

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار ثليج
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT
كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de Magister

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie civil

Option : Matériaux composites et calcul des structures

Par:

REZZOUG Safia

THÈME

FORMULATION DES MORTIERS À BASE DE CHAUX ET DE SABLES DUNAIRE ET ALLUVIONNAIRE

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

<i>Mr KHENFER Mohamed Mouldi</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>
<i>Mr BEDERINA Madani</i>	<i>Pr</i>	<i>Examinateur</i>
<i>Mr HADJOUJJA Mourad</i>	<i>M.C.B</i>	<i>Examinateur</i>
<i>Mme DJOUDI Amina</i>	<i>M.C.B</i>	<i>Invitée</i>
<i>Mr ZAIDI Ali</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mr MAKHLOUFI Zoubir.</i>	<i>M.C.A</i>	<i>Co-Encadreur</i>

Année Universitaire 2015/2016

RÉSUMÉ

Les dégradations les plus significatives encourues par les mortiers à base de ciment Portland ordinaire peuvent être à l'origine de diverses dégradations (fissuration, désagrégation, écaillage, corrosion, éclatement, gonflement,) ce qui peut mettre en péril la stabilité de ces matériaux cimentaires dans certaines applications du domaine de génie Civil, notamment dans le cas de leur utilisation comme enduit extérieur ou chape dans les zones sahariennes où la température journalière dans ces zones peut dépasser les 50°C en été. C'est dans cet objectif que nous avons entamé cette étude, qui porte sur la confection des mortiers étanche à base de chaux et sables dunaire et alluvionnaire.

Dans notre projet, nous sommes donc concentrés sur la formulation de ces mortiers afin de déceler la composition optimale conduisant aux meilleures propriétés physico-mécaniques, particulièrement la meilleure imperméabilité menant à la meilleure étanchéité de ces mortiers.

ضرار البليغة الناتجة عن استعمال خليط الاسمنت البورتلاندي العادي يمكن أن تكون مصدر العديد من الخسائر (تكسير والتفكك، ، وتقسيم) والتي يمكن أن تعرض خطر استقرار هذه سمنتية في بعض التطبيقات مجال الهندسة المدنية، آلة استخدامها للتغطيات الخارجية في المناطق الصحراوية حيث درجة الحرارة اليومية في هذه المناطق يمكن أن تتجاوز 50 درجة مئوية الصيف. انطلاقا من هذه المعطيات كان هدف هذه الخليط (جير-) وذلك باستعمال نوعين من : تحضير التركيبة المثلى للحصول على أحسن نتيجة بالنسبة للخصائص الميكانيكية يزيائية لتحسين نوعي .

SUMMARY

The most significant damage incurred by mortars based on cement Portland ordinary can cause various damages (cracking, disintegration, spalling, corrosion, splitting, swelling,) Which could dangerous on the stability of these cementitious materials in certain applications of the field of Civil Engineering, especially in the case of their use as coating surface or cover in Saharan area where the daily temperature in these zones can exceed 50 ° C in summer. The objective of this study that we started, which à waterproof lime mortars were prepared by dune and alluvial sands. In our project, so we are focused on making these mortars to identify the optimal composition leading to better physical and mechanical properties, especially the best impermeability and waterproof of these mortars.

REMERCIEMENTS

Je remercie DIEU qui ma donné la force et la patience pour terminer ce travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements :

En premier lieu le rapporteur Mr. ZAIDI. Ali professeur à l'Université de LAGHOUAT qui a dirigé ce travail de recherche par ses conseils et sa disponibilité dans toutes les étapes de ce thème.

Je remercie très sincèrement le co-rapporteur Mr MAKHLOUFI. Zoubir Maître de conférences assistant à l'université de Laghouat pour son aide scientifique et technique, et sa disponibilité permanente.

Je tiens à remercier Mr KHENFER. Mohamed mouldi professeur à l'université de Laghouat qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance de cette thèse.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr HADJOUJJA. Mourad Maître de conférences à l'université de Laghouat et Mr BEDERINA. Madani Maître de conférences à l'université de Laghouat, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être Examineurs de mon travail.

Je tiens à remercier Mme DJOUDI. Amina Maître de conférences à l'université de Laghouat qui m'a fait l'honneur d'accepter notre invitation de soutenance de cette thèse.

Un spécial remerciement à tous les enseignants de Génie Civil qui ont contribué à ma formation.

Nous tenons à remercier les membres de laboratoire de Génie Civil de l'université de Laghouat.

Tous mes remerciements vont à tous mes collègues de Post-graduation pour leurs encouragements et leurs collaborations : KAABOUCHE.A- KOURICHI.Y – BENGHIT.A BACHIRI A. – BOUSSOIRE. A.

En fin Je remercie ma famille qui m'a soutenu durant toute ma formation.

Sans oublier ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

A ma cher mère Khedidja source de tendresse qui a sacrifié pour mon bonheur,

A mon cher père Noureddine,

A mon marie Ilyes,

A Mes chers frères : Mustapha Ridha, Ahmed,

A Mes chères sœurs : Affaf, Fatima, Fatiha, Aicha, Meriem, Samia,

Aux personnes qui mon beaucoup aidé surtout Djamel Goumiri,

A toutes mes amies surtout la promotion de magister 2012/2013,

A tous les enseignants du département de génie civil,

Et à la fin à tous qui ont été oubliés par mes mots...

Je demande le dieu tout-puissant la réussite et la Sincérité.

SAFIA

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE.....2

I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Historique de l'utilisation de la chaux dans le mortier.....	5
I.2 Qu'est-ce que la chaux?.....	7
I.3 Différents types de chaux et leur classification.....	11
I.4 Aperçu technique sur les mortiers.....	12
I.4.1 Les mortiers romains.....	12
I.4.2 Les mortiers de chaux.....	13
I.4.3 Processus de durcissement des mortiers de chaux.....	14
I.5 La chaux et le ciment - Les différences.....	15
I.5.1 Comportement simultané des mortiers mixtes chaux-ciment.....	16
I.5.2 Avantages du mortier de ciment et de chaux.....	17
I.5.1.1 Résistance d'adhérence en flexion.....	17
I.5.1.2 Fuite d'eau.....	18
I.5.1.3 Durabilité.....	18
I.5.1.4 Résistance à la compression.....	19
I.5.1.5 Uniformité.....	19
I.6 Quelques travaux de recherche sur les mortiers de chaux.....	20
I.7 les produits à base de chaux.....	25
I.7.1 Les briques silico-calcaires.....	25
I.7.2 Briques en Béton de chanvre.....	26
I.8 Conclusion.....	28

II. CARACTERISATION DES MATERIAUX

II.1 Caracterisation des materiaux.....	30
II.1.1 Introduction.....	30
II.1.2 Propriété des matériaux.....	30
II.1.2.1 La chaux.....	30
II.1.2.2 Sable	35
II.1.2.3 Eau de gâchage.....	41
II.1.3. Conclusions.....	42
II.2 Essais et méthodes expérimentales.....	43
II.2.1 Introduction.....	43
II.2.2 Préformulation de la matrice.....	43
II.2.2.1 Préparation de la chaux éteinte.....	43
II.2.2.2 Dosages utilisés en chaux/sable (C/S).....	44
II.2.2.3 Préparation des mortiers et éprouvettes.....	44
II.2.3 Essais réalisés sur les mortiers à l'état frais.....	47
II.2.4 Suivi des éprouvettes à l'état durci	47
II.2.4.1 Suivi de la masse.....	47
II.2.4.2 Suivi de la longueur.....	48
II.2.4.3 Suivi de la résistance mécanique.....	49
II.2.5 Essais de durabilité.....	51
II.2.6 Programme expérimental.....	52
II.2.3 Conclusion.....	58

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION

III.1 Introduction.....	60
III.2. Etude du mortier à l'état frais.....	60

III.2.1 Optimisation du rapport E/C.....	60
III.2.2 Discussions des résultats.....	65
III.3 Etude du mortier à l'état durci.....	66
III.3.1 Variations de masse.....	66
III.3.1.1 Conservation à l'air libre.....	67
III.3.1.1 Conservation sous toile de jute.....	69
III.3.1.3 Effet du mode de conservation sur la perte de masse.....	70
III.3.1.4 Effet de type de sable sur la perte de masse.....	71
III.3.1.5 Récapitulation de l'analyse des résultats.....	71
III.3.2 Variation de longueur des éprouvettes (retrait).....	73
III.3.2.1 Eprouvettes couvertes en toile de jute.....	73
III.3.2.2 Retrait d'éprouvettes exposées à l'air libre.....	74
III.3.2.3 Effet de type de sable sur le retrait.....	76
III.3.2.4 Effet de mode de conservation sur le retrait.....	77
III.3.2.5 Récapitulation de discussion des résultats	77
III.3.3 Résistance mécanique.....	78
III.3.3.1 Résistance à la flexion.....	78
III.3.3.1.1 Eprouvettes conservées sous toile de jute.....	78
III.3.3.1.2 Eprouvettes conservées à l'air libre.....	80
III.3.3.1.3 Effet de type de sable sur la résistance à la flexion.....	81
III.3.3.1.4 Effet du mode de conservation sur la résistance à la flexion.....	82
III.3.3.2 Résistance à la compression.....	82
III.3.3.2.1 Eprouvettes conservées sous toile de jute.....	82
III.3.3.2.2 Eprouvettes conservées à l'air libre.....	84
III.3.3.2.3 Effet de type de sable sur la résistance à la flexion.....	85

III.3.3.2.4 Effet du mode de conservation sur la résistance à la flexion.....	86
III.3.3.3 Récapitulation de l'analyse des résultats	87
III.4 Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	89
III.4.1 Essai d'absorption sur le mortier de sable alluvionnaire.....	89
III.4.2 Essai d'absorption sur le mortier de sable de dune.....	90
III.4.3 Effet de type de sable sur l'absorption capillaire.....	91
III.4.4 Récapitulation de l'analyse des résultats	92
III.5 Diffraction aux rayons x.....	92
III.6 Conclusion.....	94
CONCLUSIONS GENERALES.....	99
BIBLIOGRAPHIE.....	103

LISTE DES FIGURES

Figure. I.1 : Cycle de la chaux.....	8
Figure. I.2 : Schéma de fabrication de la chaux.....	9
Figure. I.3 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de silice combinable.....	9
Figure. I.4 : Composition chimique de la chaux.....	10
Figure. I.5 : Schéma de préparation de la chaux et du mortier de chaux.....	13
Figure. I.6 : Formes sous lesquelles le dioxyde de carbone est dissous d'après Valsaraj.....	14
Figure. I.7 : Relation entre la composition du mortier de chaux, la résistance à la compression et le pouvoir de rétention d'eau selon la norme [ACNOR A179].....	16
Figure. I.8 : Histogrammes des propriétés mécaniques et d'absorption capillaire.....	22
Figure. I.9 : Evaluation des propriétés mécaniques des différentes compositions (à 28j).....	23
Figure. I.10 : Evaluation des propriétés mécaniques des différentes compositions des mortiers de chaux.....	24
Figure. I.11 : Evaluation des caractéristiques mécaniques des briques de chanvre....	27
Figure. I.12 : Variation de la masse volumique absolue et de retrait des briques de chanvre.....	27
Figure. II.1 : Diffractogramme de la chaux de Saïda.....	32
Figure. II.2: Dispositif Le chatelier.....	32
Figure. II.3 : Dispositif expérimental du perméabilimètre Blaine.....	33
Figure. II.4 : Diffractogramme du sable dunaire de la zone de LAGHOUAT.....	35
Figure. II.5 : Diffractogramme du sable alluvionnaire de la zone de LAGHOUAT...	36
Figure II.6 : Essai d'équivalent de sable.....	37
Figure. II.7 : Analyse granulométrique de sable alluvionnaire.....	38
Figure. II.8 : Analyse granulométrique de sable dunaire.....	39
Figure II.9 : Moule et d'âme pour Le coefficient d'absorption.....	41
Figure II.10 : Préparation de la chaux éteinte.....	43
Figure. II.11: Malaxeur pour mortier.....	45
Figure. II.12 : Moules prismatiques utilisés pour fabriquer les éprouvettes en mortier de chaux.....	45

Figure. II.13 : Conservation à l'air libre.....	46
Figure. II.14 : Conservation sous toile de jute.....	46
Figure. II.15: Maniabilimètre LCL type « B » utilisé pour la mesure de la maniabilité.....	47
Figure. II.16: Appareillage de mesure du retrait.....	48
Figure. II.17: Machine utilisée pour la mesure de la résistance à la flexion et compression.....	49
Figure. II.18: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (à 3 points).....	50
Figure. II.19: Dispositif de rupture en compression.....	50
Figure. II.20 : Absorption d'eau par capillarité.....	51
Figure. III.1: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:2) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).....	61
Figure. III.2: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:2.5) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).....	62
Figure. III.3: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:3) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).....	62
Figure. III.4: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:3.5) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).....	63
Figure. III.5: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:4) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).....	64
Figure. III.6: Effet des dosages pour sables alluvionnaire et dunaire sur le rapport E/C.....	65
Figure. III.7: Variation de perte de masse des éprouvettes de mortiers à base de sable alluvionnaire à l'air libre.....	67
Figure. III.8: Variation de perte de masse des éprouvettes de mortiers à base de sable dunaire à l'air libre.....	68
Fig. III.9: Variation de perte de masse des éprouvettes du mortier à base de sable alluvionnaire sous toile de jute.....	69
Figure. III.10: Variation de perte de masses des éprouvettes du mortier à base de sable dunaire sous toile de jute.....	69
Figure III.11 : Effet de mode de conservation sur la perte de masse pour les deux types de mortier.....	70

Figure III.12: Effet de type de sable sur la perte de masses pour les deux milieux de conservations.....	71
Figure. III.13: Variation de longueur des éprouvettes du mortier à base de sable alluvionnaire sous toile de jute.....	73
Figure. III.14: Variation de longueur des éprouvettes du mortier à base de sable dunaire sous toile de jute.....	74
Figure. III.15: Variation de longueur des éprouvettes du mortier à base de sable alluvionnaire à l'air libre.....	75
Fig. III.16: Variation de longueur des éprouvettes du mortier à base de sable de dune à l'air libre.....	75
Figure III.17: Effet de type de sable sur le retrait pour les deux milieux de conservations.....	76
Figure III.18: Effet de mode de conservation sur le retrait pour les deux types de mortiers.....	77
Figure.III.19 : Résistance à la flexion des mortiers à base de sable alluvionnaire sous toile de jute	78
Figure. III.20 : Résistance à la flexion des mortiers à base de sable dunaire sous toile de jute	79
Figure. III.21 : Résistance à la flexion des mortiers à base de sable alluvionnaire à l'air libre	80
Figure. III.22 : Résistance à la flexion des mortiers à base de sable dunaire à l'air libre	80
Figure III.23 Effet de type de sable sur la résistance à la flexion pour les deux milieux de conservations.....	81
Figure III.24 Effet de mode de conservation sur la résistance à la flexion pour les deux types de mortiers.....	82
Figure. III.25 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable alluvionnaire sous toile de jute	83
Figure. III.26: Résistance à la compression des mortiers à base de sable dunaire sous toile de jute	83
Figure. III.27 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable alluvionnaire à l'air libre	84
Figure. III.28 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable dunaire à l'air libre	85

Figure III.29 Effet de type de sable sur la résistance à la compression pour les deux milieux de conservations.....	86
Figure III.30 Effet de mode de conservation sur la résistance à la flexion pour les deux types de mortiers.....	86
Figure. III.31: Absorption d'eau par capillarité du sable alluvionnaire.....	89
Figure. III.32: Absorption d'eau par capillarité du sable dunaire.....	90
Figure III.33 Effet de type de sable sur l'absorption capillaire des mortiers.....	91
Figure III.34 Analyse par DRX de l'échantillon du mortier à base de sable alluvionnaire avec badigeon conservé à l'air libre C/S= (1:2).....	93
Figure III.35 Analyse par DRX de l'échantillon du mortier à base de sable dunaire avec badigeon conservé à l'air libre C/S= (1:2).....	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Propriétés physiques et chimiques de la chaux (vive et éteinte).....	10
Tableau I.2 : Quelques recettes des mortiers romains.....	13
Tableau I.3 : Résistance à la compression de deux formulations romaines.....	13
Tableau I.4 : Mode de préparation selon les normes BS4551et EN196-1.....	20
Tableau I.5 : Mode de conservation selon BS4551et EN196-1.....	21
Tableau I.6 : Propriétés physico mécaniques de la brique de Boussaâda.....	26
Tableau. II.1 : Gamme de certaines caractéristiques de différent type de chaux.....	31
Tableau II.2: Composition chimiques de la chaux de Saïda.....	31
Tableau II.3 : Début et fin de prise de la chaux.....	34
Tableau II.4: Valeurs de l'équivalent de sable de différents sables.....	38
Tableau II.5 : Module de finesse des 2 sables.....	39
Tableau II.6 : Coefficient d'uniformité et de courbure des 2 sables.....	40
Tableau II.7 : Coefficient d'absorption des 2 sables.....	41
Tableau II.8 : Analyse chimique de l'eau utilisée.....	41
Tableau II.9 : Programme expérimental des essais mécaniques : Compression et flexion.....	51
Tableau II.10 : Programme expérimental des essais mécaniques : Compression et flexion.....	52
Tableau II.11 : Programme expérimental des essais physiques : variation de la masse.....	54
Tableau II.12 : Programme expérimental des essais physiques : variation de la masse.....	55
Tableau II.13. Programme expérimental des essais physiques : Variation de longueur.....	56
Tableau II.14 : Programme expérimental des essais physiques : Variation de longueur.....	57
Tableau II.15 : Programme expérimental des essais physiques : Absorption capillaire.....	58
Tableau III.1: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:2) avec les deux catégories de sables.....	61

Tableau III.2: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:2.5) avec les deux catégories de sables.....	61
Tableau III.3: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:3) avec les deux catégories de sables.....	62
Tableau III.4: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:3.5) avec les deux catégories de sables.....	63
Tableau III.5: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:4) avec les deux catégories de sables.....	63
Tableau III.6: Composition du mortier à chaux à base de sable alluvionnaire et dunaire.....	64

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES UTEISÉS

MSD : Mortier de sable dunaire.

MSA : Mortier de sable alluvionnaire.

C-S-H: Silicates de calcium hydratés

Ca(OH)_2 : Hydroxyde de calcium (Portlandite)

CaO : Chaux libre

CaCO_3 : Calcite

Q : Quartz

Mg : Magnésium

AL : Aluminium

Ca : Calcite

Fe_2O_3 : oxide de fer

CaO : chaux

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les étanchéités des terrasses de bâtiments implantés dans les régions Sud Sahariennes connaissent des dégradations atroces à cause des conditions climatiques très sévères de ces régions influant sur la durabilité des matériaux constituant ces étanchéités.

Pour pallier à certains inconvénients des bétons ou mortiers à ciment Portland, l'utilisation des mortiers de chaux à base de sables alluvionnaire-dunaire s'avère très intéressant surtout que ces matériaux suscitent un regain d'intérêt grâce à leurs qualités particuliers par rapport aux matériaux de construction conventionnels dans certains domaines de génie civil.

Pour cela, l'utilisation du mortier de chaux dans les constructions implantées dans les régions Sahariennes est très indispensable à cause de ses meilleures caractéristiques physiques telles que l'isolation thermique et sa faible perméabilité aux eaux pluviales.

Etant donné que le désert algérien représente 80% de la superficie total du pays, et puisque les régions sahariennes sont riches en matériaux naturels tel que le sable dunaire et le sable alluvionnaire, c'est dans cette optique que nous avons entamé cette recherche dans le but de valoriser ces matériaux susmentionnés par conséquent on doit réfléchir à la confection d'un matériau de construction qui ne sera pas affecté par le climat désertique, un matériau qui aura un rôle protecteur des constructions sahariennes et jouant un rôle primordial surtout du point de vue étanchéité et isolation thermique.

L'objectif de ce travail présente d'une part le développement des mortiers étanches à base de chaux et de sable dunaire- alluvionnaire et d'autre part, l'étude de ces principales propriétés physico-mécaniques. Deux modes de conservation sont utilisés :

- ✓ Conservation à l'air libre
- ✓ Conservation par la toile de jute mouillée.

Deux types de spécimens de mortier à chaux sont pris en considération dans ce travail, il s'agit des mortiers à chaux à base de sable de dune avec et sans badigeon et du mortier à chaux à base de sable alluvionnaire avec et sans badigeon.

Dans ce cadre on s'intéresse en particulier à l'ouvrabilité, le suivi des éprouvettes à l'état durci y compris le suivi de la masse et de la longueur, les résistances à la compression et à la flexion, et l'absorption d'eau par capillarité.

Cette étude va nous permettre de savoir l'influence de l'environnement, de l'âge et du type de sable sur le comportement physique et mécanique de ces mortiers.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique

Le deuxième chapitre se compose de 2 parties :

La première étudie la caractérisation des matériaux utilisés dans l'élaboration des différents mortiers, en précisant les essais qui sont nécessaires ainsi que leurs normes d'utilisations. La deuxième s'occupe de la description des essais et méthodes expérimentales normalisées par les quelles on peut aboutir au but de ce thème qui est la formulation des mortiers étanche à base de chaux et de sables dunaire-alluvionnaire.

Le troisième chapitre comporte l'étude physico-mécanique des mortiers. Résultats, analyse et discussion des résultats expérimentaux.

Finalement, on termine ce travail par une conclusion générale, suivie des références bibliographiques.

I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Historique de l'utilisation de la chaux dans le mortier

Les premiers mortiers étaient fabriqués de boue ou d'argile. On utilisait ces matériaux en raison de leur disponibilité et de leur faible coût. Les Égyptiens utilisaient les mortiers de gypse pour lubrifier l'assise des grosses pierres qu'on déplaçait pour les mettre en place [1].

On a découvert que la pierre calcaire, lorsque brûlée et combinée à l'eau, produisait un matériau qui durcissait avec le temps. Le premier usage documenté de la chaux comme matériau de construction remonte à environ 4000 ans av. J.-C., alors que les Égyptiens l'utilisaient pour plâtrer les pyramides [2].

Le début de l'utilisation de la chaux dans les mortiers est vague. On sait par contre que l'Empire romain utilisait couramment la chaux dans les mortiers. Vitruvius, un architecte romain, donnait les grandes lignes pour la préparation des mortiers de chaux [3].

Lorsque la chaux est éteinte, laissez-la se mélanger avec du sable de manière à ce qu'il y ait trois parties de sable de carrière pour une partie de chaux; dans le cas de sable provenant de rivière ou de l'océan, deux parties de sable pour une partie de chaux. On obtient ainsi la bonne proportion pour le mélange."

Les mortiers contenant uniquement de la chaux et du sable nécessitent du dioxyde de carbone contenu dans l'air pour se convertir et reprendre la forme de pierres calcaires et durcir. Les mortiers de sable et de chaux durcissent lentement et ne durcissent pas sous l'eau. Les Romains ont créé des mortiers hydrauliques qui contenaient de la chaux et des pouzzolanes tels que la poussière de brique et la cendre volcanique. Ces mortiers étaient destinés à des applications où la présence d'eau ne permettait pas une carbonatation adéquate du mortier [4]. Des exemples de ce type d'application comprennent les citernes, les bassins de poissons et les aqueducs.

Les progrès les plus importants de l'utilisation des pouzzolanes dans les mortiers sont survenus au cours du 18^{ème} siècle. On a alors découvert qu'en brûlant de la pierre calcaire contenant des argiles, on produisait un produit hydraulique. En 1756, James Smeaton a peut-être mis au point le premier produit de chaux hydraulique en calcinant de la pierre calcaire Blue Lias contenant de l'argile. On ajoutait également de la terre pouzzolanique d'Italie pour donner plus de résistance [5].

Ce mélange de mortier a servi à construire le phare Eddystone. James Parker a breveté un produit appelé ciment romain ou ciment naturel en 1796. Le ciment naturel était produit en brûlant ensemble un mélange de pierre calcaire et d'argile dans des fours similaires aux fours utilisés pour la chaux. Le produit qui en résultait était broyé et entreposé dans des contenants étanches. Les ciments naturels contenaient généralement plus d'argile que les produits de chaux hydrauliques, ce qui offrait une plus grande résistance. Les mortiers de ciment naturel étaient utilisés dans la construction lorsque la maçonnerie était soumise à de l'humidité et où des niveaux de résistance élevés étaient requis [1].

Joseph Aspdin, un constructeur/maçon anglais, brevetait en 1824 un matériau appelé ciment portland. Le ciment portland est fait d'un mélange de pierre calcaire, d'argile et d'autres minéraux dans des proportions bien contrôlées; le mélange est ensuite calciné et broyé en fines particules. Bien que certains ciments portland fussent importés d'Europe, sa fabrication aux États-Unis n'a débuté qu'en 1871. La consistance et les niveaux élevés de résistance du ciment portland lui permettent de remplacer les ciments naturels dans les mortiers. Par lui-même, le ciment portland a une mauvaise maniabilité, mais combiné à la chaux, il offre un excellent équilibre de résistance et de maniabilité. L'ajout du ciment portland aux mortiers de chaux accélère la vitesse du processus de construction des édifices de maçonnerie grâce à l'obtention d'une résistance plus rapide. Différents types de mélange combinant différentes quantités de chaux et de ciment portland ont été élaborés. En 1951, ASTM (American Society For Testing and Materials) publiée la norme C270-51 [6] (Standard Specification for Unit Masonry).

Cette norme permet de spécifier les combinaisons de ciment et de chaux par proportions de volume ou par propriétés de mortier. La norme ASTM C270 [6] est encore utilisée aujourd'hui. Cette norme identifie cinq types de mortier à l'aide de l'expression MASON WORKS. Les mélanges de ciment/chaux de type M possèdent la résistance à la compression la plus élevée et les mélanges de type K possèdent la résistance la plus faible.

Jusqu'aux environs de 1900, on utilisait la pâte de chaux dans les applications de construction. On brûlait la pierre calcaire dans de petits fours souvent construits dans une pente afin de faciliter le chargement [7].

On utilisait du bois, du charbon et de la coke comme combustible. La chaux vive produite par ces fours était ajoutée à de l'eau dans un trou ou une cuve de métal et trempée pendant de longues périodes de temps. Le temps de trempage requis variait selon la qualité de la chaux vive et pouvait varier de quelques jours à des années. On croyait que plus longtemps elle trempait, plus elle était

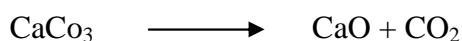
efficace. La norme « Standard Specification for Quicklime for Structural Purposes » a été élaborée en 1913. Avec le début du siècle commençait l'utilisation des produits de chaux éteinte. On ajoutait de l'eau à la chaux vive à l'usine de fabrication afin de réduire le temps de trempage requis sur le chantier. À la fin des années 1930, la production de produits de chaux dolomitique éteinte sous pression débutait. Ces produits ne nécessitaient que de courtes périodes de trempage (20 minutes ou moins) avant l'utilisation. On publiait en 1946 la norme ASTM C207 [8] (Standard Specification for Hydrated Lime for Masonry Purposes). Cette norme identifiait deux, et par la suite quatre, types de produits de chaux qui peuvent être utilisés dans les applications de maçonnerie. Les produits de chaux ont joué un rôle important dans la construction de maçonnerie pendant des milliers d'années. Avant 1930, la plupart des constructions de maçonnerie utilisaient des mortiers à base de chaux. La chaux offre un rendement éprouvé comme en témoignent des structures telles que la Grande Muraille de Chine, qui existe depuis des centaines d'années. Les raisons qui justifiaient l'utilisation de la chaux dans le mortier il y a 2000 ans sont toujours valides aujourd'hui.

I.2 Qu'est-ce que la chaux?

