = Ca(OH)_2$
 Elle est obtenue en faisant agir de l'eau sur la chaux vive ou en laissant cette dernière à l'air.

Applications

Dessalement d'eau de mer
 Industrie sucrière
 Batiment
 Traitement des eaux potables
 Industrie pétrolière

Condition de stockage

Conserver au sec
 Isoler à l'abri de l'humidité
 Séparer des acides

Livraison

Big bag
 Sac 25kg
 Vrac (cocotte)

Ref:/SDQENV/SCHS/2022	
Date	19/04/2023
Du	30/01/2023 AU 28/02/2023
Classe de Résistance: 42,5	

GICA Béton
Ciment Portland composé
CEM IIA-M(S-L) 42,5N


Caractéristique Norme Moyenne Unité

CARACTERISTIQUE PHYSICO-CHIMIQUES DU CIMENT

Caractéristique	Norme	Moyenne	Unité
		Valeur Moyenne	
SiO ₂	NA 5042	20,24	%
Al ₂ O ₃	NA 5042	4,72	%
Fe ₂ O ₃	NA 5042	3,18	%
CaO	NA 5042	61,74	%
Teneur en oxyde de magnésium (MgO)	NA 5042	1,10	%
Teneur en anhydrite sulfurique (SO ₃)	NA 5042	2,09	%
K ₂ O	NA 5038	0,72	%
Na ₂ O	NA 5038	0,13	%
Chlorures	NA5038	0,01	%
Perte au feu	NA5042	4,67	%
CaO libre	-	1,16	%
R.Ins	NA5042	1,30	%
Tricalcium aluminate (C3A)	-	7,12	%
Finesse Blaine	NA231	3383	cm ² /g
Début du temps de prise	NA230	161	mn
Fin du temps de prise	NA230	261	mn
Expansion "le chatelier"	NA232	0,63	mm
Consistance	NA230	26,31	%

RESISTANCE A LA COMPRESSION SUR MORTIER

Comp	Norme	Moyenne	Unité
Comp 2 jours	NA234	16,34	Mpa
Comp 28jours	NA234	48,67	Mpa

Approuvé par: 



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر

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

« S.C.S.E.G. »

ش.ذ.أ. - رأسمالها الاجتماعي : 1.900.000.000 D A : S.P.A. au capital social de :



N° Identification Fiscale : 099 810 028 210 584 - N° Article d'Imposition : 10 38 52 58 011 - N° Registre de Commerce : 10/00- 0262105B98

Produit Commercialisé :

Ciment CEM II /A- L 42.5 N

Fiche technique

Période D'expédition :

-- Décembre -- 2019 -

Conformément à la norme NA 442 édition 2013

Caractéristique physico-mécaniques				Composition chimique		
Désignations	Unités	Exigence	Moyenne	Composé	Exigence	Moyenne (%)
Poids spécifique	Gr/cm ³		3.09	SiO ₂		19.35
Surface spécifique Blaine	Cm ² /gr		3953	Al ₂ O ₃		4.32
Consistance normale	% H ₂ O		25.35	Fe ₂ O ₃		3.33
Temps de prise	Début	Min.	≥ 60	CaO		62.74
	Fin	Min.	297.50			
Expansion à chaud	mm	≤ 10	1.25	MgO		2.59
Chaleur d'hydratation à (41h)	(j/g)	270	239	K ₂ O		0.57
Refus sur tamis 45 μm	%		20.30	Na ₂ O		0.15
Résistance à la flexion	02 jours	Mpa	4.52	SO ₃	≤ 3.50	2.60
	07 jours	Mpa	5.97	Cl ⁻	≤ 0.10	< 0.01
	28 jours	Mpa	6.43	P.A.F à 950 ° C		5.37
Résistance à la compression	02 jours	Mpa	≥ 10.00	CaO _{libre}		1.01
	07 jours	Mpa				
	28 jours	Mpa	Li ≥ 42.5 Ls ≤ 62.5			

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

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





شركة الإسمنت لحجار السود

FICHE TECHNIQUE CIMENT

F03-01/1000

Date d'édition: 02/11/2018

Version : 08

Page 1 sur 1

CIMENT PORTLAND COMPOSE CEMII/A-M(S-L)42,5N

CARACTERISTIQUE CHIMIQUE		CARACTERISTIQUE PHYSIQUE			CARACTERISTIQUE MECANIQUE		
ELEMENTS	% EN MASSE	NORME NA			NORME NA	EN Mpa	
PAF 975 °C	1 - 2	NA230	CONSISTANCE NORMALE	≥ 25	NA 442	COMPRESSION	
CaO	55 - 65	NA230	DEBUT DE PRISE	≥ 60		02 jours	14-17
SiO2	22 - 28	NA230	FIN DE PRISE	150 - 250	NA 234	07 jours	30-35
Al2O3	5 - 6	NA232	EXPANSION A CHAUD	≤ 10mm		28 jours	43-51
Fe2O3	3 - 3,6	NA231	SSBlaine cm ² /g	3300 - 4000		FLEXION	
MgO	1 - 2	NA5042	CHALEUR D'HYDRATATION	220-245 J/G ciment		02 jours	3,0-4,0
K2O	0,3 - 0,6	NA 5061			07 jours	5,0-6,5	
Na2O	0,1 - 0,16					28 jours	6,5-8,5
SO3	1.8 - 2,5	COPOSITION POTENTIELLE EN %		% DES CONSTITUANTS			
CaOL	0,8 - 1,8	C3S	57-63	CLINKER	≥ 74%		
CL ⁻	0 - 0,01	C2S	14-18	GYPSE	4 - 6%		
		C3A	7 - 10	CALCAIRE	6-10%		
		C4AF	10 - 12	LAITIER	6-10%		
Teneur en Cr6+ = 0,19 ppm							

DOMAINE D'UTILISATION

Utilisation courante de ce type de ciment :

- Fondations (béton de propreté et béton de semelle en milieux moyennement ou non agressifs).
- Ouvrage en béton armé (Murs, Linteaux, Poteaux et dalle de compressions).
- Dallage en béton , Montage de mure et maçonnerie et Scellements de carrelage (Dalles, pierres et carrelage).
- Chape (mortier de ciment) .

PRECAUTION D'EMPLOI

Ce type de ciment est employé avec précaution pour :

- Travaux à la mère (Ouvrages en milieux moyennement agressifs vis-à-vis des sulfates, terrains gypseux, eaux industrielles). emploi
- Bétonnage au dessous de 5° C (il est conseillé d'utiliser des ciments de résistance initiale élevée R)

NB: Ce type de ciment ne convient pas pour :

- Travaux en eaux à haute teneur en sulfates (Ouvrages en milieux fortement agressifs vis-à-vis des sulfates), emploi obligatoire du ciment CRS.

STOCKAGE :

Eviter :

- Un stockage prolongé au-delà de trois (03) mois.
- Un stockage dans des endroits humides.

EMBALLAGE :

- Le ciment est emballé dans des sacs en papier kraft à 02 plis, le système de fermeture garantie l'inviolabilité du sac.

ATTENTION

- Un contact prolongé du ciment avec la peau peut être irritant.