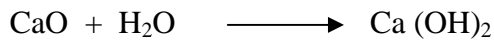
Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des teneurs élevées de carbonates de calcium et/ou de magnésium. Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique. L'utilisation des produits à base de chaux et de calcaire remonte à la préhistoire. Utilisés depuis plus de 12 000 ans, il s'agit des plus anciens matériaux utilisés par l'humanité dans toutes sortes d'applications : en art et en architecture, dans les matériaux de construction, la préparation des aliments, les soins de toilette personnels, les produits chimiques industriels et bien plus. Aujourd'hui, les produits à base de chaux et de calcaire sont à la base de toute économie industrielle. Ces produits sont utilisés partout et représentent une composante de base importante de notre société industrielle.

a) Cycle de la chaux

Les produits dérivés du calcaire (CaCO_3) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire à une température de 750 à 950°C pour former la chaux vive (oxyde de calcium CaO). Elle est exprimée par l'équation chimique suivante :



La chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive, cette opération s'appelle extinction ou hydratation. Elle exprimée chimiquement par l'équation :



On peut remarquer que le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire. Cette réaction représente la première réaction de durcissement des mortiers historiques. L'équation chimique s'exprime par :

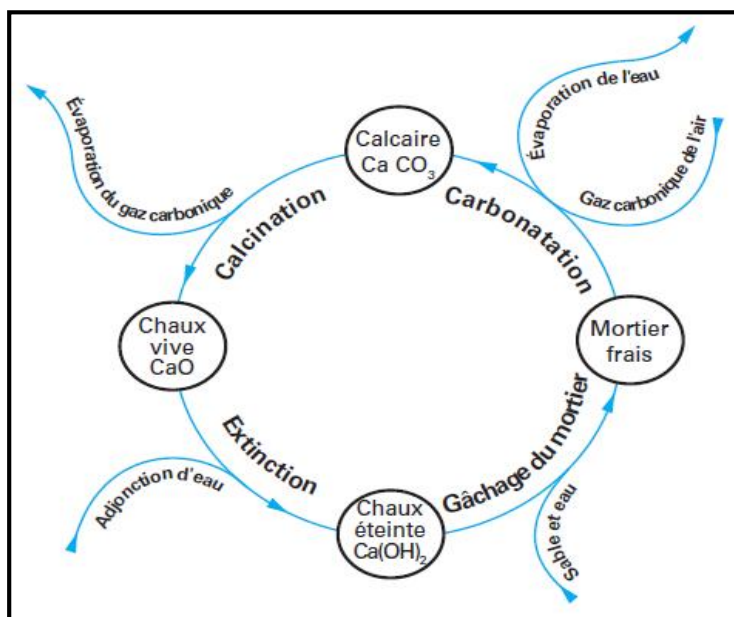
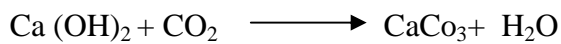


Figure I.1. Cycle de la chaux.

Le schéma de la figure I.2 représente les différentes proportions des constituants et leurs changements de la première phase (roche calcaire) à la dernière phase qui est l'extinction. En constatant particulièrement les différents pourcentages de la silice qui se différencient en manière d'action sur le comportement de la chaux, et que ce n'est pas toute la silice présente dans la chaux pendant la calcination rentre en action avec l'hydroxyde de carbone, on ne prend alors que la silice réactive combinée, jouant le rôle de la création des composants hydratés responsables au court durcissement et donnant au liant son aspect hydraulique.

L. Vicat n'a pas pris en considération cette approche, il considérait que toute la silice présente dans la roche mère réagit avec la chaux comme c'est indiqué dans l'histogramme de la figure I.3. Celui-ci exprime l'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de la silice combinée

b) Composition chimique de la chaux

La figure I.4 montre que Les ions des atomes de Ca, C et O qui rentrent dans la composition et transformation de la chaux.

- ❖ CaCO_3 : la pierre calcaire : $(\text{Ca}^{++}) + \text{Ion}(\text{CO}_3^-)$
- ❖ CaO : Oxyde de calcium (la chaux vive) : $(\text{Ca}^{++}) + (\text{O}^{--})$
- ❖ $\text{Ca}(\text{OH})_2$: Hydroxyde de calcium (la chaux éteinte) : $(\text{Ca}^{++}) + 2(\text{OH}^-)$

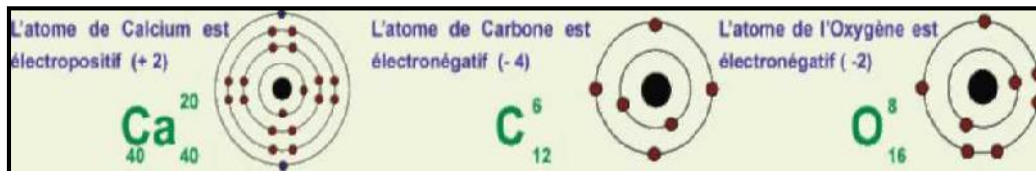


Figure I.4. Composition chimique de la chaux

c) Propriétés physiques et chimiques de la chaux

Le tableau I.1 présente les propriétés physique et chimique de la chaux vive et la chaux éteinte.

Tableau I.1: Propriétés physiques et chimiques de la chaux (vive et éteinte)

	Chaux vive	Chaux éteinte
Nom	Oxyde de calcium	Hydroxyde de calcium
Formule chimique	CaO	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Aspect	Roche, granulés, poudre. Blanc	poudre. Blanc
Odeur	Sans	Sans
Point de fusion	2 614°C	Décomposition à 580°C (se transforme en CaO)
Point d'ébullition	2 850°C	2 850°C
Inflammabilité	Non	Non
MVA*	0,7 à 1,2 t/m ³	0,2 à 0,8 t/m ³
Poids spécifique	3 350 kg/m ³ (à 20°C)	2 200 kg/m ³ (à 20°C)
Solubilité dans l'eau	1,4 kg/m ³ à 0°C ; 1,25 kg/m ³ à 20°C	1,85 kg/m ³ à 0°C ; 1,65 kg/m ³ à 20°C
pH (à 25°C)	12,4 en solution saturée	
Réactivité	Réaction avec l'eau et les acides, avec fort dégagement de chaleur.	Réaction avec l'aluminium en présence d'eau, forte réaction exothermique en présence d'acides.

* MVA : masse volumique apparente.

d) Propriétés exceptionnelles de la chaux

- * **Microporosité** : matériau respirant, la chaux permet la fabrication d'un mortier perméable à la vapeur d'eau, évitant ainsi les condensations, expulsant l'humidité pour obtenir une meilleure hygrométrie et une nette amélioration du confort intérieur.
- * **Imperméabilité** : étanche à l'eau de ruissellement, la chaux protège les maçonneries des intempéries
- * **Isolation** : associée à d'autres matériaux (chanvre) elle a des vertus isolantes, aussi bien phoniques que thermiques
- * **Assainissement** : grâce à ses vertus bactéricides, la chaux limite la prolifération des acariens, champignons, salpêtres et mauvaises odeurs.
- * **Plasticité** : ses remarquables qualités de souplesse et d'élasticité permettent à la chaux de s'adapter parfaitement à de multiples supports, limitant considérablement les fissures dans les enduits.
- * **Esthétique** : la chaux donne un cachet inimitable au support par le fait qu'elle vieillit et se patine très bien

I.3 Différents types de chaux et leur classification

La présence de l'argile dans le calcaire provoque d'importantes modifications qui affectent la chaux aussi bien à l'extinction qu'à la prise. Suivant le pourcentage de l'argile présente dans la roche pendant la calcination, on peut distinguer deux types de chaux [9]:

- **Les chaux aériennes (CL : Calcic lime)**

La prise s'effectue seulement en présence du gaz carbonique de l'air (d'où la lenteur de la prise et la possibilité de conservation de grandes quantités de chaux éteinte). Les chaux aériennes se distinguent elles-mêmes en :

- **Chaux grasse** : qui est du calcaire pur, ou contient 0.1 à 1 % d'argile.
- **Chaux maigre** : qui contient 2 à 8 % d'argile.

- **Les chaux hydrauliques (NHL : Natural Hydraulic lime)**

Elles prennent sans l'aide du CO₂ de l'air. Un mortier fait avec de telles chaux peut durcir sous l'eau. Elles sont obtenues avec des calcaires contenant entre 8 et 20 % d'argile.

On note que les chaux hydrauliques naturelles sont calcinées comme les chaux aériennes aux mêmes conditions. Elles se distinguent principalement par leur résistance à la compression mesurée après 28j de vieillissements donnée ci-dessous :

- **Chaux faiblement hydraulique (NHL 2)** : correspond à une résistance comprise entre 2 et 5 MPa.
- **Chaux moyennement hydraulique (NHL 3.5)** : correspond à une résistance comprise entre 3.5 et 10 MPa.
- **Chaux fortement hydraulique (NHL 5)** : correspond à une résistance comprise entre 5 et 15 MPa.

I.4 Aperçu technique sur les mortiers

I.4.1 Les mortiers romains

Davitovis [11] a cité dans ses travaux les différentes compositions des mortiers décrites par **Vitruve**. Quand la chaux sera éteinte, il faudra la mêler avec du sable dans des proportions bien définies : Soit trois parties de sable de cave, soit deux parties de sable de rivière ou de mer, contre une part de chaux. Telle est, en effet, la proportion optimale du mélange chaux/sable, qui pourra encore être améliorée si on ajoute au sable de mer ou de rivière une troisième part de tuileaux pilés et tamisés. Il s'agit ici de la première mention de l'usage de la testa (qui est une argile kaolinite ayant la forme d'une tuile et cuite entre 700 et 800 °C).

Davitovis [11] a aussi parlé de pouzzolane, cette admirable poudre volcanique qu'on ajoute au mortier pour le faire durcir sans le CO₂ de l'air. Le liant à base de pouzzolane (une part de chaux et deux parts de poudre) était employé pour la maçonnerie des installations portuaires. Celle-ci commença à être employée au XIX^{ème} siècle au détriment des chaux aériennes. Le tableau I.2 résume quelques compositions des mortiers romains.

La réaction chimique de la testa avec la chaux se traduit par :



Les meilleures résistances des mortiers sont obtenues pour des mélanges dans lequel le rapport (**argile calcinée/chaux**) est supérieur à 1. Le tableau I.3 donne à titre comparatif l'influence du rapport **argile calcinée/chaux** sur la résistance à la compression à 28 jours.

Tableau I.2 Quelques recettes des mortiers romains [11]

Chaux	agrégats	eau
1 part de chaux	3 parts de sable de carrière	15 à 20 %
1 part de chaux	2 parts de sable fluvial ou marin	15 à 20 %
1 part de chaux	2 parts de sable fluvial ou marin 1 part de testa broyée	15 à 20 %
1 part de chaux	2 parts de pouzzolane	15 à 20 %

Tableau I.3 Résistance à la compression de deux formulations romaines [11]

Composition	Rc [MPa]
1 partie d'argile calcinée (testa) 1 partie de chaux (rapport=1)	10
2 parties d'argile calcinée (testa) 1 partie de chaux (rapport=2)	14.5

I.4.2 Les mortiers de chaux

Le mortier de chaux est un matériau composé principalement du liant (chaux) du sable et de l'eau dans des proportions convenables afin de satisfaire aux divers besoins techniques et économiques. Le cycle représenté par la figure I.5, résume les différentes étapes de préparation du mortier de chaux de l'étape de calcination de la roche silico-calcaire jusqu'au processus de durcissement par hydratation et formation des C-S-H puis par carbonatation de la chaux libre.

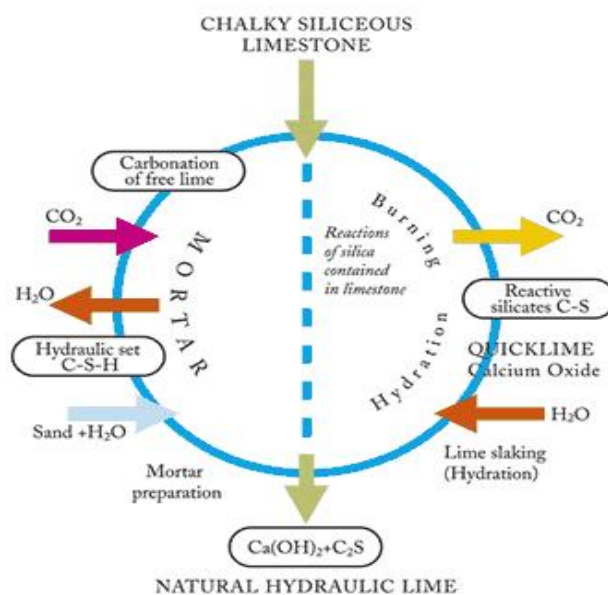
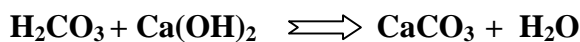


Figure. I.5. Schéma de préparation de la chaux et du mortier de chaux [10]

I.4.3 Processus de durcissement des mortiers de chaux

* La prise aérienne (réaction de carbonatation)

Quand un matériau à base de liant hydraulique est exposé à l'air, le dioxyde de carbone (CO_2) présent en moyenne de 0.035% en volume dans l'air, réagit en présence d'eau avec la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former du carbonate de calcium ou calcite (CaCO_3) comme produit final [12].



Le mécanisme réactionnel est cependant relativement complexe. La carbonisation est une réaction qui a lieu en milieu aqueux, par réaction du dioxyde de carbone dissous dans la solution contenue dans les pores avec la Portlandite. En fonction du pH de la solution, le dioxyde de carbone peut se trouver sous des formes différentes comme le montre la figure I.6.

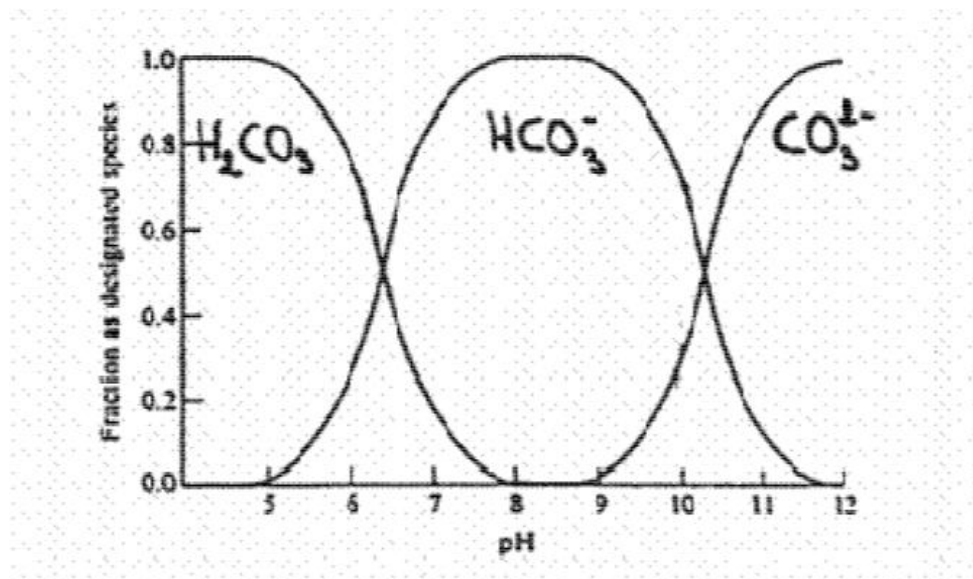
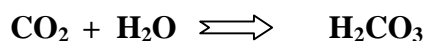
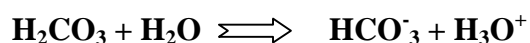


Figure I.6. Formes sous lesquelles le dioxyde de carbone est dissous d'après Valsaraj [13]

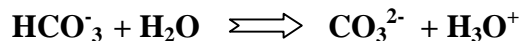
Dans les solutions dont le pH est inférieur à 4 il forme de l'acide carbonique :



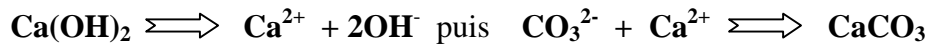
Si le pH de la solution est compris entre 6 et 10.5 la forme principale obtenue par dissociation est l'ion bicarbonate:



Si le pH de la solution est supérieur à 10.5 l'espèce majoritaire en solution est l'ion carbonate :



Dans les conditions où le pH des solutions des pores de matériaux à base de liant hydraulique est supérieur à 12, les ions carbonates agissent avec le calcium issu de la dissolution de la Portlandite pour former du carbonate de calcium précipité.



* La prise hydraulique

Cette prise est évaluée selon le taux d'argile contenu dans la roche mère ; si la pierre de la carrière contient de l'argile, la cuisson va combiner la chaux avec la silice et l'alumine de l'argile pour former des silicates et aluminates de chaux. Les chaux hydrauliques conservent une part de chaux aérienne. La prise aérienne d'une chaux hydraulique représente environ 30% de sa prise.

* la prise pouzzolanique

La prise pouzzolanique est l'aptitude de certains matériaux dépourvus de propriétés hydrauliques propres, à fixer l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour donner des hydrates analogues de ceux du ciment portland. Cette propriété se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice libre non quartzeuse, quelque soit leur origine : matériaux naturels (gaize, diatomite, cendre volcanique) matériaux artificiels (cendre volante, fumée de silice, argile calcinée, cendre de riz). L'action pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts [14 à 20].

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.
- La rapidité de fixation d'hydroxyde de calcium par la pouzzolane.

I.5 La chaux et le ciment - Les différences

La chaux est un liant minéral naturel extrait de roche sédimentaire utilisable après cuisson dont le durcissement est obtenu exclusivement avec l'air.

Le ciment est un liant minéral artificiel utilisable après plusieurs cuissons et qui est constitué de plusieurs composants dont la prise est obtenue avec l'eau.

I.5.1 Comportement simultané des mortiers mixtes chaux-ciment

La figure I.7 indique toute la série de propriétés des mortiers de ciment et de chaux cités dans la norme [AGNOR A179]. Dans le cas extrême, le mortier contenant uniquement du ciment est celui qui possède une forte résistance à la compression et un faible pouvoir de rétention d'eau. Un mur construit avec ce mortier est très solide mais peut permettre à la pluie de s'infiltrer. A l'autre extrême, le mortier de chaux a une faible résistance mécanique à la compression et un fort pouvoir de rétention d'eau. Un mur construit avec ce mortier aura une résistance mécanique inférieure, en particulier la résistance initiale, mais il devrait avoir une meilleure résistance à la pénétration de la pluie. Entre ces deux extrêmes, il existe diverses combinaisons de ciment et chaux capable de donner au mortier toute une gamme de propriétés intéressantes dues aux avantages de chaque liant, c'est-à-dire une forte résistance mécanique et une prise rapide (ciment) modifiées par une ouvrabilité et un pouvoir de rétention d'eau excellent (chaux). Le concepteur qui sait exactement quelles qualités il veut obtenir ne devrait pas avoir de difficultés à trouver quel mortier il lui faut en se référant à la Figure I.7. Le point d'intersection des 2 courbes, qui indique le mortier possédant la plus forte résistance mécanique compatible avec un pouvoir de rétention d'eau optimal, se trouve dans les limites d'un mortier de type N. Ceci explique l'utilisation fréquente du mortier de ciment et de chaux. 1 : 1 : 6. [21].

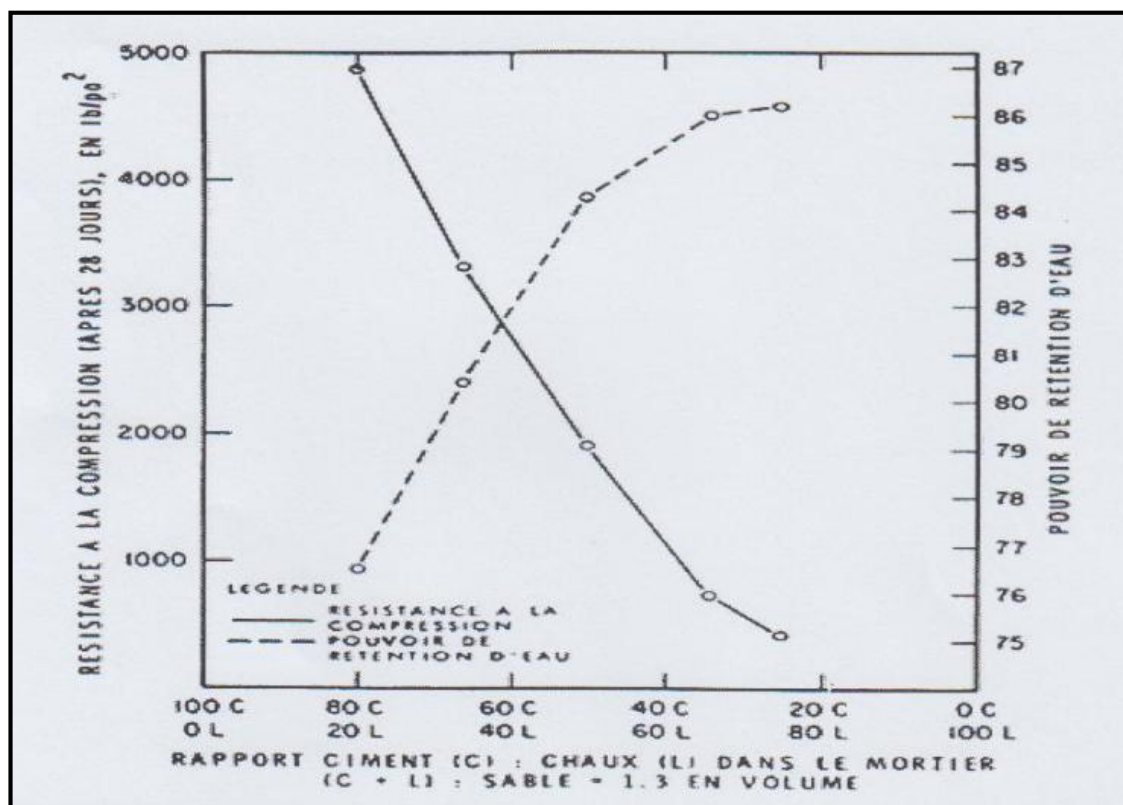


Figure I.7 Relation entre la composition du mortier de chaux, la résistance à la compression et le pouvoir de rétention d'eau selon la norme [ACNOR A179]. [21]

I.5.2 Avantages du mortier de ciment et de chaux

La chaux est un élément important des mortiers depuis plus de 2000 ans. Les caractéristiques de la chaux éteinte confèrent des avantages uniques pour les applications de maçonnerie, ce qui permet aux mortiers de ciment et de chaux de se distinguer des autres mortiers de maçonnerie. Parmi les principaux avantages on trouve [22]:

I.5.1.1 Résistance d'adhérence en flexion

Les mortiers de ciment et les mortiers de chaux éteinte ont démontré des niveaux élevés de résistance d'adhérence en flexion. En plus de la résistance d'adhérence élevée, les mortiers de ciment et de chaux présentent les caractéristiques suivantes:

A) Résistance à la traction de l'adhérence

Il s'agit de la résistance du mortier qui retient les éléments de maçonnerie ensemble. Une résistance élevée à la traction de l'adhérence est obtenue grâce aux caractéristiques de mortier suivantes:

- La chaux fournit une rétention d'eau élevée qui permet un séchage initial maximal des matériaux cimentaires.
- L'écoulement initial élevé permet une couverture complète et aisée des éléments de maçonnerie.
- La faible teneur en air du mortier de ciment et de chaux augmente la résistance d'adhérence.

B) Portée d'adhérence

La portée d'adhérence est le pourcentage de briques auquel le mortier adhère. La faible teneur en air de même que la finesse et l'adhérence des particules de chaux éteinte augmentent la portée d'adhérence du mortier à la brique. Ces facteurs permettent aux mortiers de ciment et de chaux de pénétrer en profondeur dans la brique et de sceller la jonction brique/mortier.

C) Durabilité de l'adhérence

Plusieurs études ont démontré que la résistance d'adhérence des mortiers de ciment est supérieure à celle des mortiers de chaux.

I.5.1.2 Fuite d'eau

Les mortiers de ciment et de chaux peuvent être utilisés pour minimiser le potentiel de pénétration d'eau dans les murs de maçonnerie:

A) Portée d'adhérence - La faible teneur en air, la taille fine des particules, la plasticité élevée et la rétention d'eau contribuent à l'excellente portée d'adhérence des mortiers de ciment et de chaux. Ceci élimine les accès faciles pour la pénétration d'eau.

B) Ressoudage spontané - Lorsque des fissures fines se forment dans le mortier, la chaux éteinte réagit avec le dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cette réaction produit du calcaire qui aide à sceller les fissures et combler les vides dans le mortier. Ceci explique la plus grande résistance à l'humidité constatée après six mois de cure dans le cadre de deux études.

I.5.1.3 Durabilité

Les constructions de maçonnerie constituent un système durable demandant peu d'entretien.

L'utilisation de la chaux dans le mortier contribue à la durabilité de ce système. La durabilité des mortiers de chaux se traduit de la façon suivante:

A) Élasticité

Des recherches ont démontré que les mortiers à teneur élevée en chaux durcissent lentement et demeurent élastiques ou flexibles. Ainsi, la chaux rehausse la capacité de l'assemblage à soutenir le stress causé par les mouvements des bâtiments et les variations cycliques sans se fissurer excessivement.

B) Ressoudage spontané - Lorsque des fissures fines se forment dans le mortier, la chaux éteinte réagit avec le dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cette réaction produit du calcaire qui aide à sceller les fissures.

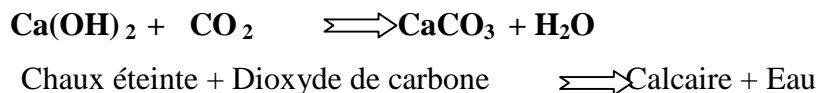
C) Rendement éprouvé - Avant le début des années 1930, tous les bâtiments de maçonnerie étaient construits avec de la chaux ou un mélange de ciment et de chaux. Le ciment Portland n'était pas produit aux États-Unis avant 1871. Avant cette date, la chaux constituait le principal ingrédient de tous les mortiers. La durabilité de ces structures témoigne de l'excellente durabilité des mortiers de chaux.

I.5.1.4 Résistance à la compression

La norme ASTM C270 [6] stipule que les mortiers doivent être identifiés selon leurs proportions ou leurs propriétés. Les mortiers de ciment et de chaux mélangés selon la spécification de proportion ont généralement une résistance à la compression suffisante pour satisfaire à la spécification de propriété supérieure suivante C270 [6]. L'identification des mélanges de mortiers de ciment et de chaux par proportion fournit une marge de sécurité quant à la résistance à la compression. Lorsqu'une résistance élevée à la compression n'est pas désirée, on peut augmenter la teneur en chaux et utiliser la spécification de propriété. Dans tous les cas, les niveaux de résistance à la compression des mortiers de ciment et de chaux sont ajustables et prévisibles. La chaux éteinte améliore la résistance du mortier de plusieurs façons :

A) Carbonatation

La chaux éteinte réagit avec le dioxyde de carbone dans l'atmosphère pour former du calcaire.



B) Réactions cimentaires

L'effet pouzzolanique peut se produire entre la chaux éteinte et les composés de silice contenus dans le mélange de mortier.

C) pH

La chaux éteinte aide à conserver des niveaux élevés de pH dans le mélange de mortier. Ceci a pour effet de rendre les matières siliceuses plus solubles et plus réactives.

I.5.1.5 Uniformité

Sur le terrain, les mortiers de ciment et de chaux offrent des caractéristiques de rendement uniformes. La norme ASTM C270 [6] fournit les proportions recommandées pour les mortiers de ciment et de chaux. Cette spécification stipule également que les produits de chaux éteinte doivent satisfaire aux critères de la norme ASTM C207 [8], que le ciment portland doit satisfaire à la norme ASTM C150 [23], et les deux normes ASTM C207 [8] et ASTM C150 [23] que la composition chimique doit être spécifiée ainsi que les qualités physiques du produit. La chimie de chaque mélange de mortier de ciment et de chaux est définie et comporte un pourcentage élevé de matières cimentaires (> 95 %).

Comme la chimie est bien définie, les caractéristiques de rendement telles que la résistance à la compression et la résistance d'adhérence en flexion sont prévisibles à des niveaux de proportions donnés. Des limites plus serrées de la teneur en air contribuent également à minimiser la variation entre les mélanges. Des mortiers de ciment et de chaux mélangés au préalable sont aussi disponibles dans la plupart des marchés en sacs de (29,48-34,02) Kg, en vrac, en sacs semi vrac ou en systèmes de silos.

L6 Quelques travaux de recherche sur les mortiers de chaux

*** Influence du mode de malaxage et de cure sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers de chaux**

FERNANDO.M.A. HENRIQUES et A.E CHAROLA [24] ont étudié l'influence du mode de malaxage et de cure sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers de chaux avec et sans ajout pouzzolanique. Deux types de composition de mortier ont été préparés l'une par une chaux hydratée pure (aérienne) et l'autre par le même type de chaux mais adjuvantée par la pouzzolane.

- La première composition : (1/4) chaux / sable
- La seconde composition : (1/1/4) chaux / pouzzolane / sable

On soumet les deux compositions à deux modes de malaxage selon les normes: **BS 4551[25]** et **EN196-1 [26]** et à deux types de conservations selon les normes : **BS 4551** et **CSTB [27,28]** conformément aux tableaux (1.4) et (1.5)

Tableau I.4 Mode de préparation selon les normes **BS4551** et **EN196-1 [24]**

BS4551	EN196-1
-Mélanger à sec pendant 10 mn	- Mélanger la chaux et l'eau 30 s à vitesse 1
- Mélanger en versant de l'eau pendant 30 s	- Mélanger avec le sable 30 s à vitesse 1
- Mélanger le tout pendant 60s	- Mélanger le tout 30 s à vitesse 2
- Arrêt du malaxage pendant 10mn	- Arrêt du malaxage pendant 1 mn , 30 s
- Redémarrage du malaxage pendant 60 s	- Redémarrage du malaxage pendant 60 s

Tableau I.5 Mode de conservation selon **BS4551** et **EN196-1** [24]

BS4551	EN196-1
- Placer les modules dans les sachets plastiques à 20° durant 1 à 3 jours - On les déplace dans une chambre saturée à 20° C	- à 20° C et 50% d'humidité relative

Chaque éprouvette est identifiée par deux lettres, la première indique le mode de préparation et la seconde indique le mode de conservation selon les normes indiquées ci-dessus :

BB : chaux-sable-pouzzolane, préparé selon BS et conservé selon BS

bb : chaux-sable, préparé et conservé selon les mêmes normes

BC : chaux-sable-pouzzolane, préparé selon BS et conservé selon CSTB

bc : chaux-sable, préparé et conservé selon les mêmes normes

EB : chaux-sable-pouzzolane, préparé selon EN et conservé selon BS

eb : chaux-sable, préparé et conservé selon les mêmes normes

EC : chaux-sable-pouzzolane, préparé selon EN et conservé selon CSTB

ec : chaux-sable, préparé et conservé selon les mêmes normes

Les modes de préparation et de conservation jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des mortiers de chaux avec pouzzolane. Cela est dû à l'adjonction de la chaux aérienne avec le matériau pouzzolanique. D'après la figure 1.8, les propriétés mécaniques sont meilleures pour le mode de malaxage et de conservation établis selon la norme britannique. Le test d'absorption par capillarité a été réalisé selon les 2 modes **RILEM II.6** [29] et **NORMAL 11/85** [30] (fig. 1.8).

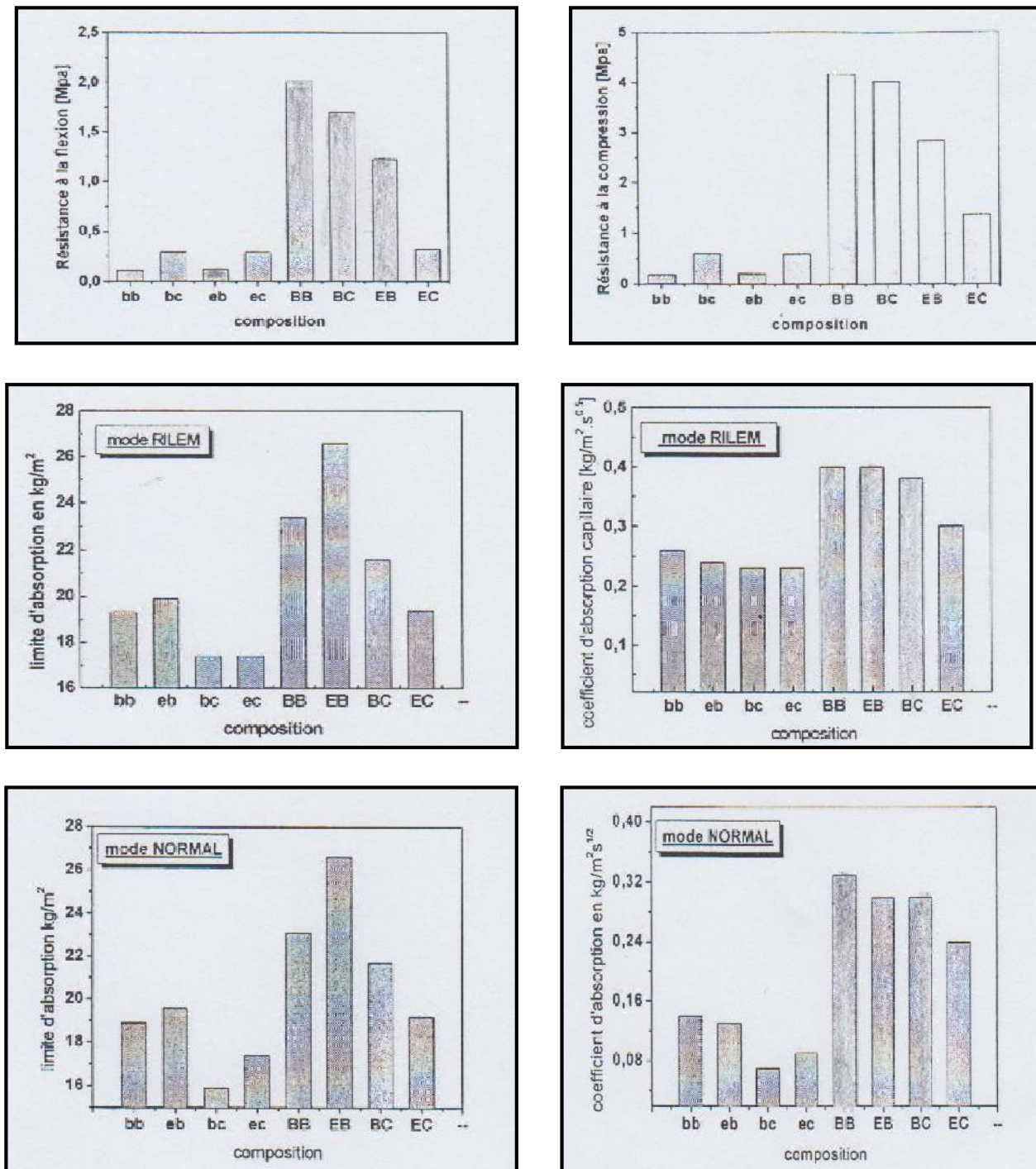


Figure 1.8 Histogrammes des propriétés mécaniques et d'absorption capillaire [24]

Ces 2 normes se différencient par leur mode de pose des éprouvettes, la première consiste à immerger 2mm le fond de l'échantillon tout en imperméabilisant les facettes latérales contre les infiltrations d'eau. La deuxième méthode est identique à la première, sauf que l'éprouvette est posé sur un papier filtre saturé d'eau, les résultats de cet essai sont regroupés dans la figure 1.8.

On remarque que les mortiers avec pouzzolane présentent des coefficients d'absorption et des taux d'absorption plus élevés que ceux dépourvus de pouzzolane, cela est du à la création d'une

microstructure interconnectée, autrement dit, d'un réseau poreux continu qui favorise l'ascension capillaire.

*** Effet de la composition chimique de différents agrégats sur les propriétés physico mécaniques des mortiers de chaux**

Lanas, et al. [31] ont étudié l'influence de la composition chimique de différents agrégats sur les propriétés mécaniques des mortiers de chaux. Ces mortiers sont confectionnés avec une chaux (NHL5) dont la quantité initiale en argile pendant la calcination entre 1000° C et 1250°C est de 6.5 à 20% mélangée avec différents types d'agrégats (Ag1 ; Ag2 ; Ag3 ; Ag4) de granulométries et compositions chimiques différentes (silico-calcaire et calcaire). Les mortiers sont confectionnés avec tous les types d'agrégat avec des rapports (1:1,1:2,1:3,1:4,1:5) en gardant à chaque fois une consistance comparable pour tous les mélanges. Les agrégats utilisés diffèrent aussi de leur nature. En effet, les agrégats (Ag1; Ag2) proviennent des roches silico-calcaires alors que (Ag3 ; Ag4) proviennent des roches calcaires. D'après les résultats présentés dans les figures I.9 et I.10, la plus grande résistance à la compression est enregistrée avec les agrégats (Ag3;Ag4) cela est du effectivement à leur nature qui est chimiquement semblable à la chaux, celle-ci permet d'assurer une bonne liaison inter-faciale liant/agrégat.

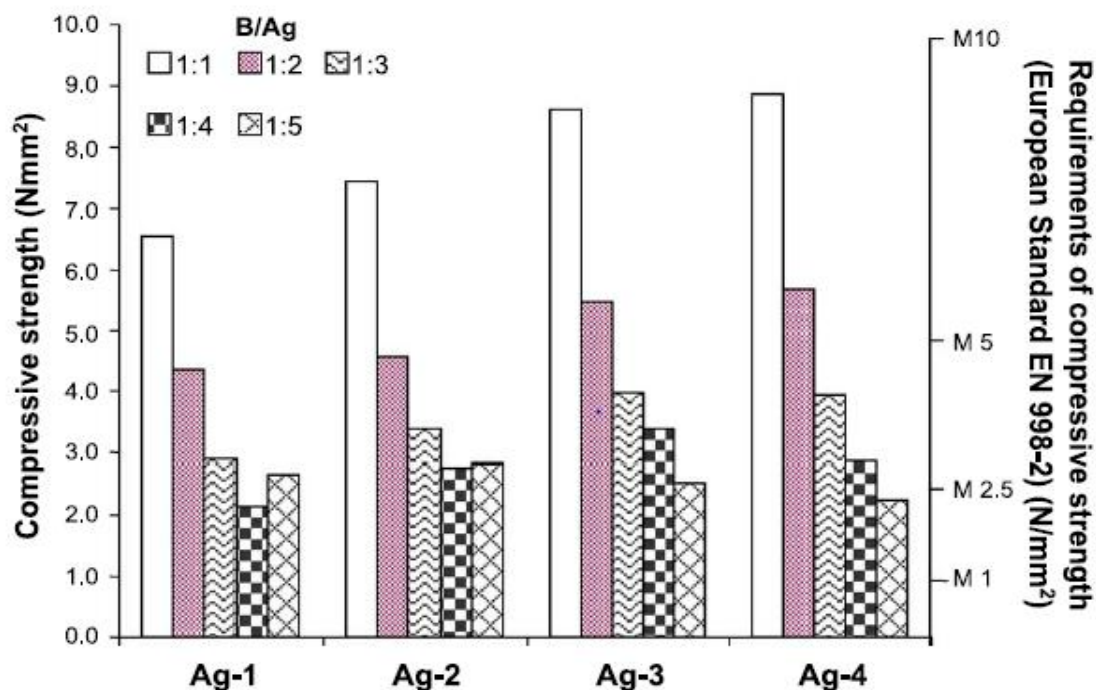


Figure I.9 Evaluation des propriétés mécaniques des différentes compositions (à 28j) [31]

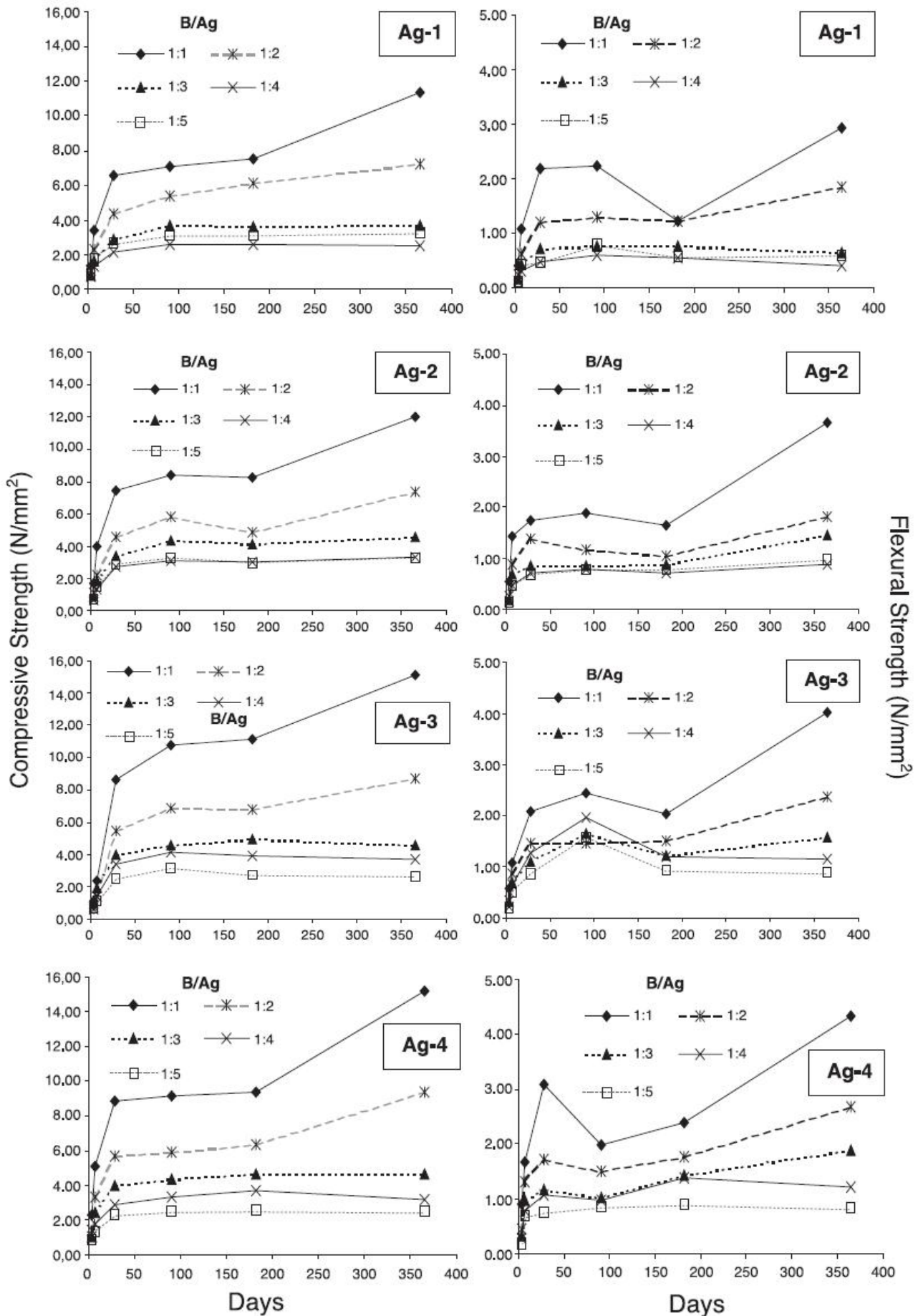
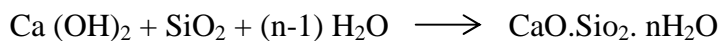


Figure I.10 Evaluation des propriétés mécaniques des différentes compositions des mortiers de chaux[31]

I.7 les produits à base de chaux

I.7.1 Les briques silico-calcaires

Une chaux aérienne et un sable de quartz servent de matériaux d'origine pour la confection des briques silico-calcaires. La chaux utilisée est une chaux hydratée vive, broyée, partiellement ou totalement inerte et n'entre pas en réaction chimique avec la chaux. Dans une ambiance normale, les mortiers de chaux n'acquièrent leur résistance que par le durcissement de la chaux en particulier. Mais, en autoclave ($T = 170^{\circ} C$, $P = 11$ bars et $HR=100\%$), la silice du sable devient chimiquement active et commence à réagir rapidement avec la chaux suivant la réaction suivante [32]:



Les briques silico-calcaire de Boussaâda par exemple, sont formées d'un mélange en proportion convenable de sable siliceux et de chaux aérienne vive. Le sable est déversé en tas et repris par des bandes transporteuses qui l'amènent dans des tamiers d'attente. D'autres matériaux peuvent remplacer totalement ou partiellement le sable, à savoir le laitier de haut fourneau, cendres volantes, schistes ... De la chaux vive CaO lui ajoutée à raison de 5 à 12% en poids à l'aide de balances doseuses pondérales. Le mélange chaux vive et sable est déversé dans un premier mélangeur : on y ajoute une certaine quantité d'eau ainsi que les colorants (à l'aide de pigments minéraux. Si les produits sont teints). Après cette première homogénéité, le mélange est envoyé dans des silos tracteurs dans « des réacteurs » où il séjourne de 2 à 4 heures. Ce temps est nécessaire pour que la chaux vive (CaO) puisse s'éteindre et donner de la chaux hydratée $Ca(OH)_2$, la matière homogène de consistance sèche est déversée dans des moules où elle est fortement comprimée par des presses puissantes capables de la compacter ou de la vibro-comprimer sous des pressions de 150 à 500 Kg/cm^2 . La consistance du matériau est faite qu'il peut être immédiatement démonté. Les produits « grus » sont empilés sur chariots puis enfermés dans des autoclaves pouvant atteindre 2 à 3 m diamètre et de 10 à 30 m de long. Le traitement s'effectue sous des pressions variables de 10 à 15 atmosphères et dure de 4 à 8 heures dont 1 heure pour la montée en température et 1 heure pour la descente [33].

Tableau I.6 Propriétés physico mécaniques de la brique de Boussaâda

Principales caractéristiques	Nomes	Unités	Valeur Moyenne
-Résistance à l'écrasement	DIN 106	N/mm ²	15
-Poids	DIN 106	KG	2,4
-Dimensions	DIN 106	mm	240 – 115 – 50
-Masse volumique	DIN 106	Kg/m ³	1700
-Absorption par immersion Totale (48 h 00)	Méthodes Standards	%	14
-Isolation acoustique 100 – 315 HZ	Normes Belge	dB	38
400 - 3150 HZ			50
1600 - 3150 HZ			65
-Tenue au feu		Temps	2 h 30 mn
-Isolation thermique		/	Bonne
-Résistance au gel & dégel	Normes Belge	/	Bonne

I.7.2 Briques en Béton de chanvre

Les briques de chanvre sont composées de la chaux aérienne et de particules de chènevottes qui sont issues de la fragmentation de l'intérieur des tiges chanvre. La structure cellulaire et la composition de la chènevotte se rapprochent de celles de certains bois légers. La grande porosité des particules leur donne notamment des propriétés d'absorption et hygroscopiques particulières qui se répercutent sur les propriétés des bétons de chanvre. La chènevotte se présente sous la forme de petits copeaux de bois de chanvre d'une longueur 5 à 15 mm et d'une épaisseur inférieure à 1 mm. La masse volumique de la chènevotte en vrac est approximativement de 110 kg/m³, alors que celle des copeaux est d'environ 340 kg/m³ dans des conditions ambiantes de température et d'humidité. La chaux utilisée est une chaux éteinte ayant une teneur en hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ de 97.2 % .

La chènevotte possède aussi des propriétés thermiques intéressantes que l'on a cherché à exploiter en l'utilisant comme matériau de construction. On a donc cherché à l'associer à des liants minéraux afin d'obtenir ce que l'on a appelé le " béton de chanvre ".

L'isolation phonique est comparable à de nombreux systèmes traditionnels mais par contre l'isolation thermique n'est pas encore compétitive [34].

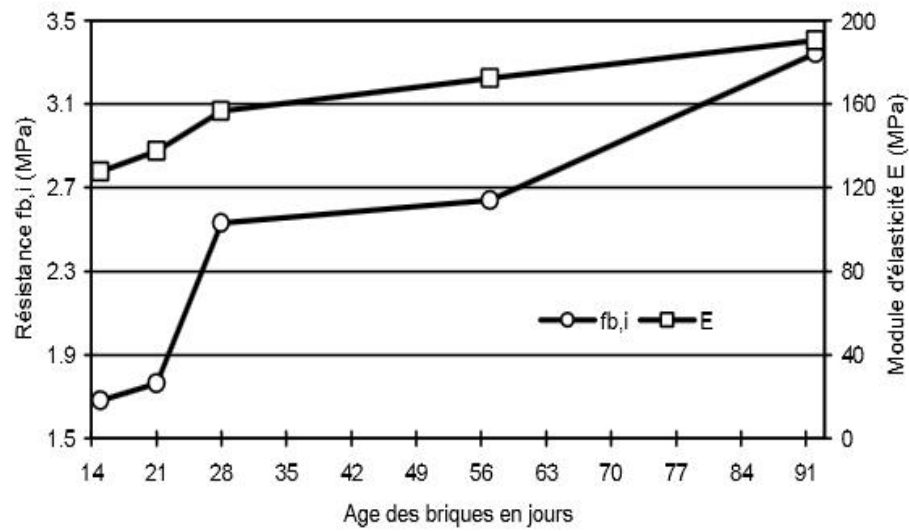


Figure I.11 Evaluation des caractéristiques mécaniques des briques de chanvre [34]

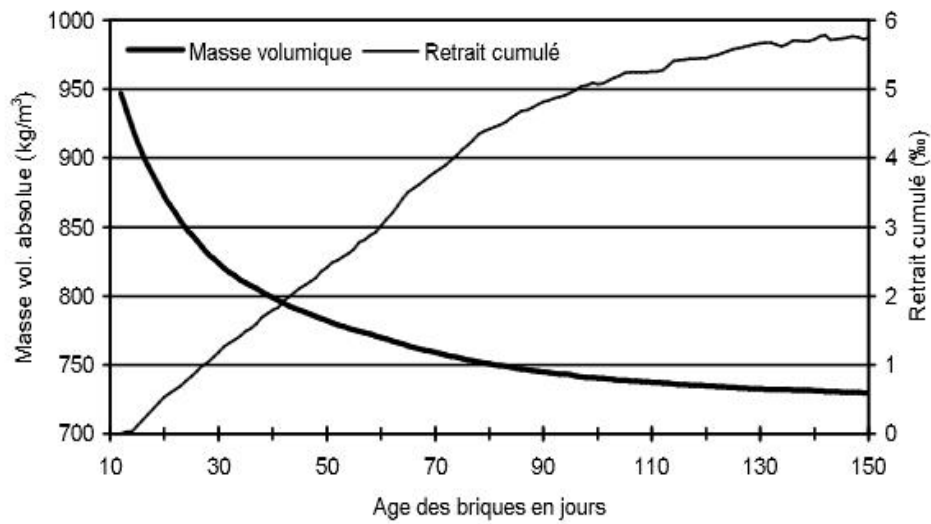


Figure I.12 Variation de la masse volumique absolue et de retrait des briques de chanvre [34]

I.8 Conclusion

On peut résumer ce chapitre dans les points suivants :

- Le mortier à chaux offre et laisse respirer les murs des bâtis anciens et nouveaux, en favorisant les échanges hygrométriques. Elle capte et rejette la vapeur d'eau, permettant d'éviter les remontées d'humidité. Une maison doit respirer C'est une qualité indispensable pour la rénovation des maçonneries anciennes, spécialement sensibles à l'eau, qui doivent avoir des murs perméables à la vapeur d'eau pour favoriser l'évacuation de l'humidité. Ainsi, l'utilisation de chaux assure le confort intérieur d'une habitation et permet par la même occasion de faire des économies d'énergie, le chauffage étant beaucoup plus performant lorsque les murs sont exempts d'humidité.
- Le mortier à chaux s'oppose à la pénétration des eaux de ruissellement.
- Le mortier à chaux a des vertus isolantes, aussi bien phoniques que thermiques
- Le mortier à chaux s'adapte très facilement aux différents supports. Il tolère les mouvements du bâti.
- Le mortier à chaux est Inhérent à toute construction, ancienne ou moderne, grâce à sa souplesse et à son élasticité, ce qui limite les fissures dans les enduits. Il est très résistant et vieillit très bien.
- Le mortier, et encore plus l'aérienne, résiste particulièrement bien au feu facile à retirer et à remplacer.
- C'est une qualité essentielle, en particulier en restauration du bâti ancien. Les mortiers à base de chaux respectent les matériaux (pierre, bois) et peuvent être retirés, à tout moment sans conséquence, pour les autres parties d'un ouvrage et remplacés par de nouveaux mortiers de chaux.
- Les possibilités offertes par la chaux sont nombreuses aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur.
- Associée à des pigments naturels, elle offre une palette de teins très diverse.

CHAPITRE II
CARACTERISATION DES
MATERIAUX ET METHODES
EXPERIMENTALES

II .CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1 Caractérisation des matériaux

II.1.1 Introduction

L'utilisation des mortiers et béton à base de chaux joue un rôle important dans l'étanchéité saharienne grâce à sa faible perméabilité aux eaux pluviales et aussi à sa faible conductivité thermique.

Pour cela l'étude de la durabilité et la perméabilité des mortiers et béton de chaux à base de sable de dune et alluvionnaire est très indispensable.

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques physiques et chimiques de chaque matériau de base utilisé dans notre étude tel que, la chaux, le sable alluvionnaire et le sable de dune. Nous présenteront également le mode de fabrication des éprouvettes des mortiers étudiés, la préparation des échantillons, les milieux de conservation ainsi que les différents essais réalisés, le matériel utilisé, le mode opératoire et les paramètres de suivis.

II.1.2 Propriétés des matériaux

II.1.2.1 La chaux

La chaux joue le rôle d'un liant. Son constituant de base est le calcaire (carbonate de calcium CaCO_3) contenant plus ou moins d'impuretés (telles que : argiles, magnésie, aluminates, silicates, oxydes métalliques). Il existe différentes sortes de calcaire dans la nature. Suivant la composition du calcaire, on obtient différentes sortes de chaux :

- la chaux aérienne : provenant d'un calcaire pur ;
- la chaux hydraulique : provenant d'un calcaire argileux ;
- la chaux magnésienne : provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium.

Ce calcaire est calciné pour donner de la chaux vive. La chaux vive est inutilisée telle qu'elle est en tant que liant. On lui fait subir une réaction d'extinction pour obtenir de la chaux éteinte.

La chaux utilisée durant notre étude est celle de la région de Saïda ; c'est une chaux éteinte présentant une faible concentration en éléments oxyde comme les silicates SiO_2 , et aluminates Al_2O_3 et une forte concentration en élément 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 le tableau II.1.

Tableau. II.1. Gamme de certaines caractéristiques de différent type de chaux.

Matériaux	Masse volumique absolue (gr/cm ³)	Masse volumique apparente (gr/cm ³)	Surface spécifique (cm ² /g)
Chaux vive CaO	3.2-3.4	0.8-1	Très variable
Chaux éteinte	2.2-2.4	0.5-0.65	8000-12000
Chaux hydraulique	2.6-2.9	0.6-0.80	5000-8000

A) Analyse chimique et minéralogique de la chaux

L'analyse chimique réalisée au laboratoire de l'unité de fabrication de la chaux de Saïda a donné les résultats récapitulés dans le tableau II.2.

Tableau II.2: Composition chimiques de la chaux de Saïda [sac].

Composition chimique	Chaux broyée (%)	Chaux hydratée (%)
Humidité	<5	
CaO	> 83.3	67.4 – 73.25
MgO	< 0.5	< 0.4
Fe ₂ O ₃	< 2	< 2
Al ₂ O ₃	< 1.5	< 1
SiO ₂	< 2.5	< 2.2
SO ₃	< 0.5	<1
K ₂ O + NaO	0.47 à 0.5	< 0.4
CO ₂	< 5	< 5
CaCO ₃	< 10	< 10
Ca(OH) ₂		< 80
Constante volumique	Bonne	Bonne
Insoluble	< 1	< 0.35

L'analyse minéralogique du chaux par diffractométrie aux rayons x est réalisée au niveau de laboratoire université de Laghouat est présentée par la figure II.1.

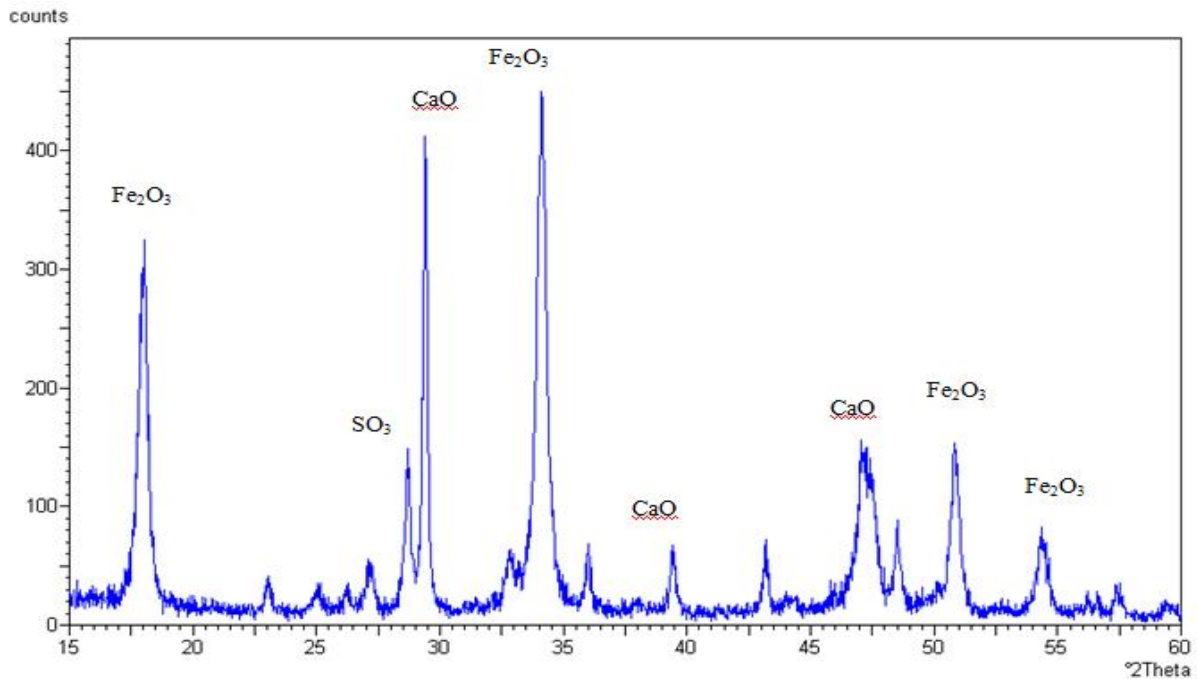


Figure II.1 Diffractogramme de la chaux de Saïda

B) Caractéristiques physique de la chaux

b₁) Masse volumique apparente NF P18-558[35]

C'est le rapport de la masse de l'échantillon sur son volume total apparent.

$$\chi_{app} = \frac{m}{V} \quad (II - 1)$$

Où m : masse de la chaux.
 V : volume apparent de la chaux.

Masse volumique apparente $\chi_{app} = 0.521\text{g/cm}^3$

b₂) Masse volumique absolue NF P18-558[35]

La masse volumique absolue de la chaux est mesurée au moyen du densimètre Le Chatelier (Figure II.2).

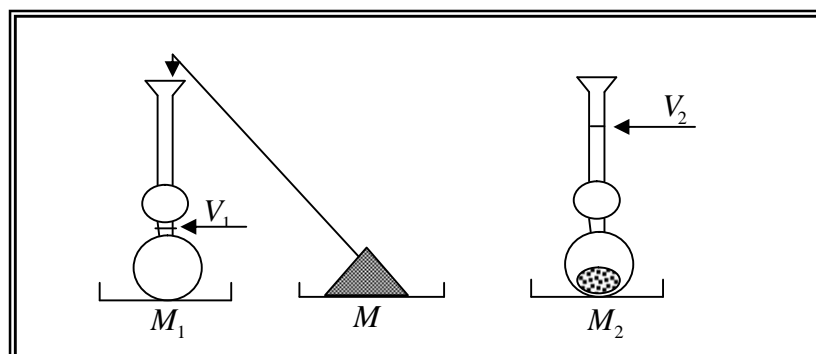


Figure II.2 Dispositif Le chatelier.

$$_{\text{abs}} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (\text{II} - 2)$$

Où :

M_1 : masse de (cellule + benzène),

M_2 : masse de (cellule + benzène + chaux),

V_1 : le volume initial du benzène.

V_2 : le volume final de benzène.

$$\text{Masse volumique absolue}_{\text{abs}} = 2.43 \text{ g/cm}^3$$

b₃) Surface spécifique Blaine EN 196-3[36]

Il s'agit de faire passer un volume connu d'air à travers une poudre de chaux. Plus la surface spécifique de la poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées, la surface spécifique est proportionnelle à $t^{1/2}$. L'appareil utilisé dans cet essai est appelé 'appareil Blaine'. Il est le même que celui utilisé pour le ciment.

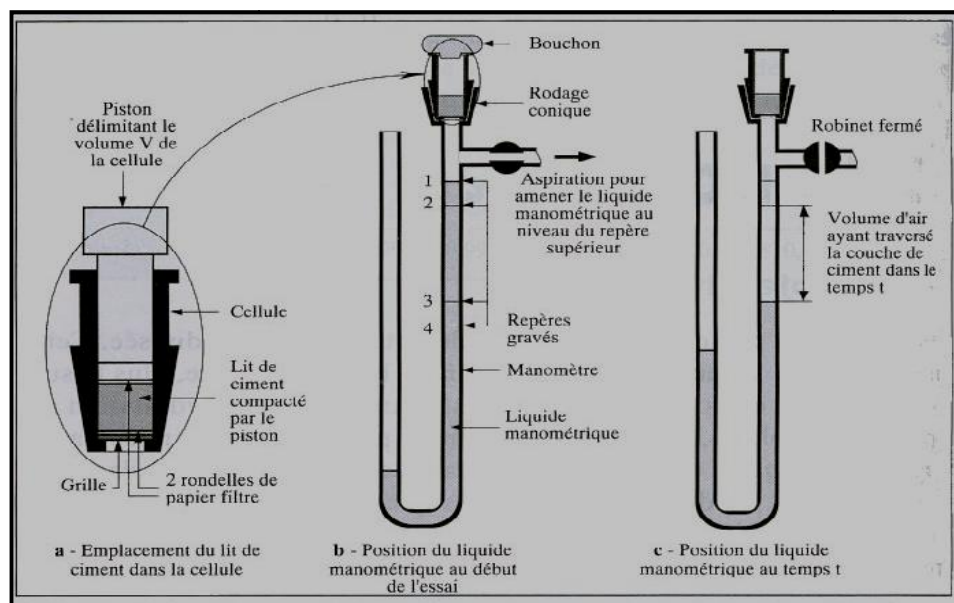


Figure II.3 Dispositif expérimental du perméabilimètre Blaine

La surface spécifique est calculée à l'aide de l'expression :

$$Sp = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{x_{abs} (1-e) \sqrt{y}} \quad (II - 3)$$

où :

Sp: surface spécifique (cm²/g).

k : constante de l'appareil.

e : porosité de la couche tassée.

t : temps mesuré en secondes.

x_{abs} : masse volumique des grains (g/cm³).

y : Viscosité de l'air à la température de l'essai (poises).

La surface spécifique de la chaux utilisée est de **11053 cm²/g**.

b4) Essai de prise

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'appareil de **VICAT**, selon la norme **EN 196-3 [33]**.

- Début de prise :

Il intervient dans un certain temps après malaxage de la pâte composée de chaux et d'eau ; il correspond à une augmentation brusque de la viscosité.

- Fin de prise :

C'est la durée pour laquelle la pâte se transforme en un bloc rigide, non modelable. L'essai est effectué à l'air ambiant (T= 22°C ± 5°C).

La vitesse de prise augmente avec l'augmentation de la finesse de mouture du liant.

La vitesse de prise est d'autant plus faible que la quantité d'eau de gâchage est élevée.

L'accroissement de la température accélère la prise.

Tableau II.3 Début et fin de prise de la chaux.

Début de prise	1 jour
Fin de prise	3 jours

II.1.2.2 Sable

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier, il est inerte et sert à accroître la compacité du béton.

Les sables en Algérie sont choisis pour des raisons de coût et de disponibilité, et il est bien connu que certains type de sables ne sont pas conformes aux exigences granulométriques puisqu'ils contiennent en général trop ou très peu d'éléments fins.

Les nombreuses utilisations du sable exigent de ce matériau qu'il soit d'une qualité fiable en fonction des destinations qui lui sont affectées [37].

Pour notre étude on a utilisé 2 types de sables : l'un est alluvionnaire d'oued M'zi (LAGHOUAT) de classe granulaire 0/5 mm, et le second est dunaire de la région nord de la ville de Laghouat de classe granulaire 0/0.63 mm.

A) Analyse par diffraction aux rayons X

- Sable dunaire

La composition minéralogique du sable est déterminée par l'analyse de diffraction des rayons X. le diffractogramme du sable utilisé montre qu'il est exclusivement composé du quartz SiO_2 avec quelques traces de calcium Ca, de Magnésium Mg et d'aluminium Al.

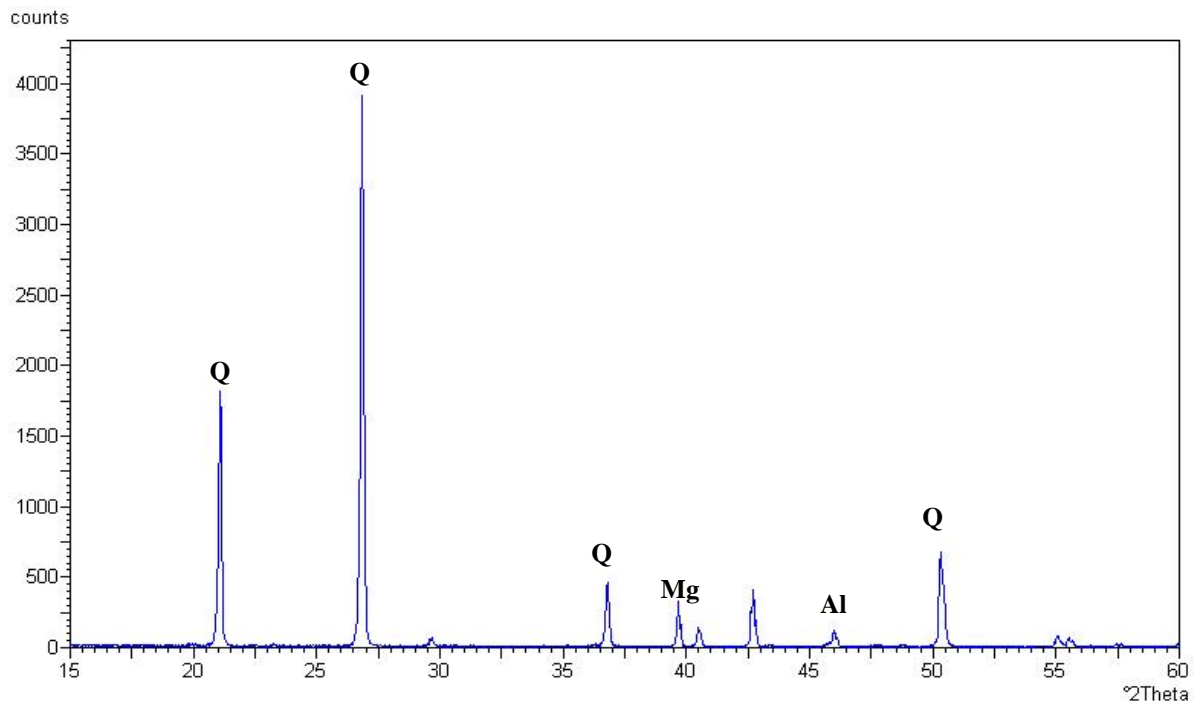


Figure II.4 Diffractogramme du sable dunaire de la zone de LAGHOUAT

- **Sable alluvionnaire**

Le sable d'Oued M'zi est un sable alluvionnaire siliceux, il contient une grande quantité de silicate SiO₂ (Quartz), et de petite quantité de calcite (Figure II.5).

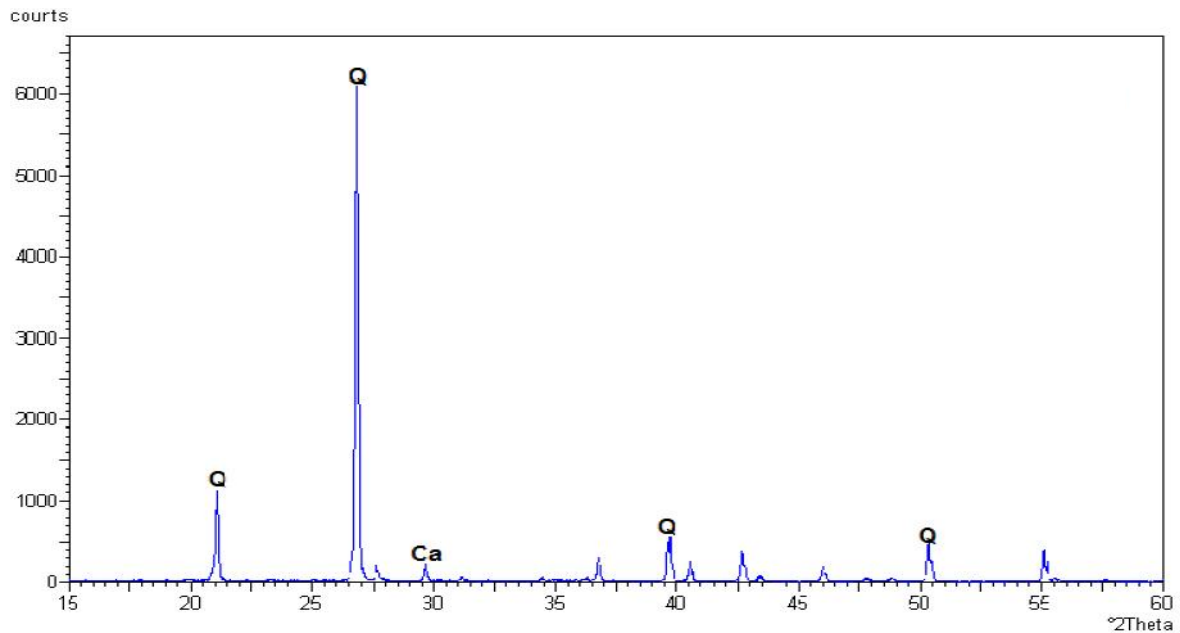


Figure. II.5 Diffractogramme du sable alluvionnaire de la zone de LAGHOUAT

B) Masses volumiques

➤ Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel. Elle est donnée selon la norme **NFP 18-555**[38].

$$\gamma_{\text{app}} = \frac{M_t - M_r}{V} \quad (\text{II} - 4)$$

Avec :

M_t : Masse totale (matériau avec le récipient).

M_r : Masse du récipient.

V : Volume du récipient.

La masse volumique d'un ensemble de grains est fortement influencée par la composition granulométrique, la forme des grains, le degré de tassement ainsi que la teneur en eau, lorsque les grains sont petits.

La masse volumique obtenue est de :

$$\begin{aligned} &= \mathbf{1.65 \text{ g/cm}^3} \text{ pour le sable alluvionnaire} \\ &= \mathbf{1.49 \text{ g/cm}^3} \text{ pour le sable dunaire} \end{aligned}$$

➤ Masse volumique absolue

La méthode utilisée est la méthode de l'éprouvette graduée. La masse volumique absolue est donnée d'après la norme **NFP 18-555** [38].

$$\gamma_{\text{abs}} = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \quad (\text{II} - 5)$$

M_s : Masse des grains solides.

V_1 : Volume de l'eau.

V_2 : Volume total (grains + eau).

La masse volumique absolue obtenue est de :

$$\rho_s = 1.73 \text{ g/cm}^3 \text{ pour le sable alluvionnaire}$$

$$\rho_s = 2.63 \text{ g/cm}^3 \text{ pour le sable dunaire}$$

C) Essai d'équivalent de sable

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution floculante, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H_2) et du sédiment + floculant (H_1) selon la norme **NF P 18-598**[39].

L'équivalent de sable est donné par la relation ci-dessous, il est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

$$ES = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \quad (\text{II-6})$$

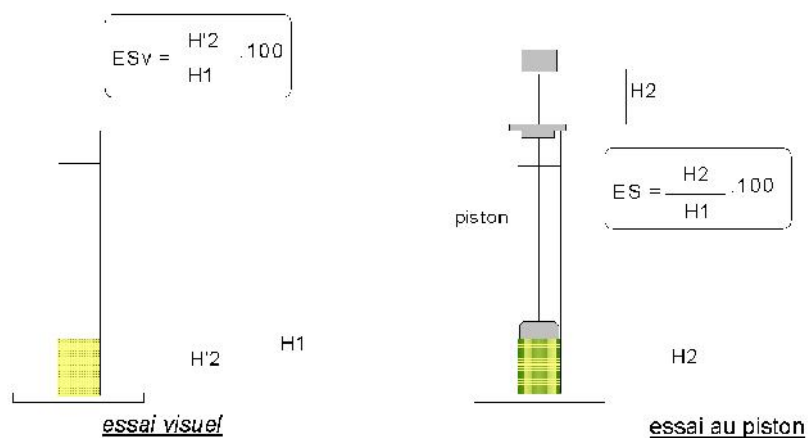


Figure II.6 Essai d'équivalent de sable

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau II.4: Valeurs de l'équivalent de sable de différents sables

Equivalent de sable	Sable de dune	Sable alluvionnaire
Esv	77.5	76
Esp	81	71

Esv : Equivalent de sable visuel.

Esp : Equivalent de sable avec piston.

Nous avons obtenu un équivalent de sable Esp = 71% pour le sable alluvionnaire et Esp = 77% pour le sable dunaire compris entre 70% et 80%, donc le sable employé est propre et il convient bien pour la composition de notre mortier.

D) Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus indispensables effectués pour un sable constituant un mortier.

C'est un essai qui est réalisé selon la norme NF EN 933-2 [40], et qui permet de déterminer les pourcentages en poids des grains ayant une dimension inférieure ou égale à un diamètre donné.

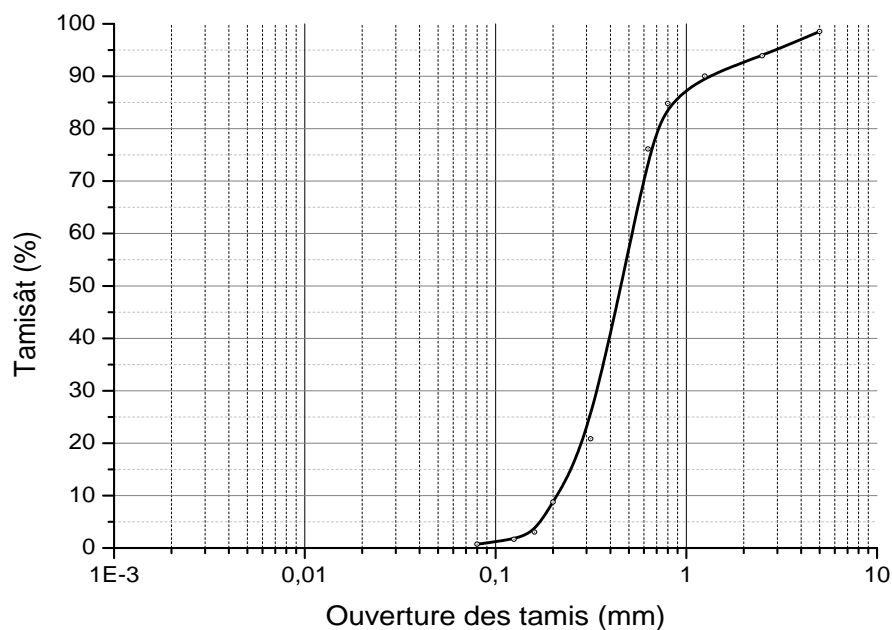


Figure II.7 Analyse granulométrique de sable alluvionnaire

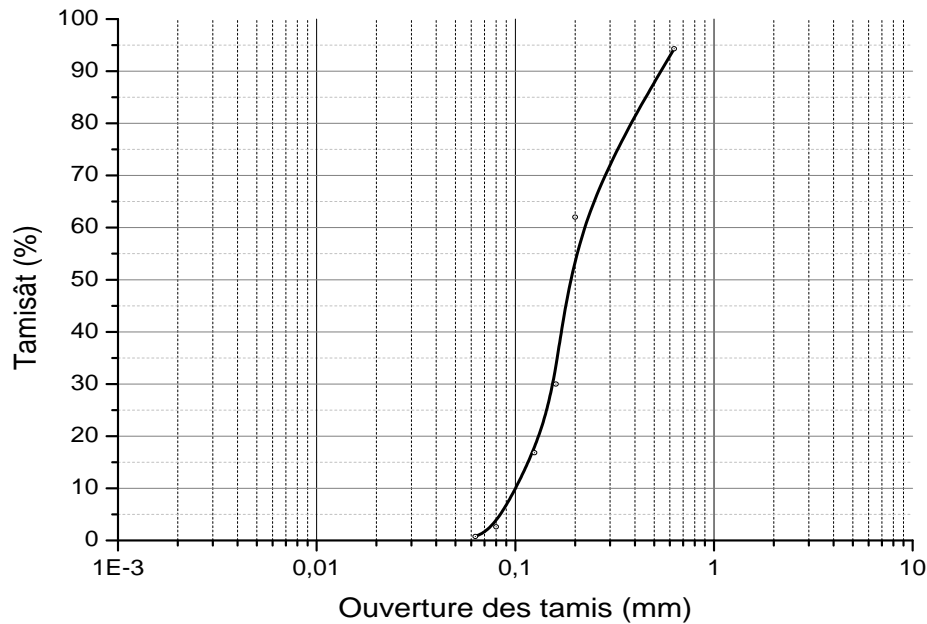


Figure II.8 Analyse granulométrique de sable dunaire

A partir des courbes granulométriques, on peut déterminer certains paramètres utiles, tels que le coefficient de courbure (C_c), le coefficient d'uniformité (C_u) et le module de finesse du sable (M_f).

d₁) Module de finesse

A partir de l'analyse granulométrique on peut déduire le module de finesse de sable, qui est défini comme le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 et 5mm.

Tableau II.5 Module de finesse des 2 sables.

Type de sable	Sable de dune	Sable alluvionnaire
Module de finesse	1,13	2,17

Pour le sable dunaire, le module de finesse ainsi obtenu ($M_f = 1,13$) est inférieur à 1,80, ce qui confirme qu'il est riche en éléments fins.

Le module de finesse ainsi obtenu pour le sable alluvionnaire $M_f = 2,17$; donc il s'agit d'un sable moyen.

d₂) Coefficient de courbure

Défini par :

$$C_c = D_{30}^2 / D_{10} \cdot D_{60}$$

Où D₁₀, D₃₀ et D₆₀ représentent respectivement les diamètres des grains correspondant à 10%, 30% et 60% des tamisats cumulés.

d₃) coefficient d'uniformité

Défini par :

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

Tableau II.6 Coefficient d'uniformité et de courbure des 2 sables.

Type de sable	C _c	C _u
Sable de dune	1.61	1.66
Sable alluvionnaire	1.61	2.14

C) Coefficient d'absorption

Il s'agit de déterminer le coefficient d'absorption d'eau des granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans les domaines du bâtiment. La quantité d'eau pouvant être absorbée par les granulats pendant le malaxage peut conduire à une perte de maniabilité, voir à un manque d'hydratation des liants. Il faudra donc, si les granulats sont poreux, effectuer les corrections sur le dosage en eau.

Le coefficient d'absorption d'eau est défini par les normes NF P 18-554 et 18-555 [38], comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par une imbibition partielle en eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition partielle est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C à la pression atmosphérique. L'essai est exécuté moyennant le matériel schématisé sur la figure II.3 comme suit :

- La masse de l'échantillon à sa teneur en eau en l'état doit être telle que **M > 0,2 D**.
- Laver l'échantillon sur le tamis de 2 mm. Sécher le refus à l'étuve, le laisser refroidir et le peser, soit **M_s** sa masse.
- Immerger l'échantillon dans l'eau pendant 24h à 20°C à la pression atmosphérique.
- Peser ensuite l'échantillon après l'avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement, soit **M_a** sa masse.

Le coefficient d'absorption d'eau en % du sable est:

$$Ab = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{II-5})$$

Avec :

M_a : masse à l'état de saturation.

M_s : masse à l'état sec.



Figure II.9 Moule et d'ame pour Le coefficient d'absorption

On a obtenu :

Tableau II.7 Coefficient d'absorption des 2 sables.

Type de sable	Sable de dune	Sable alluvionnaire
Le coefficient d'absorption(%)	4.43	0.58

II.1.2.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des substances qui pourraient avoir un effet négatif appréciable sur la qualité et la durabilité du mortier ou du béton. C'est pour cette raison-là qu'on a effectué une analyse chimique sur l'eau utilisée. L'eau de gâchage est bien l'eau potable de robinet de la ville de Laghouat (PH=7.77).

Tableau II.8 Analyse chimique de l'eau utilisée [Damene Z., 2005]

Espèces chimique	Quantité (mg/l)
Ca^{+2}	119.04
Mg^{+2}	32.93
Na^{+2}	144.90
K^{+}	5.69
Cl^{-}	169.96
SO_4^{-2}	420
HCO_3^{-}	153.80
NO_3^{-}	11.07

On remarque que l'eau de gâchage contient des ions minéraux qui peuvent attaquer la pâte de ciment ou l'acier dans le béton armé [Neville A., 2000].

II.1.3 Conclusions

- Le module de finesse du sable alluvionnaire trouvé est de 2.17, il est proche de celui d'un sable idéal moyen. La valeur trouvée montre que ce sable convient bien pour l'obtention d'un mortier ou béton dont l'ouvrabilité et la résistance sont satisfaisantes avec des risques de ségrégation limités.
- La courbe granulométrique du sable alluvionnaire est continue, étalée et assez régulière ce qui représente une répartition assez homogène des classes granulaires et située dans le fuseau granulométrique d'un sable à béton ordinaire.
- D'après les valeurs trouvées le sable employé est propre et il convient bien pour la composition de notre mortier.
- Pour le sable dunaire, le module de finesse ainsi obtenu ($M_f = 1.13$) est inférieur à 1.80, ce qui confirme qu'il est riche en éléments fins.
- Pour la composition chimique de l'eau de gâchage on remarque que les valeurs trouvées sont conformes à celles exigées par la norme en vigueur, l'eau de gâchage ne présente donc aucune nocivité pour l'utilisation à la confection des mortiers.
- Grâce aux essais réalisés au cours de ce travail, nous pouvons conclure que les matériaux utilisés sont bons pour la conception du mortier de chaux étudié à base de sable alluvionnaire ou dunaire.

II.2 Essais et méthodes expérimentales

II.2.1 Introduction

Le but de cette partie est d'exposer les différents essais et méthodes expérimentales selon les différentes normes, on peut regrouper ces essais comme suit:

- Essais de maniabilité des différents mortiers.
- Essais mécaniques.
 - Essai de traction par flexion.
 - Essai de compression.
- Retrait (déformation libre).
- Essais de Durabilité.
 - L'absorption d'eau.

II.2.2 Préformulation de la matrice

II.2.2.1 Préparation de la chaux éteinte

Les procédures de préparation de la chaux éteinte sont :

- Décharger la chaux dans la cuve métallique
- Verser de l'eau et procéder au malaxage de celui-ci.
- Garder- la pendant 24 heures pour arriver à une chaux éteinte.

Les blocs de chaux éteinte sont placés, ensuite, dans l'étuve durant 24 heures; après ce temps nous procédons au broyage de ces blocs dans l'appareil de Los Angeles afin de les transformer en poudre.



Figure II.10 Préparation de la chaux éteinte

II.2.2.1 Dosages utilisés en chaux/sable (C/S)

Il s'agit d'étudier le mortier à sable alluvionnaire ou sable dunaire avec différentes proportions de dosage en chaux (C), sable (S) dont le rapport C/S = (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4).

Les mortiers étudiés sont les suivants :

- Mortier de sable dunaire avec (C/S =1:2) (MSD2)
- Mortier de sable dunaire avec (C/S =1:2.5) (MSD2.5)
- Mortier de sable dunaire avec (C/S =1:3) (MSD3)
- Mortier de sable dunaire avec (C/S =1:3.5) (MSD3.5)
- Mortier de sable dunaire avec (C/S =1:4) (MSD4)
- Mortier de sable alluvionnaire avec (C/S =1:2) (MSA2)
- Mortier de sable alluvionnaire avec (C/S =1:2.5) (MSA2.5)
- Mortier de sable alluvionnaire avec (C/S =1:3) (MSA3)
- Mortier de sable alluvionnaire avec (C/S =1:3.5) (MSA3.5)
- Mortier de sable alluvionnaire avec (C/S =1:4) (MSA4)

La préparation des mortiers est déterminée par plusieurs essais de maniabilité (on a opté pour le rapport E/C qui donne un mélange plastique).

II.2.2.3 Préparation des mortiers et éprouvettes

a) Préparation de mortiers

La préparation des mortiers a été effectuée selon la norme (EN 196-1) [41] :

*Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur, y verser ensuite la chaux éteinte, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.

*Après 30 secondes de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30 secondes suivantes. Mettre alors le malaxeur à une vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30 secondes supplémentaires.

*Arrêter le malaxeur après 1 min 30 secondes. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.

*Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.

Le malaxage du mélange a été effectué par un malaxeur à mortier, comme il est montré sur la figure II.11 ci-dessous.



Figure II.11 Malaxeur pour mortier

b) Préparation des éprouvettes

Des moules normalisés, comme le montre la figure II.12, ont été utilisés pour confectionner 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm x 4cm et de longueur 16 cm. Les moules ont été remplis en deux couches en les faisant chuter d'une hauteur de 15 mm \pm 0.3 mm à la fréquence de 60 coups par couche.



Figure II.12 Moules prismatiques utilisés pour fabriquer les éprouvettes en mortier de chaux

c) Modes de conservation des éprouvettes

Après 72 heures de la mise en œuvre de mortier. Les éprouvettes ont été démoulées et conservées directement au milieu de conservation souhaité jusqu'au jour du test.

Les mortiers sont conservés en de deux milieux différents:

c₁) Air libre

- 75 spécimens ont été préparés à partir de sable alluvionnaire avec badigeon pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4).

- 75 spécimens ont été préparés à partir de sable alluvionnaire sans badigeon pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4).
- 75 spécimens ont été préparés à partir de sable de dune avec badigeon pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4).
- 75 spécimens ont été préparés à partir de sable de dune sans badigeon pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4).

Dans ce cas, le mortier est placé dans des conditions réelles, telles que la température (20 à 30°C) et humidité relative (50 à 60 %).

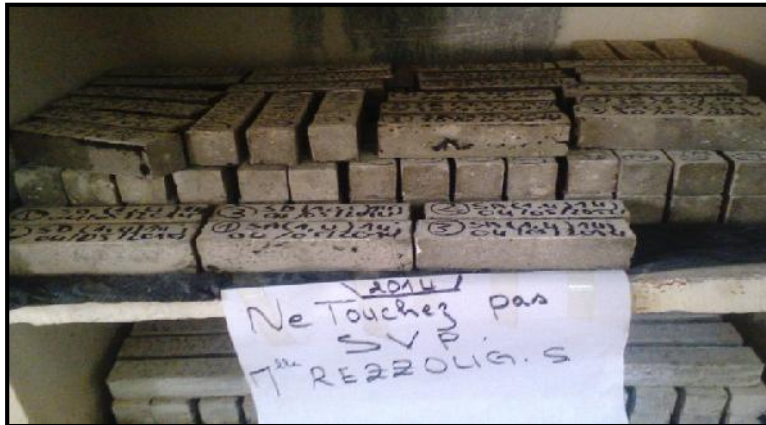


Figure II.13 Conservation à l'air libre

c₂) La toile de jute

- 75 spécimens ont été préparés à partir de sable alluvionnaire avec badigeon pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4).
- 75 spécimens ont été préparés à partir de sable alluvionnaire sans badigeon pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4).
- 75 spécimens ont été préparés à partir de sable de dune avec badigeon pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4).
- 75 spécimens ont été préparés à partir de sable de dune sans badigeon pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4).

* Le mortier conservé sous une double couverture composée de toile de jute mouillée et de film plastique.



Figure II.14 Conservation sous toile de jute

II.2.3 Essais réalisés sur les mortiers à l'état frais

La maniabilité a été mesurée suivant la norme NFP18-452[42], en utilisant un maniabilimètre à mortier LCL (type B) indiqué sur la figure II.15.

Le maniabilimètre B est un boîtier parallélépipédique métallique (18 cm x 9 cm x 9cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible. Celle-ci est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.



Figure II.15 Maniabilimètre LCL type « B » utilisé pour la mesure de la maniabilité

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison en 4 couches piquées à raison de six coups à l'aide d'une tige de piquage qui doit être maintenue parallèlement à la paroi inclinée de la cloison. Après avoir arasé la surface à la règle, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration, le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance.

II.2.4 Suivi des éprouvettes à l'état durci

Pour bien suivre l'évolution des éprouvettes des mortiers au cours du temps, chaque éprouvette a fait l'objet d'un suivi régulier.

II.2.4.1 Suivi de la masse

Il s'agit de la mesure la plus simple à réaliser. Cette mesure permet de déterminer la perte ou le gain en masse. Cette variation relative de masse est exprimée par la relation suivante :

$$\frac{\Delta m}{m} (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (II - 6)$$

Où m_i est le poids initial de l'éprouvette après le séchage, et m_f est le poids final (au jour de mesure) de l'éprouvette après le séchage.

II.2.4.2 Suivi de la longueur

L'étude de l'évolution de la variation de longueur des mortiers et des bétons est un moyen nécessaire qui permet de prévoir le comportement de ces matériaux vis-à-vis des conditions climatiques, car la durabilité de ces matériaux est compromise lorsque le matériau de construction de base a tendance à rétrécir au jeune âge. Si la variation relative de dimension est très grande, la durabilité par conséquent est affectée et on doit établir de nouvelles formulations afin d'optimiser le comportement du matériau vis-à-vis de l'apparition de fissures à cause du retrait, qui par conséquent, facilite la pénétration des agents agressifs à travers ces fissures.

Au cours du séchage, les mortiers diminuent de volume. Une grande partie de cette diminution est due à la perte d'eau de gâchage lors du séchage. Ce phénomène est appelé retrait. Le retrait ne dépend pas seulement des conditions de conservation (humidité, température), il dépend aussi des constituants du mortier, par exemple l'augmentation du dosage de chaux augmente le retrait du mortier.

Les mesures de retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ selon la norme NFP 15-433 [43]. On mesure la valeur du retrait avec un rétractomètre muni d'un comparateur digital.

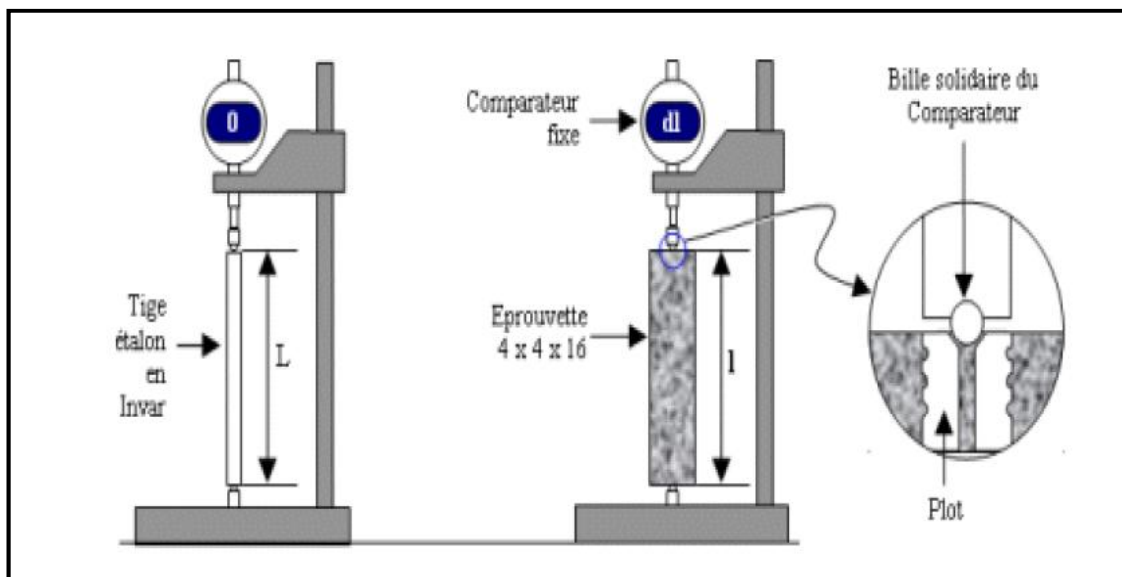


Figure II.16 Appareillage de mesure du retrait.

Cette étude est basée sur les résultats donnés par l'essai de retrait sur des éprouvettes conservés dans différents environnements (à l'air libre ou couvertes en plastique et toile de jute).

II.2.4.3 Suivi de la résistance mécanique

L'évolution de la résistance a été suivie au cours du temps, en faisant des essais de flexion et de compression à différents âges:

Le 14^{ème}, 28^{ème}, 90^{ème}, 180^{ème} et 365^{ème} jour pour les milieux :

- Conservation à l'air libre, pour le mortier à base de sables alluvionnaire et de dune avec et sans badigeon des dosages (1:2), (1:2.5), (1:3), (1:3.5), (1:4).
- Conservation sous toile de jute, pour le mortier à base de sables alluvionnaire et de dune avec et sans badigeon des dosages (1:2), (1:2.5), (1:3), (1:3.5), (1:4).

Généralement les mortiers sont classés selon leurs résistances à 28 jours. Ces dernière sont souvent influencées par plusieurs facteurs entre autres le rapport eau/chaux (E/C), le dosage et la classe de chaux, la nature et les proportions des granulats, les conditions climatiques et de mise en œuvre sans oublier l'influence des ajouts (adjuvants, Fibres,...). La mesure de la résistance se fait par les essais de flexion et de compression permettant de déterminer la contrainte de rupture de traction par flexion et la contrainte de rupture de compression du mortier calcaire.



Figure II.17 Machine utilisée pour la mesure de la résistance à la flexion et compression.

A) Essai de rupture par flexion

Cet essai est établi suivant la norme EN 196-1. Un dispositif à rouleau utilisé en flexion à 3 points, Figure II.18, comportant deux appuis à rouleau distant de 100 ou 106.7 mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique 40mmx40mmx160mm, et un troisième rouleau équidistant des deux premiers, transmettant une charge concentrée F_f [44].

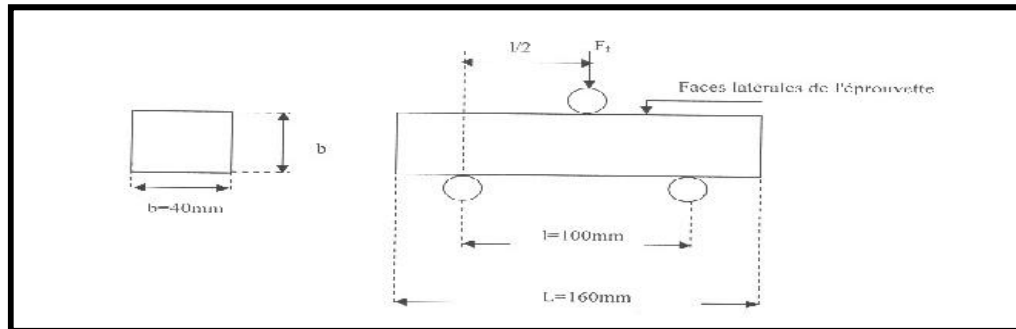


Figure II.18 Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (à 3 points).

La résistance à la flexion est calculée selon l'équation suivante :

$$R_f = (1.50 F_f l) / b^3 \quad (\text{II-7})$$

R_f : Résistance à la flexion en (MPa);

F_f : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N);

l : Longueur qui sépare les deux appuis en (mm);

b : Côté de l'éprouvette qui est égale à 40mm;

L : Longueur totale de l'éprouvette.

B) Essai de rupture par compression

Cet essai est régi suivant la norme EN 196-1, exécuté avec une presse pour matériaux durs, sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai précédent. Chaque demi prisme est mis entre deux plaque de métal dur puis testé en compression sur ses faces latérales (de moulage) de section de 40x40mm². Le demi-prisme est placé entre- elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm.

Le dispositif de cet essai est présenté par la figure II.19.

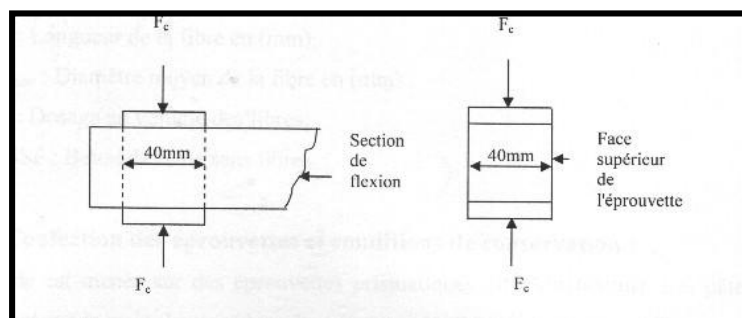


Figure II.19 Dispositif de rupture en compression.

La résistance à la compression est calculée selon l'équation suivante :

$$R_c = F_c / b^2 \quad (\text{II-8})$$

R_c : Résistance à la compression en (MPa);

F_c : Charge de rupture en (N);

b : Côté de l'éprouvette qui est égal à 40 mm.

II.2.5 Essais de durabilité

- **Absorption capillaire**

Les phénomènes de transport, dont l'absorption d'eau par capillarité, s'avèrent être primordiaux vis à vis de la durabilité des mortiers à la chaux compte tenu de leur rapport eau /chaux élevé. La composition de ce genre de mortiers et du mode de leur cure sur le processus d'absorption d'eau peut influencer sur l'absorption de ces mortiers. Les mortiers à la chaux absorbent une quantité d'eau plus ou moins importante selon la nature du sable qu'ils contiennent et leur composition. Ils sont donc plus vulnérables à diverses agressions.

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est réalisé conformément à la norme NFP 10-502 [45]. Cet essai est effectué sur des éprouvettes de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ séchées jusqu'à poids constant.

On pose les éprouvettes sur leurs bases 4×4 cm², en les séparant d'au moins 1 cm du fond du récipient et on maintient le niveau d'eau constant. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau à une profondeur de 5 mm. Les surfaces latérales des éprouvettes sont imperméabilisées à l'aide de deux couches de verni pour avoir un écoulement uni directionnel. La base inférieure et la base supérieure ne sont pas imperméabilisées pour permettre la montée de l'eau par capillarité et l'évacuation de l'air pendant l'essai. Les éprouvettes sont pesées à des intervalles de temps réguliers.

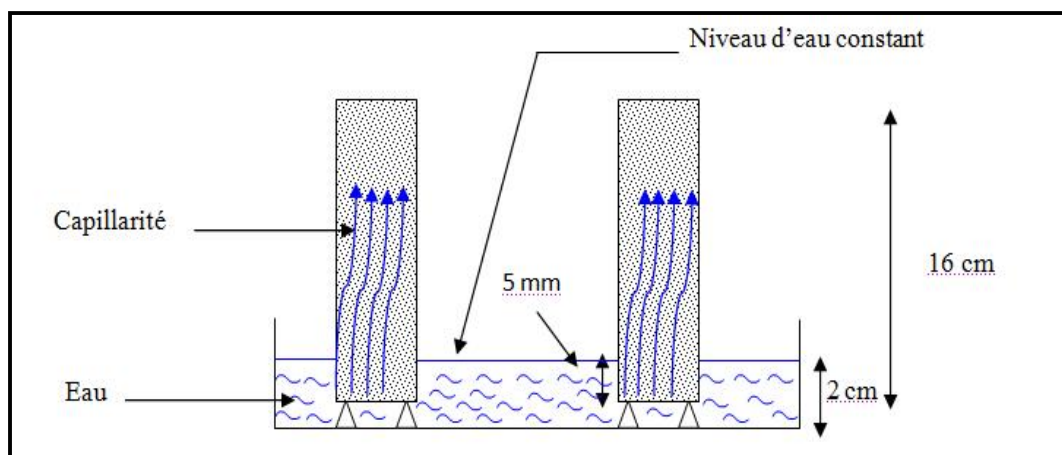


Figure. II.20 : Absorption d'eau par capillarité.

II.2.6 Programme expérimental

Tableau II.9. Programme expérimental des essais mécaniques sur des éprouvettes conservées à l'air libre

Essais mécaniques : compression et flexion								
Conservation à l'air libre								
jours	Sable alluvionnaire				Sable de dune			
	Sans badigeon		Avec badigeon		Sans badigeon		Avec badigeon	
	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes
14	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
28	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
90	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
180	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
365	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
S.total		75		75		75		75
Total	300							

Tableau II.10 Programme expérimental des essais mécaniques sur des éprouvettes conservées sous toile de jute

Essais mécaniques : compression et flexion								
Conservation sous toile de jute								
jours	Sable alluvionnaire				Sable de dune			
	Sans badigeon		Avec badigeon		Sans badigeon		Avec badigeon	
	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes
14	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
28	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
90	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
180	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
365	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
S.total		75		75		75		75
Total	300							

Tableau II.11 Programme expérimental des essais physiques (variation de la masse) sur des éprouvettes conservées à l'air libre

Essais physiques à l'air libre conservées à l'air libre 4*4*16 cm 3 à l'air libre								
jours	Conservation à l'air libre							
	Sable alluvionnaire				Sable de dune			
	Sans badigeon		Avec badigeon		Sans badigeon		Avec badigeon	
	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes
14	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
28	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
90	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
180	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
365	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3

Tableau II.12. Programme expérimental des essais physiques (variation de la masse) sur des éprouvettes conservées sous toile de jute

Essais physiques : variation en masse								
Conservation sous toile de jute								
jours	Sable alluvionnaire				Sable de dune			
	Sans badigeon		Avec badigeon		Sans badigeon		Avec badigeon	
	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes
14	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
28	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
90	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
180	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3
365	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3	(1:2.5)	3*3
	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3	(1:3)	3*3
	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3	(1:3.5)	3*3
	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3	(1:4)	3*3

Tableau II.13. Programme expérimental des essais physiques (Variation de longueur) sur des éprouvettes conservées à l'air libre

Essais physiques - Variation de longueur								
jours	Conservation à l'air libre							
	Sable alluvionnaire				Sable de dune			
	Sans badigeon		Avec badigeon		Sans badigeon		Avec badigeon	
	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes
3 à 28	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)	
	(1:3)		(1:3)		(1:3)		(1:3)	
	(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)	
	(1:4)		(1:4)		(1:4)		(1:4)	
90	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)	
	(1:3)		(1:3)		(1:3)		(1:3)	
	(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)	
	(1:4)		(1:4)		(1:4)		(1:4)	
180	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)	
	(1:3)		(1:3)		(1:3)		(1:3)	
	(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)	
	(1:4)		(1:4)		(1:4)		(1:4)	
365	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)	
	(1:3)		(1:3)		(1:3)		(1:3)	
	(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)	
	(1:4)		(1:4)		(1:4)		(1:4)	

Tableau II.14. Programme expérimental des essais physiques (Variation de longueur) sur des éprouvettes conservées sous toile de jute

Essais physiques - Variation de longueur								
Conservation sous toile de jute								
jours	Sable alluvionnaire				Sable de dune			
	Sans badigeon		Avec badigeon		Sans badigeon		Avec badigeon	
	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes
3 à 28	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)	
	(1:3)		(1:3)		(1:3)		(1:3)	
	(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)	
	(1:4)		(1:4)		(1:4)		(1:4)	
90	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)	
	(1:3)		(1:3)		(1:3)		(1:3)	
	(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)	
	(1:4)		(1:4)		(1:4)		(1:4)	
180	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)	
	(1:3)		(1:3)		(1:3)		(1:3)	
	(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)	
	(1:4)		(1:4)		(1:4)		(1:4)	
365	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
	(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)	
	(1:3)		(1:3)		(1:3)		(1:3)	
	(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)	
	(1:4)		(1:4)		(1:4)		(1:4)	

Tableau II.15. Programme expérimental des essais physiques (Absorption capillaire)

Sable alluvionnaire				Sable de dune			
Sans badigeon		Avec badigeon		Sans badigeon		Avec badigeon	
Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes	Dosages	Nombre des éprouvettes
(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3	(1:2)	3*3
(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)		(1:2.5)	
(1:3)		(1:3)		(1:3)		(1:3)	
(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)		(1:3.5)	
(1:4)		(1:4)		(1:4)		(1:4)	

II.2.3 Conclusion

On peut conclure que :

- Pour tous les essais expérimentaux qui sont cités précédemment sont réalisés selon les Normes connues dans le domaine de génie civil.
- Les milieux de conservation sont choisis de telle sorte que nous pourrions faire une comparaison entre les différents résultats du comportement physico-mécanique des mortiers et leur durabilité.
- Ces essais donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux entrant dans la composition des mortiers étudiés.
- Ces essais nous permettent aussi de commenter les résultats trouvés et de choisir les meilleures interprétations.

CHAPITRE III
RESULTATS EXPERIMENTAUX
ET INTERPRETATIONS

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

III.1 Introduction

Après avoir passé en revue les différents essais et méthodes expérimentales dans le chapitre précédent, nous présentons dans ce chapitre les résultats de ces essais de caractérisation des matériaux.

Les résultats concernent les essais suivants:

- Maniabilité.
- Variation de masse.
- Variation de longueur (retrait).
- Résistances mécaniques (flexion et compression) aux échéances: 14, 28, 90, 180 et 365 jours.
- Absorption capillaire.

III.2. Etude du mortier à l'état frais

III.2.1 Optimisation du rapport Eau/Chaux (E/C)

Comme expliqué dans le chapitre II, la maniabilité a été étudiée à l'aide de l'essai LCL. Cette grandeur est caractérisée par la mesure du temps d'écoulement qui est autant plus grand que la consistance du mortier est épaisse. Il s'agit d'étudier la variation de l'ouvrabilité du mortier étudié en fonction du rapport E/C, en faisant varier le rapport Chaux/Sable (C/S) et la nature du sable (alluvionnaire ou dunaire).

Les résultats obtenus pour chaque composition ((1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4)) et pour différents rapports E/C sont regroupés respectivement dans les Tableaux III.1 à III.5. Ils sont également illustrés par les figures III.1 à III.5.

Les tableaux III.1 à III.5 et les figures III.1 à III.5 présentent la variation du temps d'écoulement des mortiers en fonction du rapport E/C pour les rapports C/S respectivement de (1:2), (1:2,5), (1:3), (1:3,5) et (1:4) et ceci pour les deux types de sables utilisés (alluvionnaire et dunaire).

Tableau III.1: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:2) avec les deux catégories de sables.

Mortier (C/S)	Chaux + Sable alluvionnaire			Chaux + Sable dunaire		
	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations
1/2	0,80	17	Ferme	0,84	20	Ferme
	0,83	15	Ferme	0,87	16	Ferme
	0,85	11	Plastique	0,9	11	Plastique
	0,9	7	Fluide	1	6	Fluide
	0,95	2	Fluide	1,05	2	Fluide

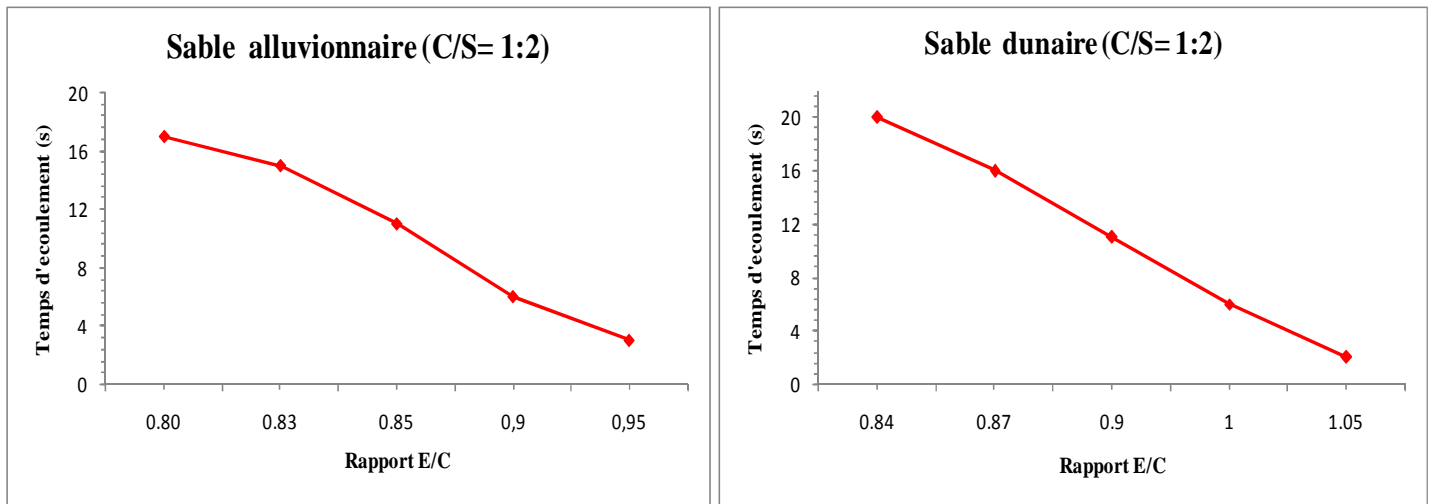


Figure. III.1: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:2) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).

Tableau III.2: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:2,5) avec les deux catégories de sables.

Mortier (C/S)	Chaux + Sable alluvionnaire			Chaux + Sable dunaire		
	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations
1/2.5	0,87	19	Ferme	0,90	25	Ferme
	0,90	15	Ferme	0,93	17	Ferme
	0,92	9	Plastique	0,96	10	Plastique
	0,95	6	Fluide	0,99	6	Fluide
	0,98	2	Fluide	1	3	Fluide

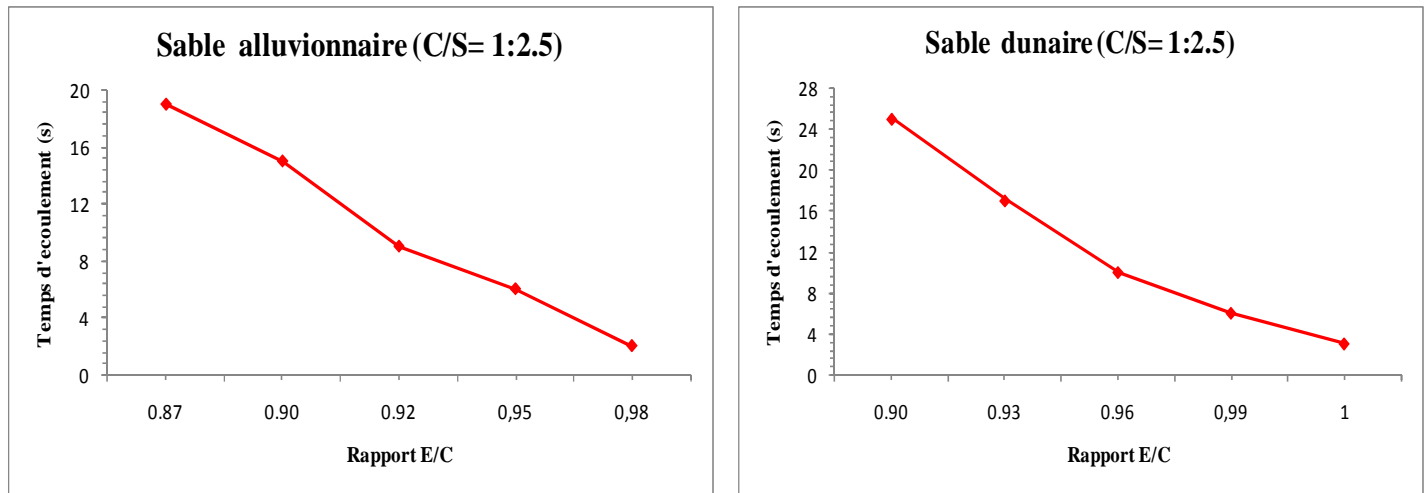


Figure. III.2: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:2,5) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).

Tableau III.3: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:3) avec les deux catégories de sables.

Mortier (C/S)	Chaux + Sable alluvionnaire			Chaux + Sable dunaire		
	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations
1/3	0,93	26	ferme	1,02	26	ferme
	0,95	17	ferme	1,04	15	ferme
	0,99	10	Plastique	1,07	11	Plastique
	1,03	6	Fluide	1,09	7	Fluide
	1,05	3	Fluide	1,1	2	Fluide

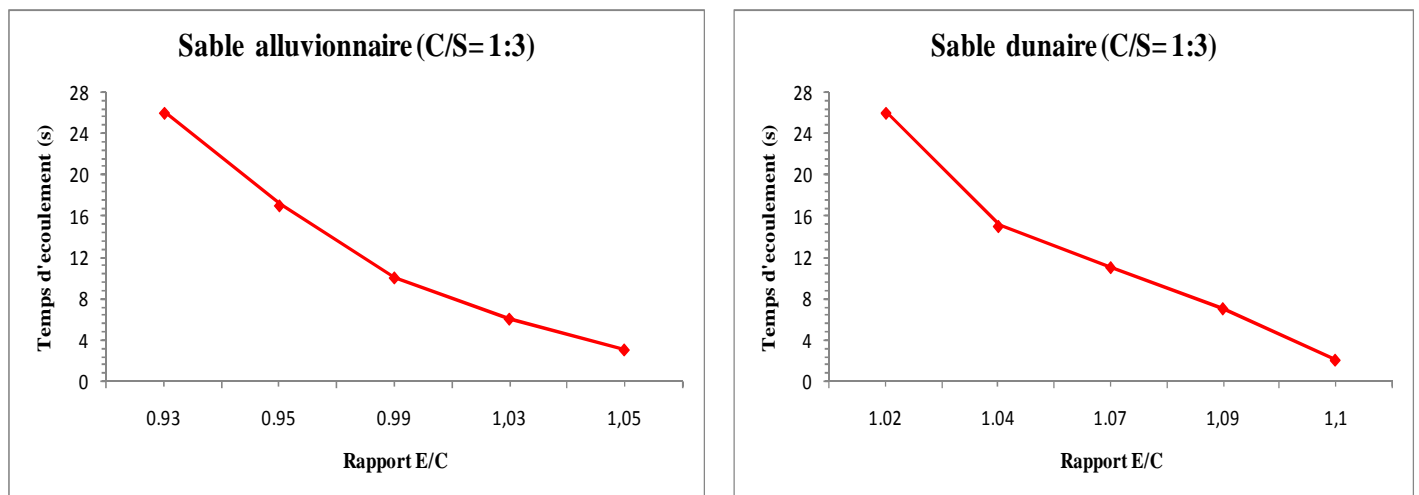
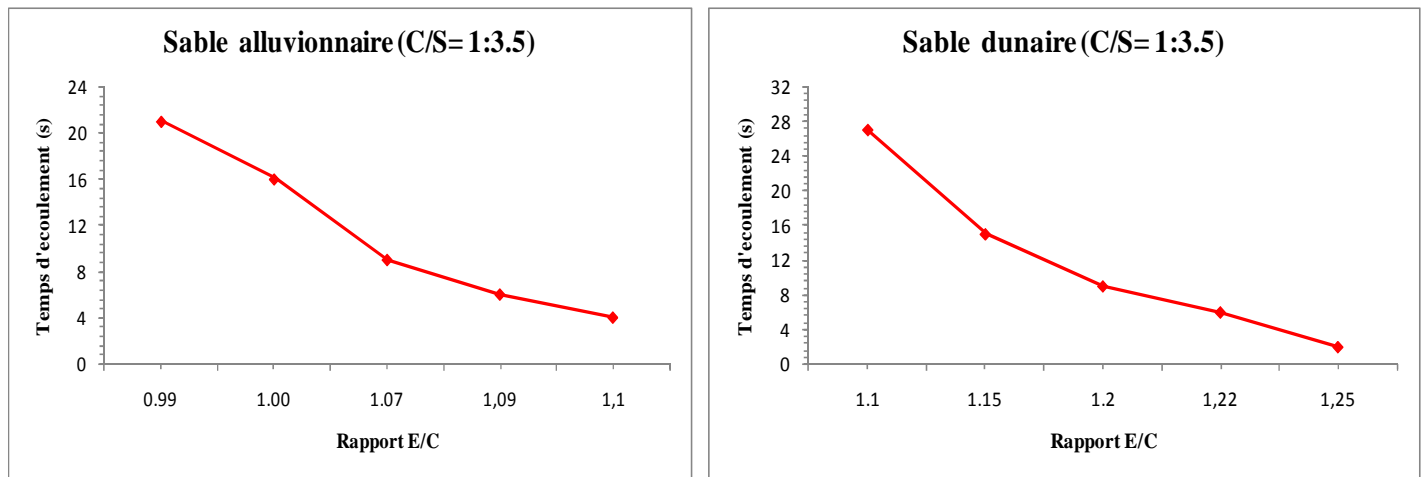


Figure. III.3: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:3) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).

Tableau III.4: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:3,5) avec les deux catégories de sables.

Mortier (C/S)	Chaux + Sable alluvionnaire			Chaux + Sable dunaire		
	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations
1/3.5	0,99	21	ferme	1,1	27	ferme
	1,00	16	ferme	1,15	15	ferme
	1,07	9	Plastique	1,2	9	Plastique
	1,09	6	Fluide	1,22	6	Fluide
	1,1	2	Fluide	1,25	2	Fluide

**Figure. III.4:** Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:3,5) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).**Tableau III.5:** Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:4) avec les deux catégories de sables.

Mortier (C/S)	Chaux + Sable alluvionnaire			Chaux + Sable dunaire		
	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations	E/C	Temps d'écoulement (secondes)	Observations
1/4	1,10	20	ferme	1,18	19	ferme
	1,15	16	ferme	1,20	16	ferme
	1,17	10	Plastique	1,25	10	Plastique
	1,19	6	Fluide	1,27	6	Fluide
	1,2	4	Fluide	1,29	3	Fluide

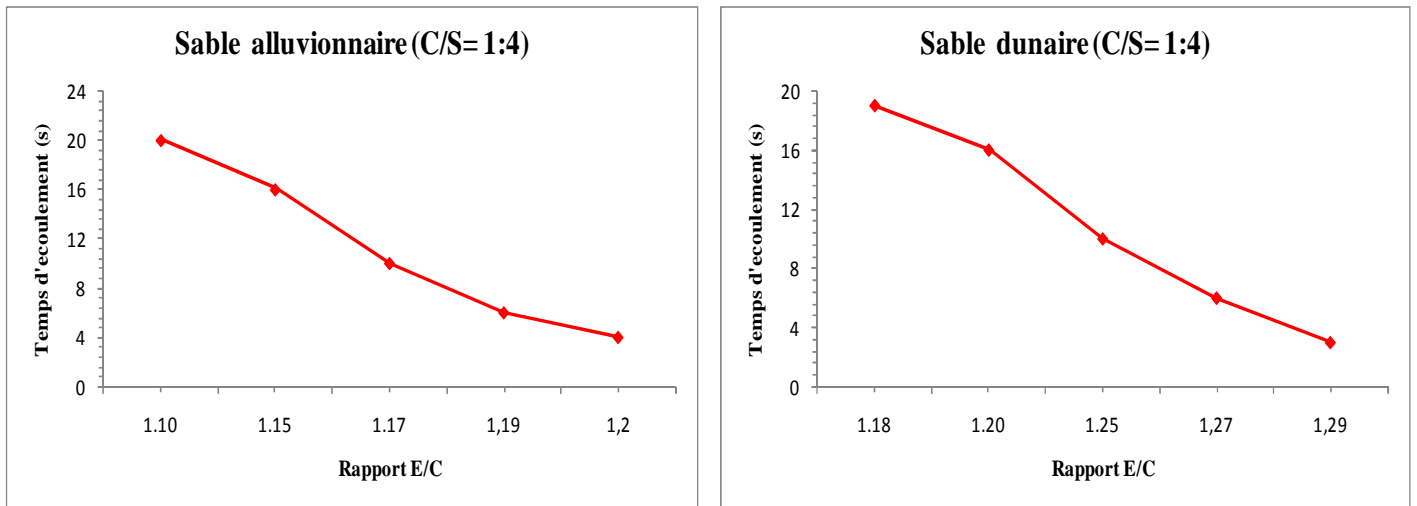


Figure. III.5: Variation du temps d'écoulement des mélanges dont le rapport C/S = (1:4) pour sables alluvionnaire et dunaire en fonction du rapport (E/C).

D'après ces figures et tableaux ci-dessus, la variation du temps d'écoulement des mortiers montrent que la diminution du rapport C/S engendre une augmentation du rapport E/C pour les deux compositions (composition à base de sable alluvionnaire et à base de sable dunaire). Pour un même temps d'écoulement la demande en eau est plus élevée pour la composition de mortier à base de sable dunaire que celle pour la composition de mortier à base de sable alluvionnaire.

Ce tableau regroupe la composition des mortiers à chaux à base de sable alluvionnaire et dunaire.

Tableau III.6: Composition du mortier à chaux à base de sable alluvionnaire et dunaire.

(C/S)	Chaux+sable alluvionnaire	Chaux+sable dunaire
(1:2)	E/C=0,85	E/C=0,9
(1:2,5)	E/C=0,92	E/C=0,96
(1:3)	E/C=0,99	E/C=1,07
(1:3,5)	E/C=1,07	E/C=1,2
(1:4)	E/C=1,17	E/C=1,25

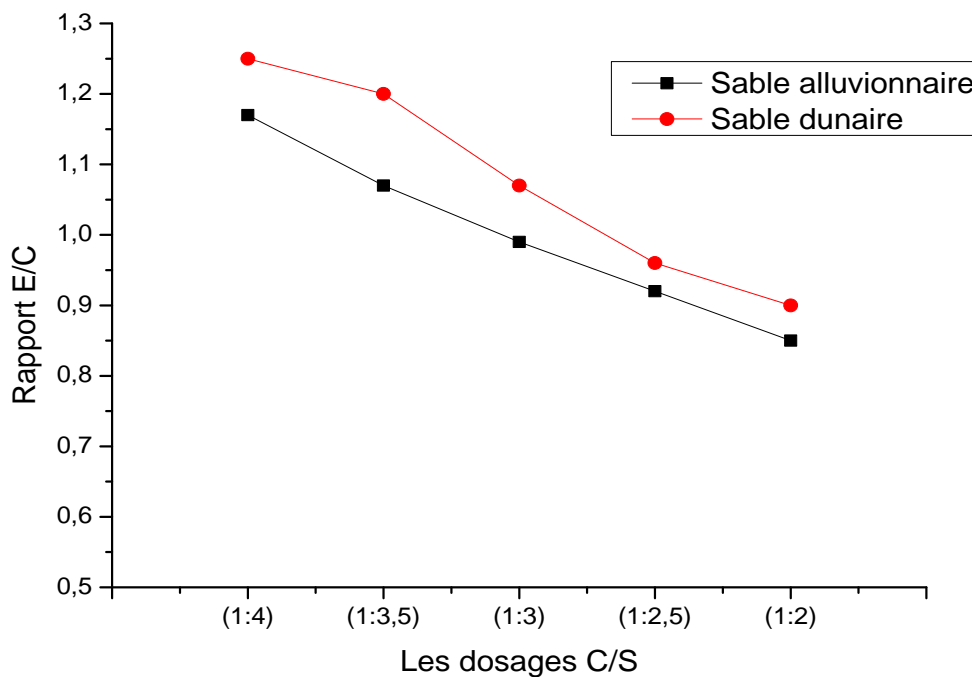


Figure. III.6: Effet des dosages pour sables alluvionnaire et dunaire sur le rapport E/C

III.2.2 Discussions des résultats

D'après les figures III.1 à III.6, on remarque que :

- L'augmentation du rapport E/C diminue le temps d'écoulement des différents mortiers (dosages (1:2) ; (1:2,5) ; (1:3) ; (1:3,5) ; (1:4)) dans le maniabilimètre « B ». Le mortier sera donc plus fluide à cause de l'excès de l'eau de gâchage et par conséquent la maniabilité du mortier augmente.
- Lorsque le rapport C/S augmente, le temps d'écoulement diminue.
- La diminution du rapport C/S engendre une augmentation du rapport E/C.
- Le rapport E/C varie avec le type de sable (alluvionnaire ou dunaire). Il est plus élevé dans le cas des mortiers de sable dunaire que dans le cas des mortiers de sable alluvionnaire pour un même rapport de chaux/sable (C/S). Ceci est dû probablement à la surface spécifique des grains de sable. Plus la surface spécifique des grains de sable est élevée plus la quantité d'eau adsorbée par les grains est élevée.

✓ Maniabilité

La maniabilité dépend essentiellement de la quantité d'eau utilisée. En ce qui concerne les mortiers de chaux à base de sable dunaire nécessitent plus d'eau que le mortier à base de sable alluvionnaire. Par conséquent, le rapport E/C du mortier de chaux à base de sable dunaire situe entre 0,9-1,25 est nettement supérieur à celui d'un mortier à base de sable alluvionnaire qui se situe entre 0,85-1,17.

✓ Effet de la chaux

Comme pour tous les matériaux, le rapport E/C a une grande influence sur la maniabilité et sur la résistance. D'où la nécessité de déterminer le rapport E/C qui assure en même temps, une maniabilité plastique qui permet la facilité de l'écoulement.

✓ Effet de la granulométrie

A un même dosage en eau, le mortier à chaux à base de sable alluvionnaire est plus maniable qu'un mortier à chaux à base de sable dunaire. Ceci explique l'effet du diamètre maximal des grains sur la maniabilité, plus le diamètre maximal est grand, plus la maniabilité est élevée.

Si nous parlons en terme de module de finesse nous pouvons dire que la maniabilité augmente avec l'augmentation du module de finesse.

En effet la variation du rapport E/C est due à :

- la granulométrie du sable (alluvionnaire ou dunaire), c.-à-d, la dimension des grains;
 - au rapport C/S: la diminution du rapport C/S engendre une augmentation du rapport E/C, cela est due à la surface spécifique des particules.

III.3 Etude du mortier à l'état durci

Afin de bien suivre l'évolution des éprouvettes de mortier au cours du temps, chaque éprouvette a fait l'objet d'un suivi régulier, qui a fait appel à des techniques non destructives, ce qui permet d'étudier les grandeurs pertinentes vis-à-vis de nouveaux produits hydratés.

Les grandeurs physiques suivies sont:

III.3.1 Variations de masse

C'est la mesure la plus simple à réaliser qui permet de déterminer la perte ou le gain en masse en fonction du temps, dû à l'eau évaporée de l'éprouvette après son démoulage.

*** Notations

Valeur de variation de masse positive ($\frac{\Delta m}{m} > 0$) $\implies m > 0 \implies m_i - m_f > 0$

$\implies m_i > m_f \implies$ perte de masse.

Valeur de variation de masse négative ($\frac{\Delta m}{m} < 0$) $\implies m < 0 \implies m_i - m_f < 0$

$\implies m_i < m_f \implies$ gain de masse.

Les masses des éprouvettes étudiées pour chaque composition ont été suivies jusqu'au 365^{ème} jour afin de voir les variations qui peuvent en avoir lieu.

III.3.1.1 Conservation à l'air libre

Les figures III.7 et III.8 présentent les variations de perte de masse des éprouvettes de mortier à base de sable alluvionnaire et de dune conservées à l'air libre pour les différents dosages étudiés.

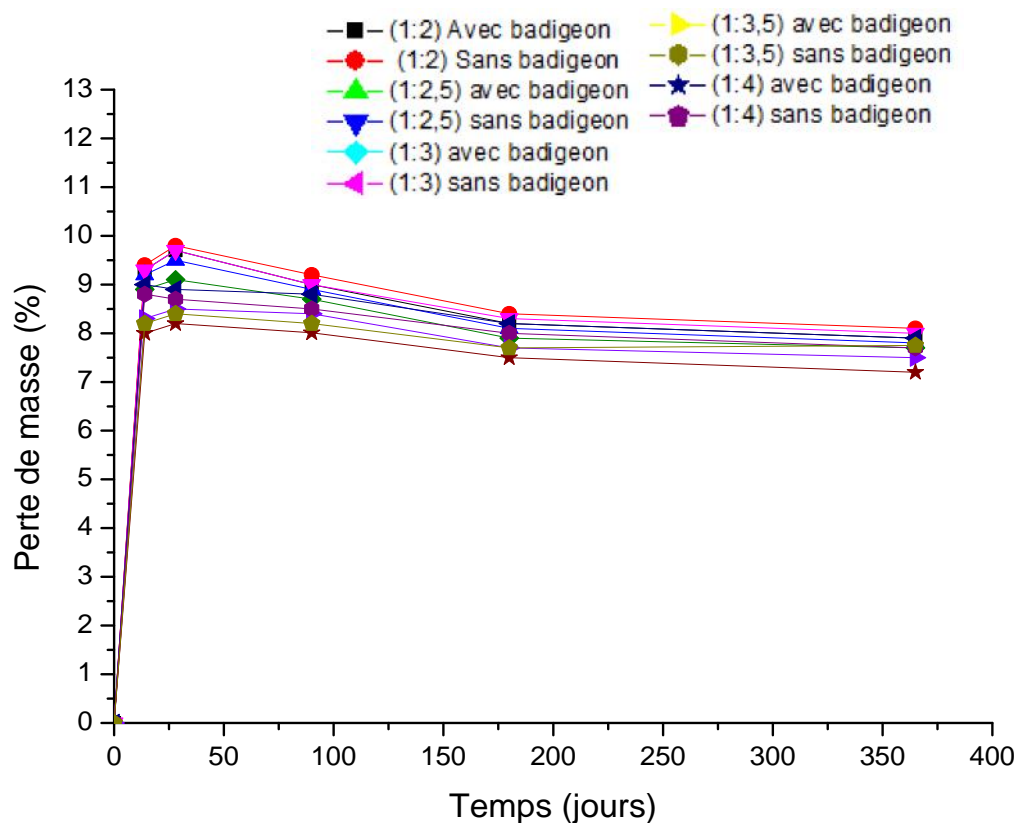


Figure. III.7: Variation de perte de masse des éprouvettes de mortiers à base de sable alluvionnaire à l'air libre

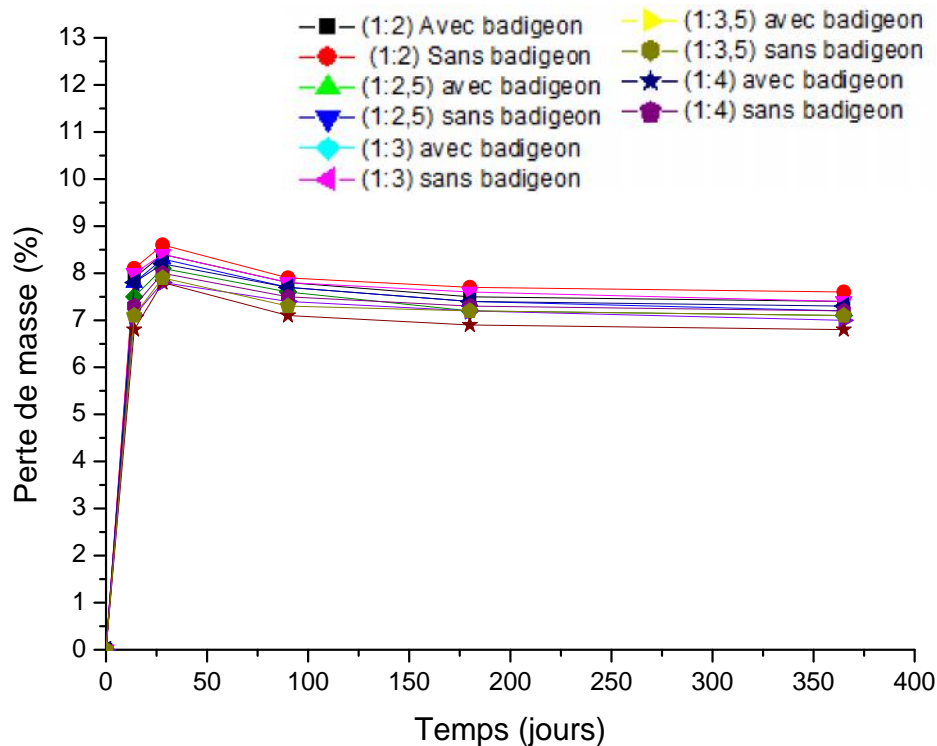


Figure. III.8: Variation de perte de masse des échantillons de mortiers à base de sable dunaire à l'air libre

D'après les figures III.7 et III.8 on remarque que :

- ✓ L'évolution de la perte de masse du mortier à base de sable alluvionnaire et celui de sable dunaire pour tous les dosages avec et sans badigeon à l'air libre dans le temps, a montré une augmentation pendant les premiers 28 jours. Après cette date une diminution progressive a été enregistrée jusqu'à 365 jours. Aussi, on remarque que la diminution de la perte de masse est relativement faible pour un intervalle de temps situé entre 6 et 12 mois.
- ✓ Les pertes de masse des mortiers à l'air libre sont dues à l'évaporation continue de l'eau logée dans les vides capillaires sous l'effet de la température extérieure.
- ✓ Les échantillons de mortiers de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire sans badigeon montrent une perte de masse un peu plus grande de 4% environ par rapport aux mortiers avec badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.
- ✓ La perte de masse diminue légèrement avec la diminution du rapport C/S.

$$\left(\frac{\Delta m}{m}\right) \text{ de dosage (1:2)} > \left(\frac{\Delta m}{m}\right) \text{ de dosage (1:2,5)} > \left(\frac{\Delta m}{m}\right) \text{ de dosage (1:3)} > \left(\frac{\Delta m}{m}\right) \text{ de dosage (1:3,5)} > \left(\frac{\Delta m}{m}\right) \text{ de dosage (1:4)}$$

III.3.1.2. Conservation sous toile de jute

La variation de masse des éprouvettes de mortiers à base de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire sous toile de jute est présentée par la figure III.9 et III.10, respectivement.

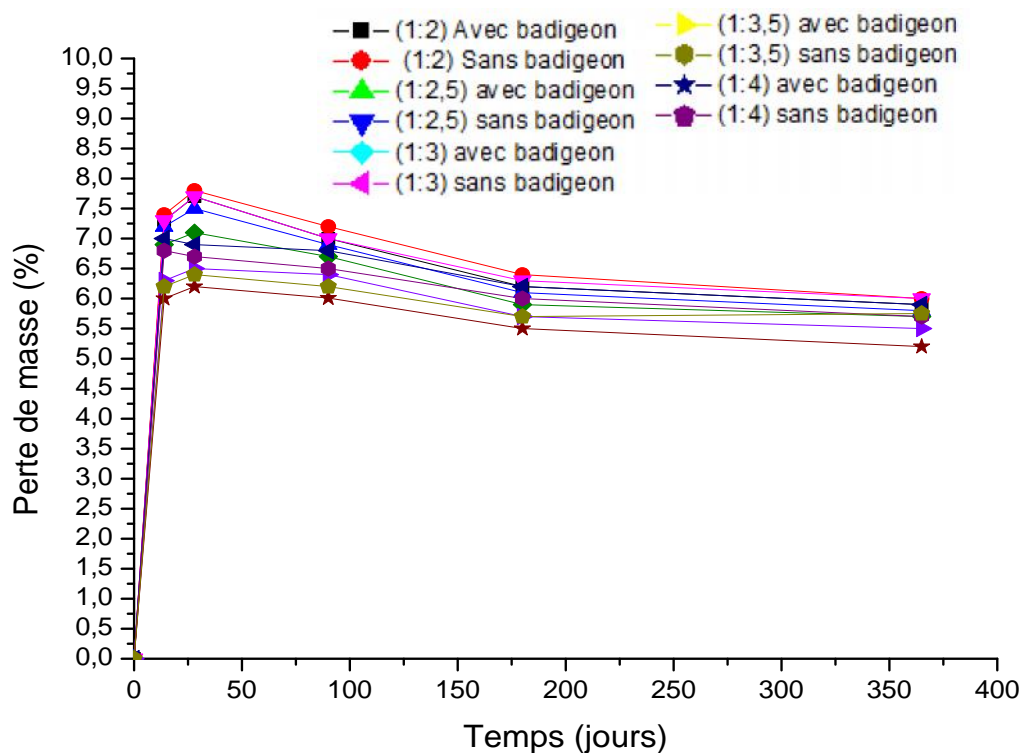


Fig. III.9: Variation de perte de masse des éprouvettes du mortier à base de sable alluvionnaire sous toile de jute

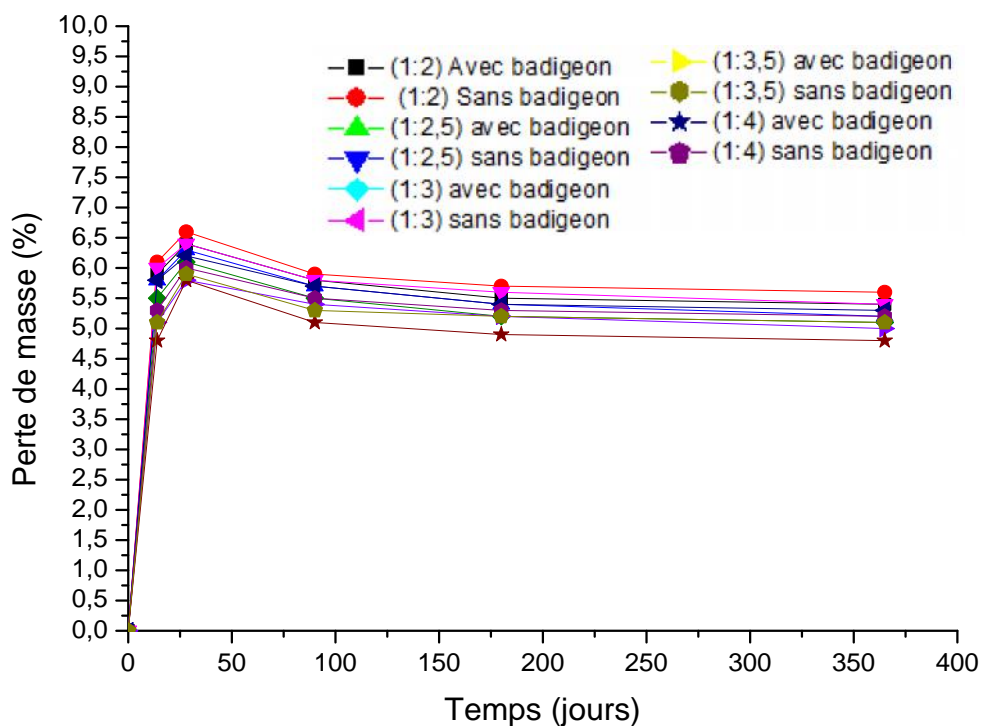


Figure. III.10: Variation de perte de masses des éprouvettes du mortier à base de sable dunaire sous toile de jute

Les courbes présentées par les figures III.9 et III.10 montrent :

- ✓ L'évolution de la perte de masse de mortiers à base de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire sous toile de jute dans le temps a montré une grande augmentation pendant les 32 jours. Après cette date une diminution progressive a été enregistrée jusqu'à 365 jours.
- ✓ Les éprouvettes de mortiers de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire sans badigeon montrent une perte de masse un peu plus grande de 2,5% environ par rapport aux mortiers avec badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.
- ✓ La perte de masse diminue légèrement avec la diminution du rapport C/S.

$$\left(\frac{\Delta m}{m} \text{ de dosage (1:2)} > \frac{\Delta m}{m} \text{ de dosage (1:2,5)} > \frac{\Delta m}{m} \text{ de dosage (1:3)} > \frac{\Delta m}{m} \text{ de dosage (1:3,5)} > \frac{\Delta m}{m} \text{ de dosage (1:4)} \right).$$

III.3.1.3 Effet du mode de conservation sur la perte de masse

Pour bien apprécier l'effet du mode de conservation sur la perte de masse, nous avons tracé les courbes ci-dessous pour les mortiers à base de sable alluvionnaire et dunaire (Figure III.11).

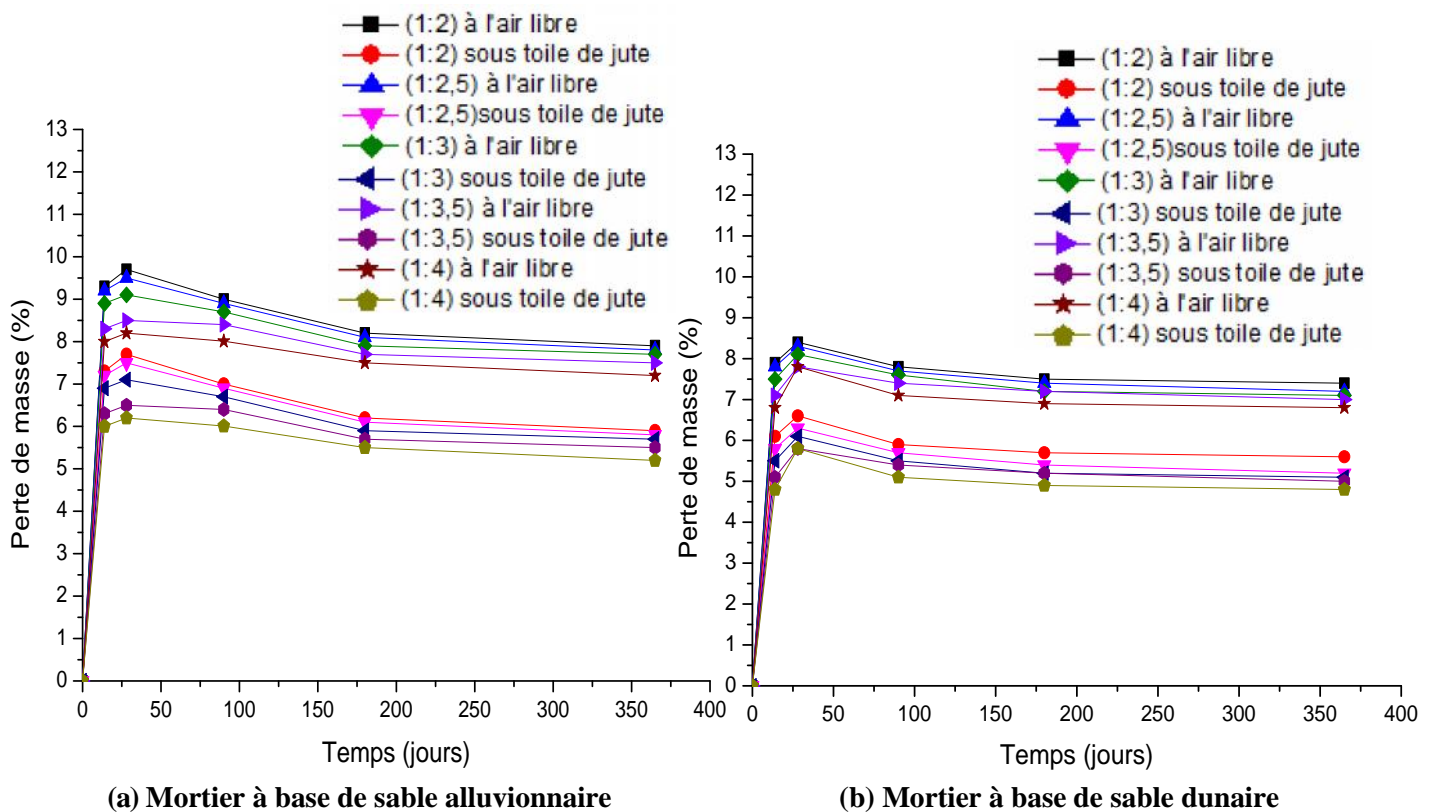


Figure III.11 Effet du mode de conservation sur la perte de masse pour les deux types de mortier
(a) mortier à base de sable alluvionnaire ; (b) mortier à base de sable dunaire

De la figure III.11 on remarque clairement l'effet de mode de conservation sur la perte de masse, les mortiers conservés à l'air libre montrent une augmentation de perte de masse de 22% par rapport aux mortiers conservés sous toile de jute.

III.3.1.4 Effet de type de sable sur la perte de masse

La figure III.12 montre l'effet de type de sable sur la perte de masse.

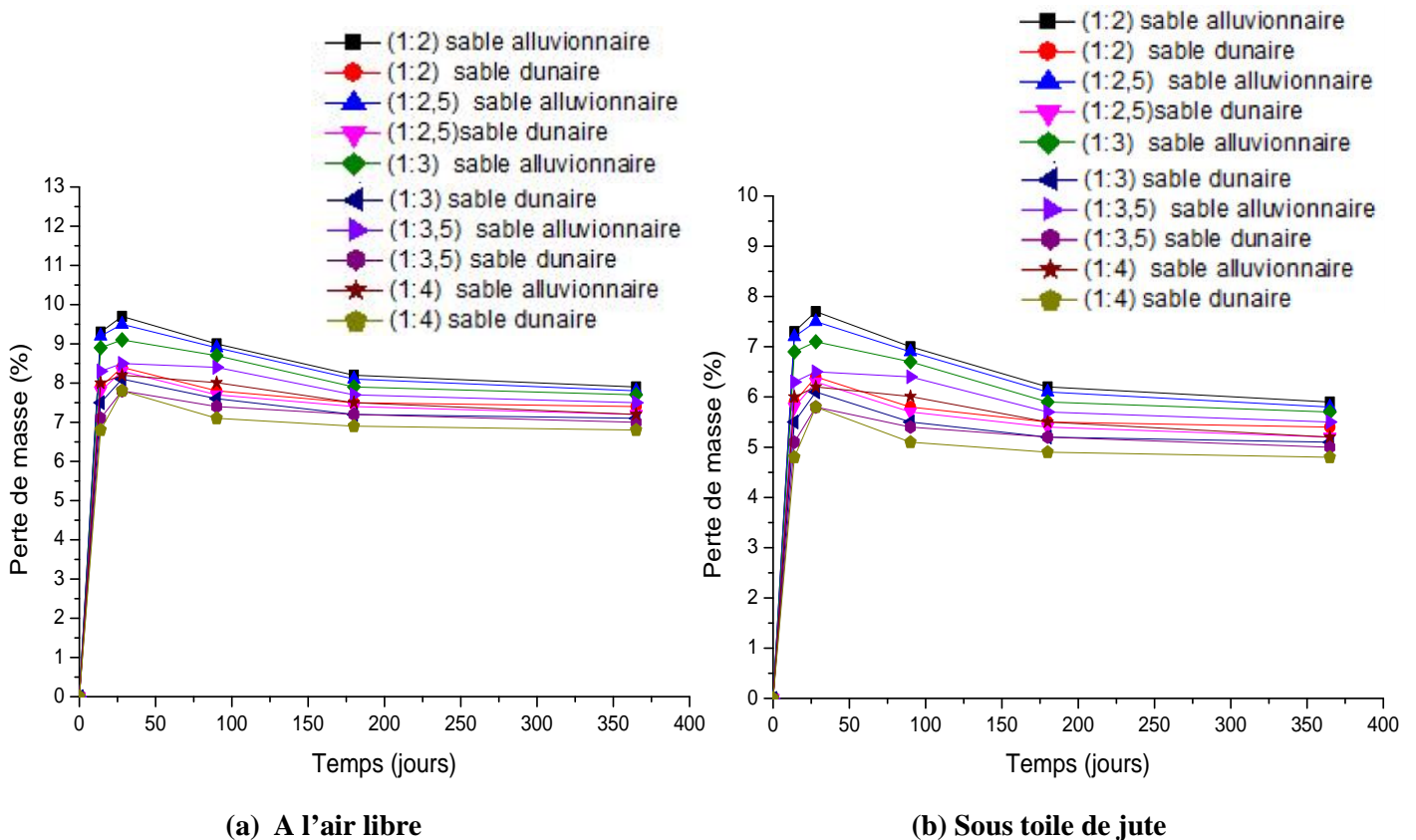


Figure III.12: Effet de type de sable sur la perte de masses pour les deux milieux de conservations (a) À l'air libre ; (b) Sous toile de jute

On remarque que la perte de masse des mortiers à base de sable alluvionnaire est plus grand que celle des mortiers à base de sable dunaire de 19 % pour les éprouvettes conservées à l'air libre et de 15 % pour les éprouvettes conservées sous toile de jute

III.3.1.5 Récapitulation de l'analyse des résultats

On remarque que l'évolution de la perte de masse au cours du temps est similaire pour l'ensemble des mortiers confectionnés à l'air libre et sous toile de jute.

La perte de masse diminue avec la diminution du rapport C/S c'est-à-dire avec la diminution de la quantité de chaux quelle que soit la nature du sable alluvionnaire ou dunaire et le mode de conservation (air libre ou toile de jute), on enregistre dans ce cas l'effet de dosage de chaux et de sable sur la masse. Cette diminution de perte de masse est due principalement à la variation de la quantité d'eau dans les mortiers confectionnés influencée par la quantité de chaux et la nature de sable (alluvionnaire ou dunaire).

Comme montré par les figures III.7, III.8, III.9 et III.10, le mortier de dosage (1:2) a exhibé par rapport aux autres mortiers une grande perte de masse. Ce mortier a besoin d'une quantité d'eau plus élevée que les autres mortiers pour offrir une bonne maniabilité pendant sa préparation.

L'évolution de perte de masse pour les éprouvettes conservées à l'air libre et sous toile de jute s'effectue sur deux phases successives à savoir :

1^{er} phase de 0 à 28 jours pour les éprouvettes conservées à l'air libre et de 0 à 32 jours pour les éprouvettes conservées sous toile de jute.

Au cours de cette période, les mortiers perdent l'eau excédentaire. Les figures III.7, III.8 et III.9, III.10 montrent les pertes de masse dans les mortiers jusqu'à 28 jours pour les éprouvettes conservées à l'air libre et de 0 à 32 jours pour les éprouvettes conservées sous toile de jute.

Ces pertes de masses attribuées à la déshydratation des composés hydrauliques. Ces pertes d'eau confirment la présence d'eau limitée aux composants hydrauliques (C-S-H, C-A-H) [46, 47, 48].

2^{ème} phase à long terme

Durant cette période, les mortiers présentent un gain de masse (figures III.7 et III.8). Ceci est dû au fait que l'eau excédentaire a été éliminé et les mortiers ont commencé le processus de carbonatation.



Cependant, cet incrément de masses est faible, donc on peut conclure que la carbonatation est également faible et en cours d'être complète [31].

D'après les résultats obtenus on remarque une diminution de perte de masse des mortiers à base de sable dunaire par rapport au sable alluvionnaire; cette diminution est due à la variation de la quantité d'eau. En fait, le sable dunaire a un coefficient d'absorption d'eau de (4.1%) plus élevé que celui du sable alluvionnaire (0.58%). Donc, la quantité d'eau absorbée va augmenter, tandis que la quantité d'eau des vides capillaires va diminuer ce qui aura pour conséquence la diminution de la perte de masse.

Les éprouvettes des mortiers sans badigeon montrent une perte de masse un peu plus grande par rapport aux éprouvettes avec badigeon cette incrément de variation de masse est due au effet du badigeonnage qui permet la conservation du support.

III.3.2 Variation de longueur des éprouvettes (retrait)

Les mesures de retrait sont déterminées sur des éprouvettes $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ conservées à l'air libre et sous toile de jute.

Les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivantes :

III.3.2.1 Eprouvettes couvertes sous toile de jute

Les résultats de retrait en fonction du temps des mortiers à base de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire pour des éprouvettes couvertes en toile de jute, sont représentés respectivement dans la figure III. 13 et III.14.

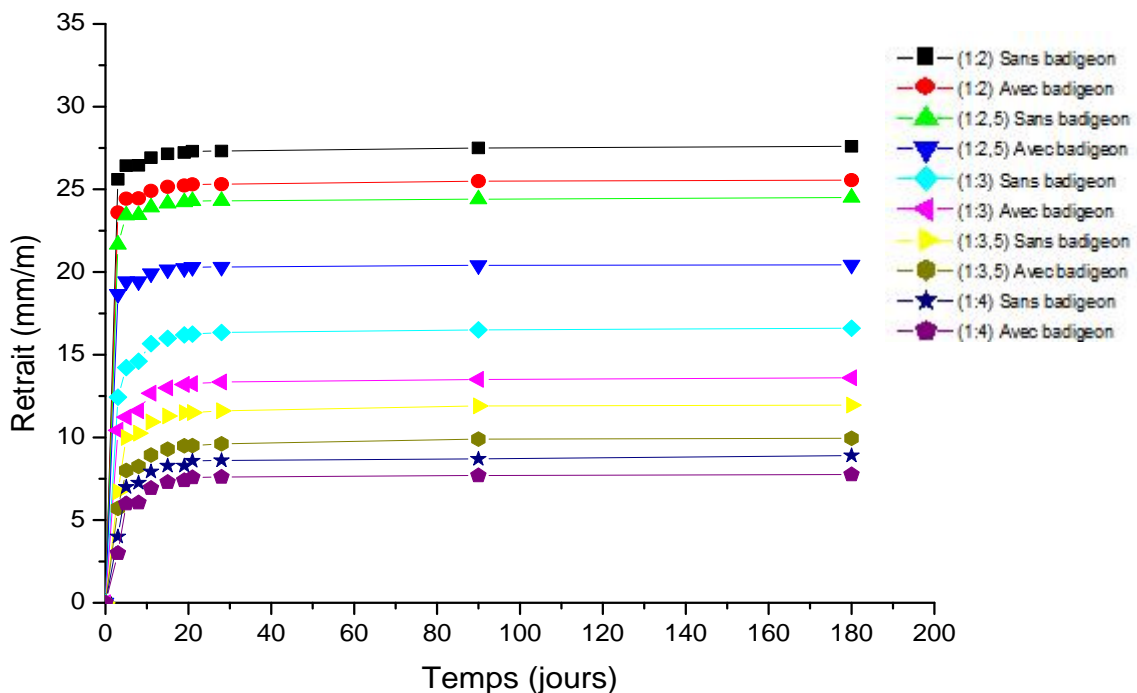


Figure III.13 Variation de longueur des éprouvettes du mortier à base de sable alluvionnaire sous toile de jute

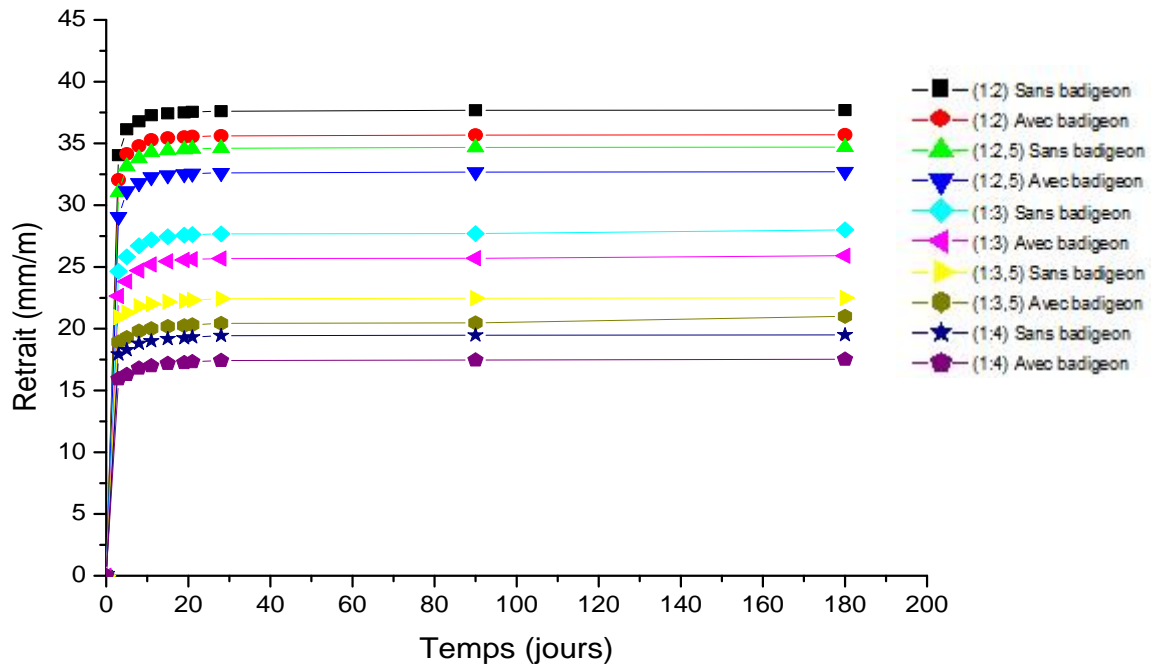


Figure III.14 Variation de longueur des éprouvettes du mortier à base de sable dunaire sous toile de jute

D'après les figures III.13 et III.14, on peut noter ce qui suit :

- ✓ Le mortier de sable alluvionnaire et celui de sable dunaire sous toile de jute sont soumis à un retrait rapide dans les deux premières semaines. Au début, il augmente, d'une manière considérable, mais au-delà du 20^{ème} jour il tend à se stabiliser progressivement.
- ✓ Les éprouvettes de mortiers de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire sans badigeon montrent un retrait un peu plus grand de 7 % environ par rapport aux mortiers avec badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.
- ✓ Le retrait augmente avec l'augmentation du rapport C/S, une augmentation du rapport C/S de 20 % engendre une augmentation de retrait de 11%.

$$\left(\frac{\Delta L}{L} \text{ de dosage (1:2)}\right) > \left(\frac{\Delta L}{L} \text{ de dosage (1:2.5)}\right) > \left(\frac{\Delta L}{L} \text{ de dosage (1:3)}\right) > \left(\frac{\Delta L}{L} \text{ de dosage (1:3.5)}\right) > \left(\frac{\Delta L}{L} \text{ de dosage (1:4)}\right)$$

- ✓ On remarque que le retrait croît avec l'âge du mortier quelque soit le rapport C/S.
- ✓ On observe clairement que le rapport C/S = (1:4) engendre un retrait plus faible.

III.3.2.2 Retrait d'éprouvettes exposées à l'air libre

Les résultats de retrait en fonction du temps des mortiers à base de sable alluvionnaire et ceux de sable de dune pour des éprouvettes maintenues à l'air libre, sont représentés respectivement dans les figures III.15 et III.16.

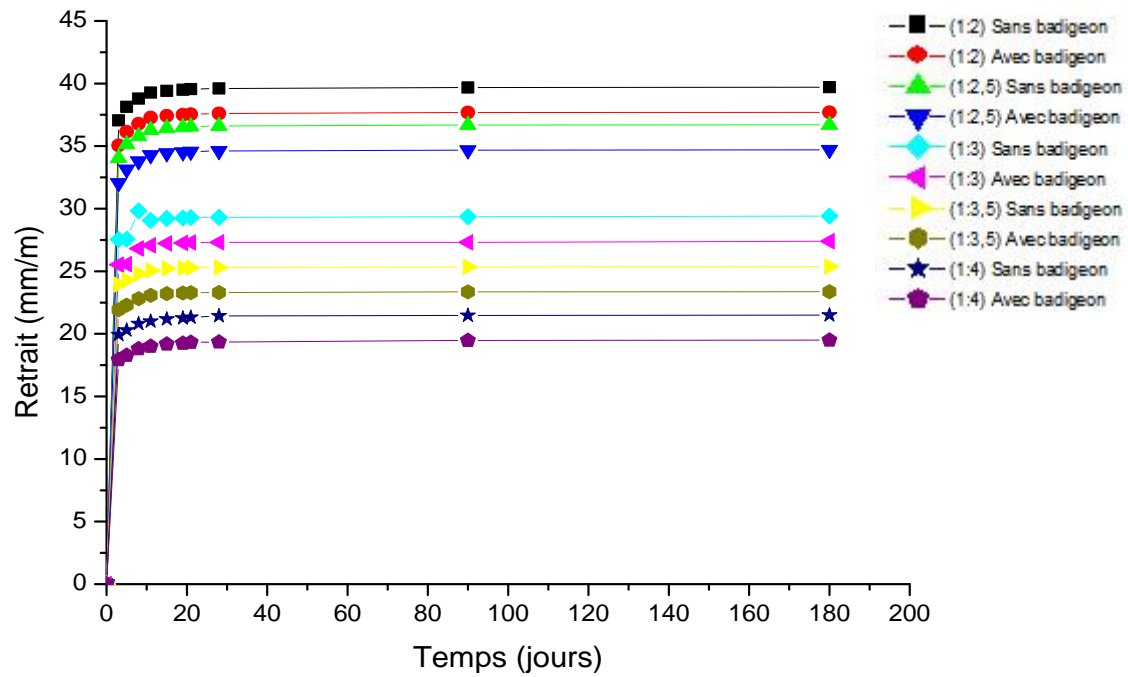


Figure III.15 Variation de longueur des éprouvettes du mortier à base de sable alluvionnaire à l'air libre

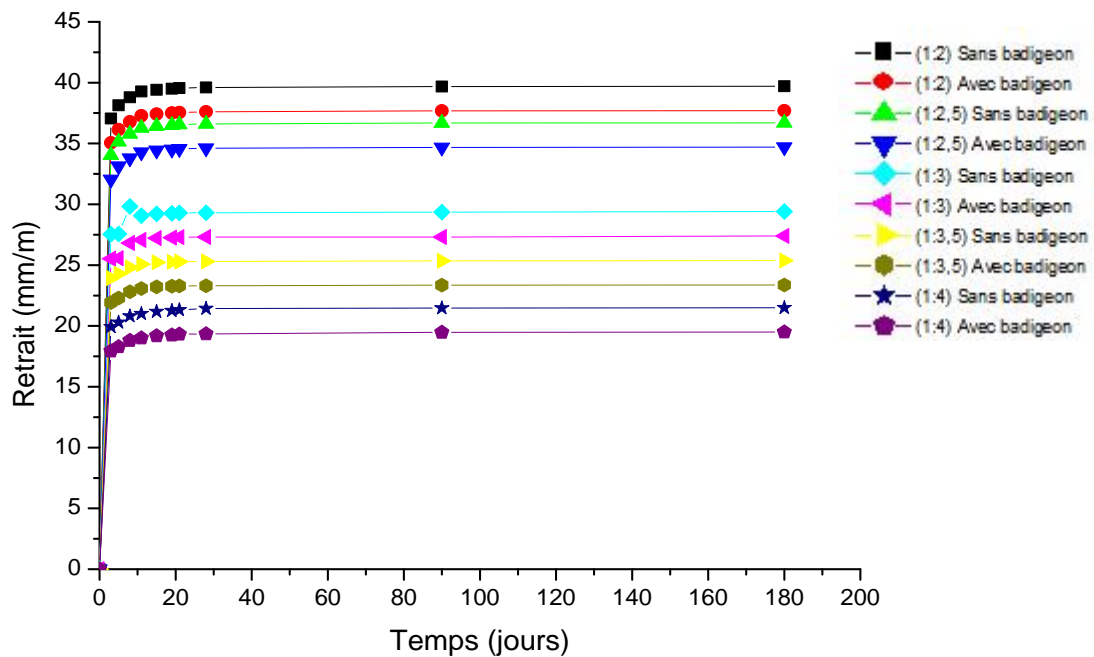


Figure III.16 Variation de longueur des éprouvettes du mortier à base de sable de dune à l'air libre

De ces figures, on remarque ce qui suit :

- ✓ Les mortiers de sable alluvionnaire et dunaire à l'air libre sont soumis à un retrait rapide dans les deux premières semaines. Au début, il augmente, d'une manière considérable, mais au-delà du 15^{ème} jour il tend à se stabiliser progressivement.

- ✓ Les éprouvettes de mortiers de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire sans badigeon exhibent un retrait un peu plus grand de 9% environ par rapport à celles des mortiers traités par badigeon quelle que soit la variation du rapport C/S.
- ✓ Le retrait augmente avec l'augmentation du rapport C/S, une augmentation du rapport C/S de 20 % engendre une augmentation de retrait de 19 %.
- ✓ On remarque que le retrait croît avec l'âge du mortier quelque soit le rapport C/S.
- ✓ Il est à noter que le rapport C/S = (1:4) présente un retrait plus faible.

III.3.2.3 Effet de type de sable sur le retrait

La figure III.17 montre l'effet de type de sable sur le retrait pour les deux modes de conservation.

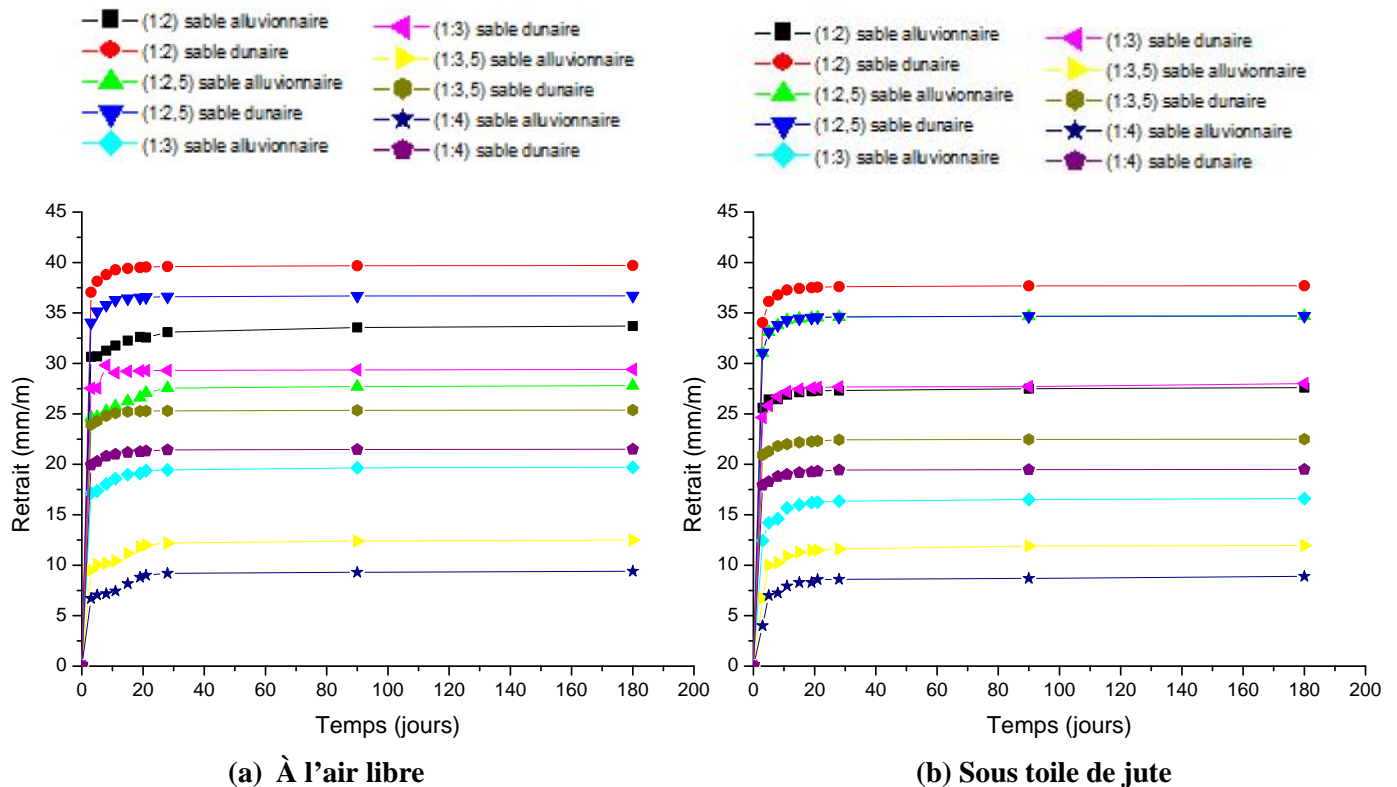


Figure III.17: Effet de type de sable sur le retrait pour les deux milieux de conservations

(a) À l'air libre ; (b) Sous toile de jute

On remarque que le retrait de mortier à base de sable dunaire est relativement plus grand que celui du mortier à base de sable alluvionnaire de 24 et de 20 % pour les éprouvettes conservées respectivement à l'air libre et sous toile de jute.

III.3.2.4 Effet du mode de conservation sur le retrait

Les courbes ci-dessous présentent l'effet du mode de conservation des éprouvettes sur le retrait et ceci pour les mortiers à base de sables alluvionnaire et dunaire (Figure III.18).

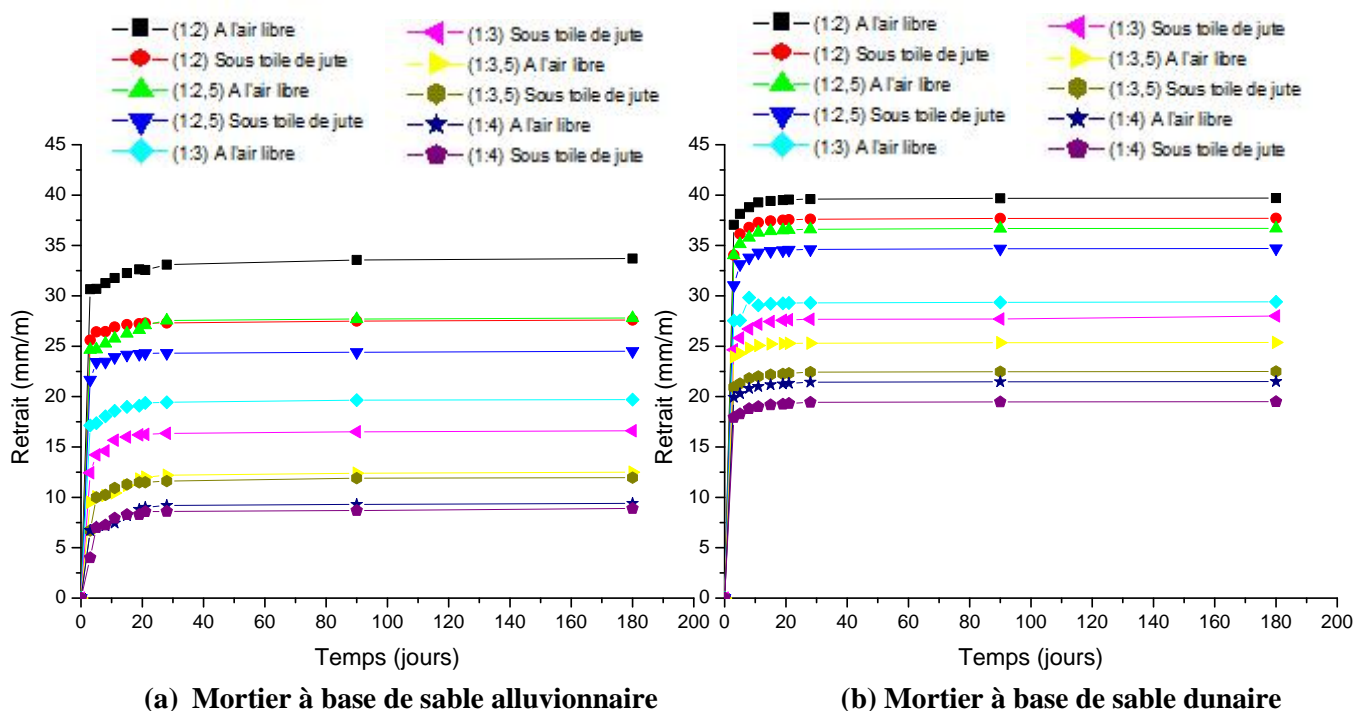


Figure III.18: Effet du mode de conservation sur le retrait pour les deux types de mortiers
(a) Mortier à base de sable alluvionnaire ;(b) Mortier à base de sable dunaire

La figure III.18 montre clairement l'effet du mode de conservation sur le retrait, le mortier conservé à l'air libre exhibe une augmentation de retrait de 9% par rapport au mortier conservé sous toile de jute pour le sable alluvionnaire et de 14 % pour le sable dunaire.

III.3.2.5 Récapitulation de discussion des résultats

À partir des résultats des essais obtenus, on remarque que l'évolution du retrait au cours du temps est semblable pour l'ensemble des mortiers confectionnés.

Tous les mortiers ont montré une augmentation du retrait. Le retrait est très élevé au début du durcissement des mortiers, qu'il s'agisse des mortiers de sable de dune ou de sable des alluvions. Il est aussi plus important dans le cas des mortiers de sable de dune que celui des mortiers de sable des alluvions comme le montre les figures III.13 à III.18. Ce retrait est produit par le départ d'un volume d'eau excédentaire sous l'effet de la température de milieu et l'humidité relative.

On peut noter également que l'augmentation du retrait est lente pour les éprouvettes couvertes en toile de jute comparée à celle des éprouvettes exposées à l'air libre.

Les éprouvettes de mortier sans badigeon montrent un retrait un peu plus grand par rapport au mortier de sable dunaire avec badigeon quelle que soit la variation du rapport C/S. Ceci est due à l'effet du badigeonnage qui assure l'étanchéité et la bonne conservation du support.

L'hydratation et les échanges d'eau avec l'atmosphère provoquent sur les mortiers, indépendamment de toute sollicitation mécanique externe, des déformations dimensionnelles (retrait) qui auront lieu sur les éprouvettes des mortiers.

La consommation de l'eau par l'action l'hydratation, principal facteur de retrait, dépend de la taille des pores et du degré d'interconnexion du réseau poreux [49].

III.3.3 Résistances mécaniques

III.3.3.1 Résistance à la flexion

III.3.3.1.1 Eprouvettes conservées sous toile de jute

Les résistances mécaniques du mortier après durcissement dépendent du rapport E/C, de la qualité et la nature du sable, du mode de conservation du mortier et de l'échéance d'essai.

On a mesuré la résistance à la traction par flexion à 14, 28, 90, 180, 365 jours pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4) avec et sans badigeon pour les deux types de mortiers à base de sables alluvionnaire et dunaire.

La figure III.19 présente l'évolution de la résistance à la flexion en fonction de temps d'un mortier à base de sable alluvionnaire pour des éprouvettes conservées sous toile de jute.

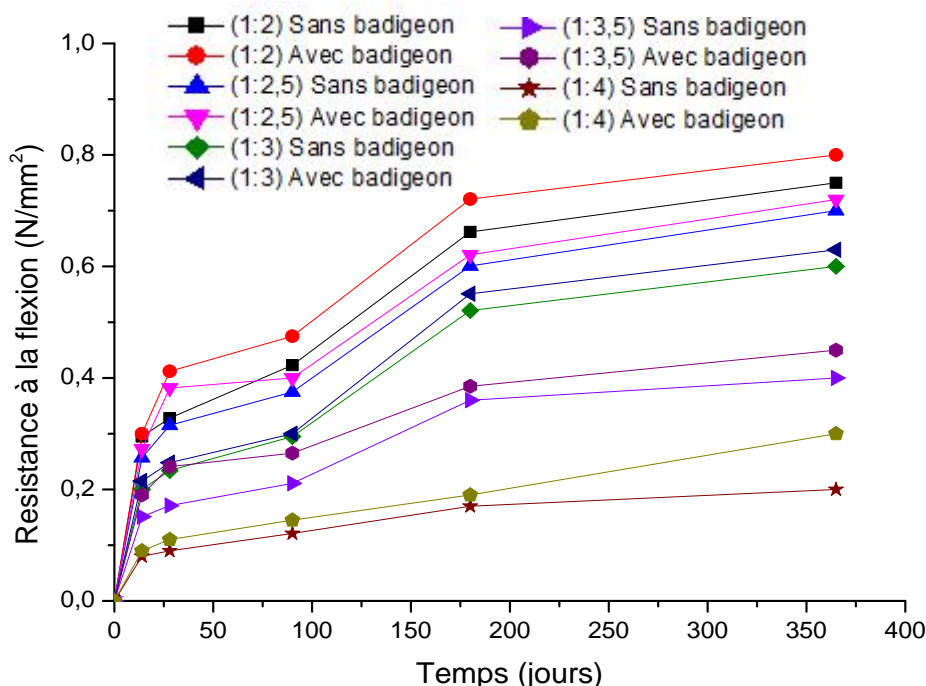


Figure III.19 Résistance à la flexion des mortiers à base de sable alluvionnaire sous toile de jute

La figure III.20 présente l'évolution de la résistance à la flexion en fonction du temps des éprouvettes de mortiers à base de sable de dune conservées sous toile de jute.

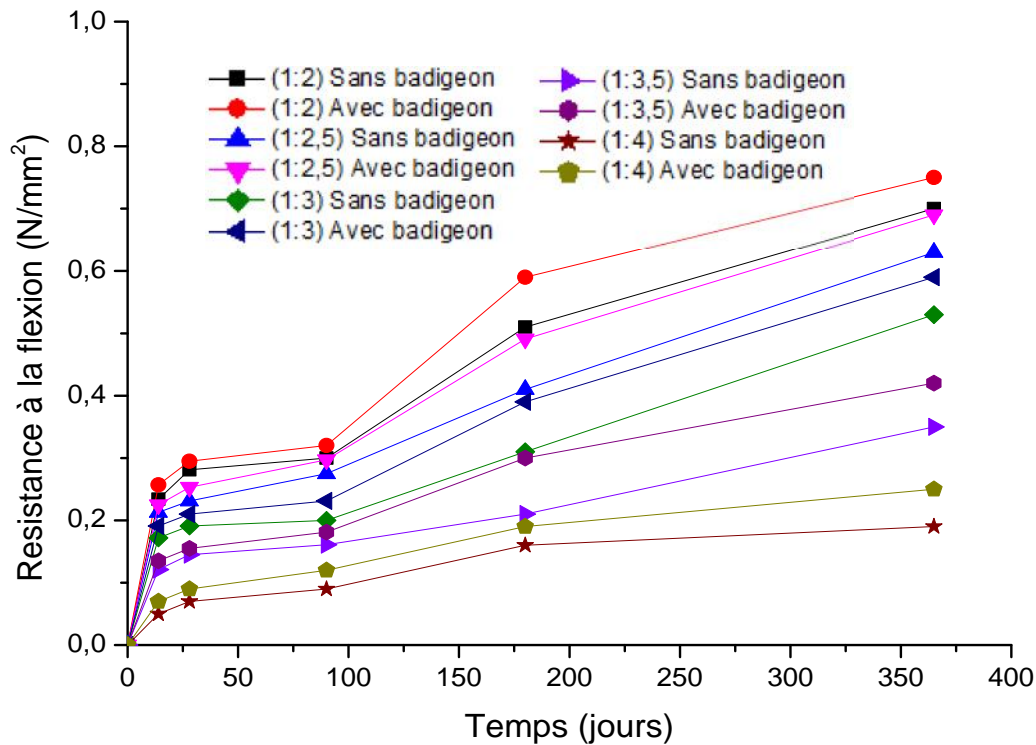


Figure III.20 Résistance à la flexion des mortiers à base de sable dunaire sous toile de jute

D'après les résultats obtenus dans les figures III.19 et III.20, on peut remarquer que :

- La résistance à la flexion augmente en fonction de l'âge des mortiers quelque soit la variation du rapport C/S.
- La résistance à la flexion maximale des mortiers sous toile de jute est de 0,41 ; 0,47 ; 0,72 ; 1,11 N/mm² mesurées respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable alluvionnaire de rapport C/S = (1:2). Cependant, elle est de 0,29 ; 0,32 ; 0,59 ; 0,75 N/mm² à des âges de 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable dunaire de même rapport C/S = (1:2). En conséquence, la résistance à la flexion des mortiers de sable alluvionnaire est de 28% plus grande que celle des mortiers de sable dunaire.
- Les éprouvettes de mortier de sable alluvionnaire ou dunaire avec badigeon montrent une bonne résistance à la flexion par rapport au mortier sans badigeon quelle que soit la variation du rapport C/S.

III.3.3.1.2 Eprouvettes conservées à l'air libre

La figure III.21 présente l'évolution de la résistance à la flexion en fonction du temps des échantillons de mortiers à base de sable alluvionnaire conservés à l'air libre.

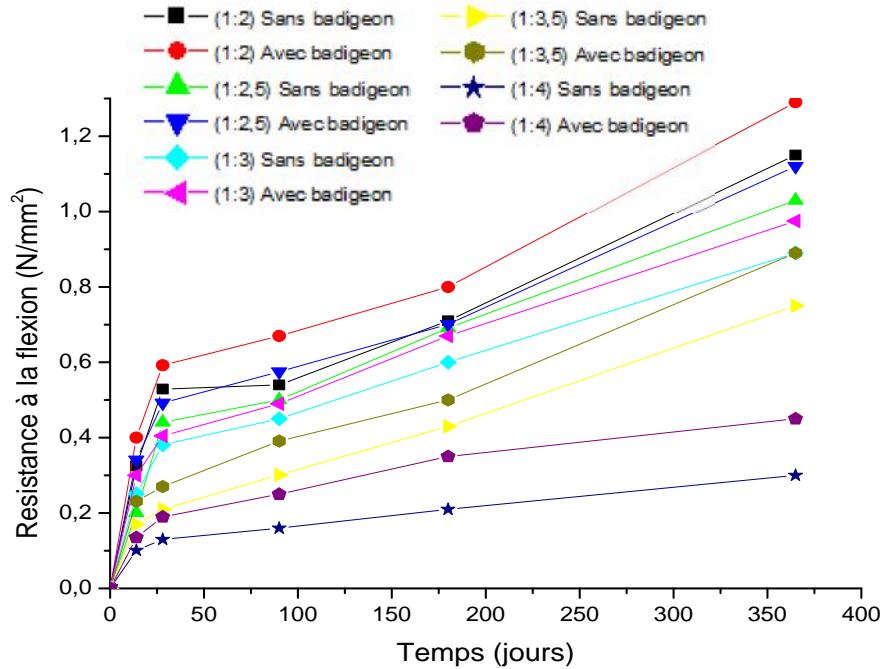


Figure. III.21 : Résistance à la flexion des mortiers à base de sable alluvionnaire à l'air libre

De même, La figure III.22 présente l'évolution de la résistance à la flexion en fonction du temps des échantillons de mortiers à base de sable de dune conservés à l'air libre.

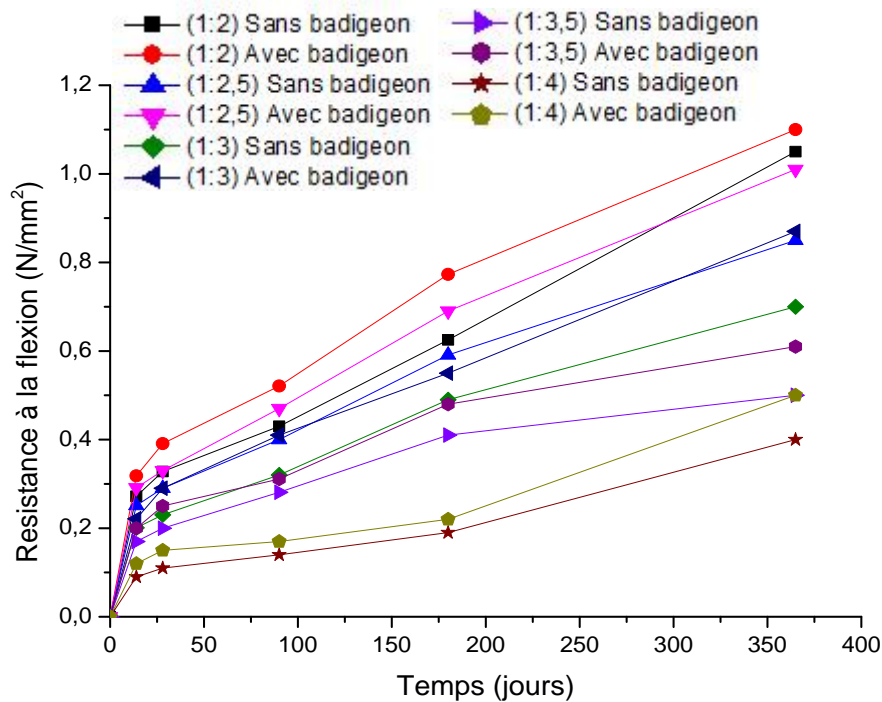


Figure. III.22 Résistance à la flexion des mortiers à base de sable dunaire à l'air libre

- Ces figures montrent le développement de la résistance à la flexion en fonction de l'âge de durcissement des mortiers. On remarque que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute de résistance quelque soit la variation du rapport C/S.

- La résistance à la flexion maximale des mortiers à l'air libre est de 0,59 ; 0,67 ; 0,8 ; 1,29 N/mm² mesurées respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable alluvionnaire de rapport C/S = (1:2). Cependant, elle est de 0,39 ; 0,52 ; 0,77 ; 1,10 N/mm² à des âges de 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable dunaire de même rapport C/S = (1:2). En conséquence, la résistance à la flexion des mortiers de sable alluvionnaire est de 30% plus grande que celle des mortiers de sable dunaire. Donc le mortier à base de sable alluvionnaire donne une bonne résistance par rapport au mortier à base de sable dunaire.

- L'augmentation de la résistance à la flexion est due à l'augmentation du rapport C/S.

- Les éprouvettes de mortier de sable alluvionnaire ou dunaire avec badigeon montrent une bonne résistance à la flexion par rapport au mortier sans badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.

III.3.3.1.3 Effet de type de sable sur la résistance à la flexion

Pour bien apprécier l'effet de type de sable sur la résistance à la flexion, nous avons établi les courbes ci-dessous pour les deux modes de conservation (Figure III.23).

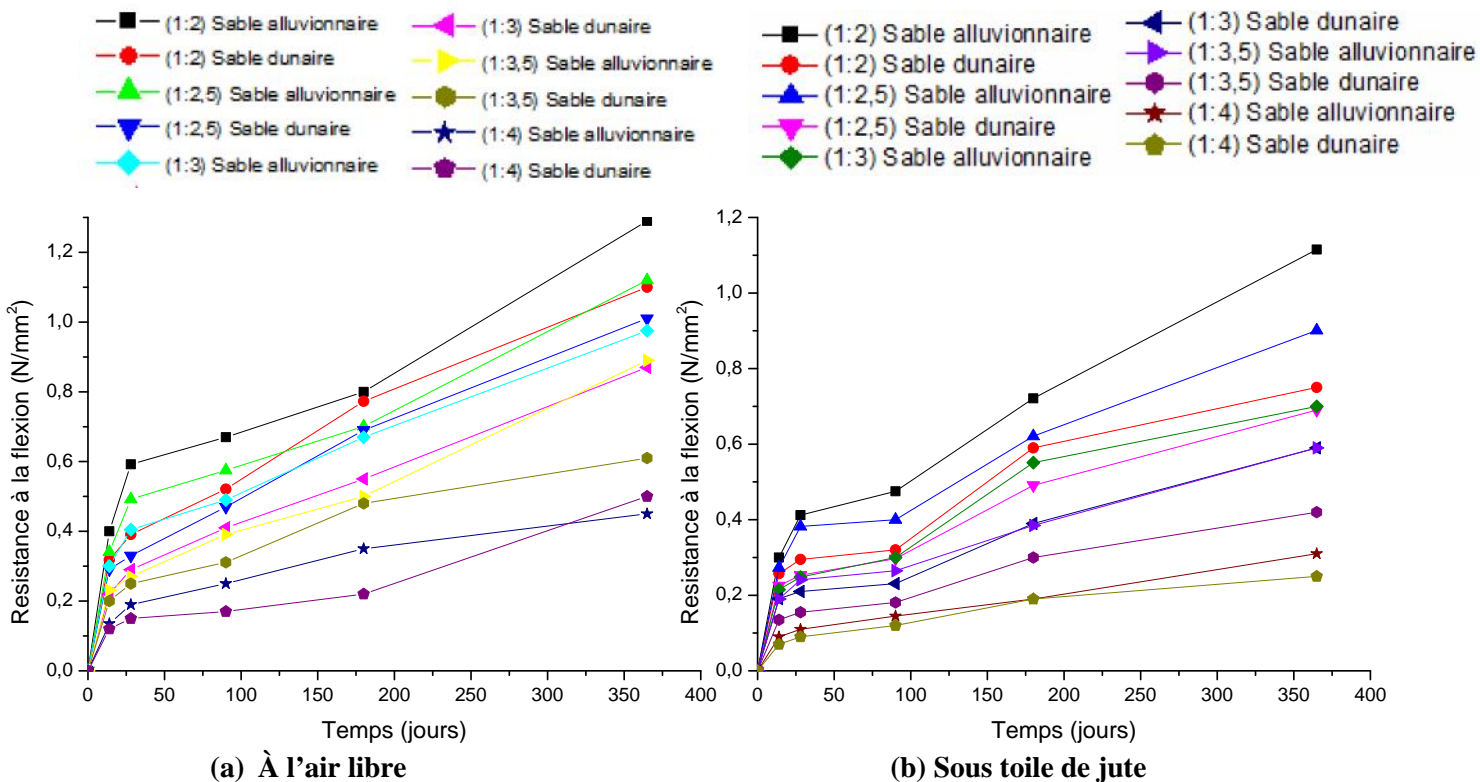


Figure III.23 Effet de type de sable sur la résistance à la flexion pour les deux milieux de conservations (a) À l'air libre ; (b) Sous toile de jute

D'après la figure III.23, la résistance à la flexion des mortiers de sable alluvionnaire est de 30% plus grande que celle des mortiers à base de sable dunaire à l'air libre et de 23% sous toile de jute.

III.3.3.1.4 Effet du mode de conservation sur la résistance à la flexion

Pour bien analyser l'effet du mode de conservation des éprouvettes sur la résistance à la flexion des mortiers, nous avons dressé les courbes ci-dessous pour les deux modes de conservation (Figure III.24).

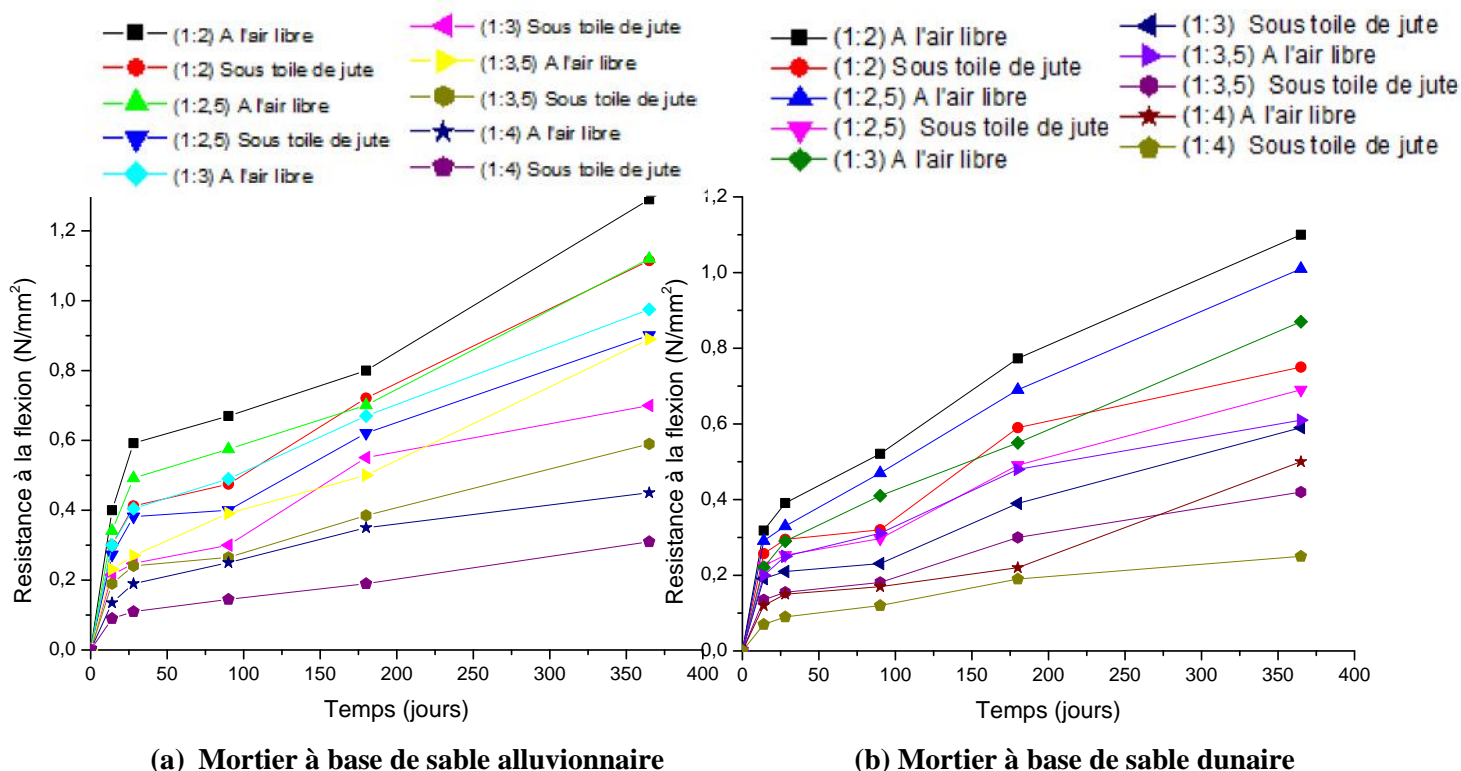


Figure III.24 Effet de mode de conservation sur la résistance à la flexion pour les deux types de mortiers (a) Mortier à base de sable alluvionnaire ; (b) Mortier à base de sable dunaire

La figure III.24 montre que les mortiers à base de sables dunaire et ceux à base de sable alluvionnaire conservés à l'air libre exhibent des résistances à la flexion assez grandes de 25% et de 28% respectivement par rapport à ceux conservés sous toile de jute.

III.3.3.2 Résistance à la compression

III.3.3.2.1 Eprouvettes conservées sous toile de jute

Les résistances à la compression ont été mesurées à 14, 28, 90, 180 et 365 jours pour les dosages (1:2) ; (1:2.5) ; (1:3) ; (1:3.5) ; (1:4) avec et sans badigeon pour les deux types de mortiers à base de sables alluvionnaire et dunaire.

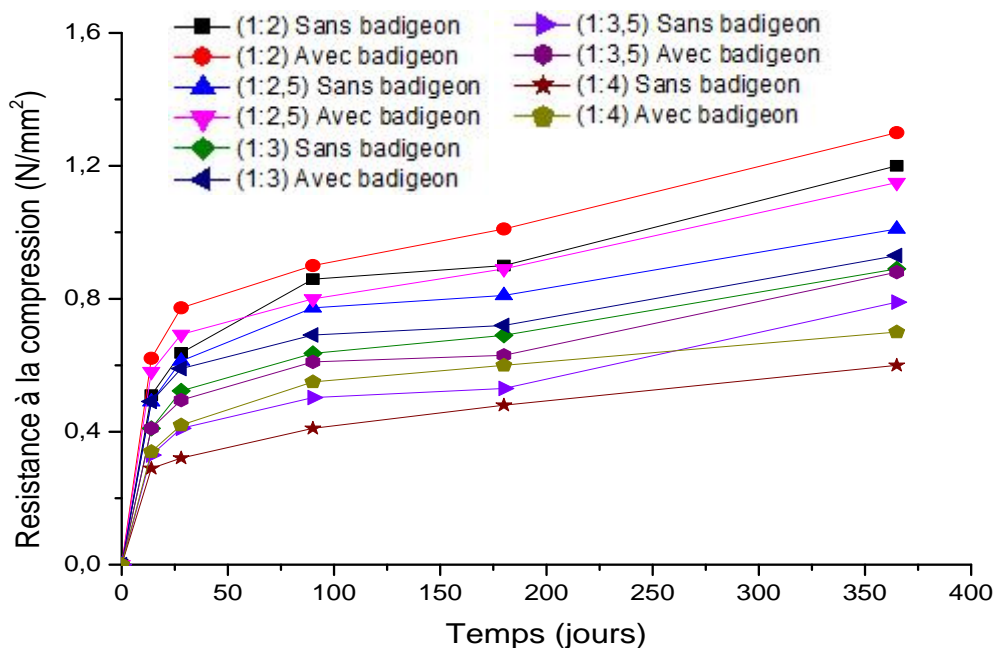


Figure. III.25 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable alluvionnaire sous toile de jute

Les figures III.25 et III.26 présentent respectivement l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps des mortiers à base de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire pour des éprouvettes conservées sous toile de jute.

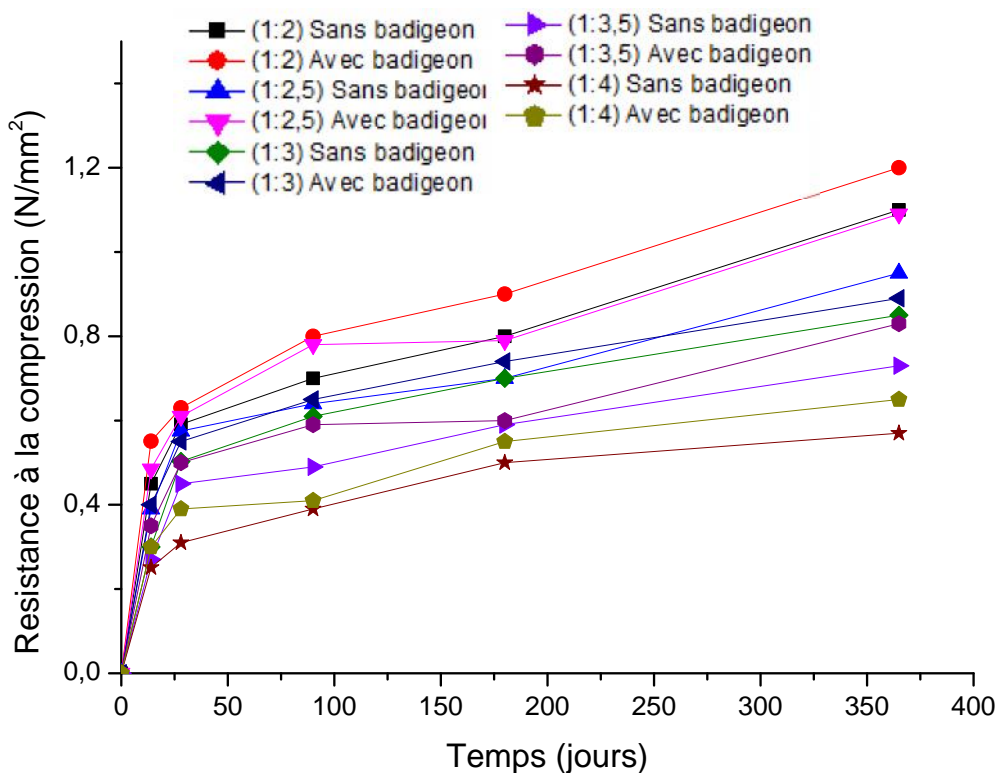


Figure III.26 Résistance à la compression des mortiers à base de sable dunaire sous toile de jute

D'après les figures III.25 et III.26 on remarque que :

- La résistance à la compression des mortiers augmente en fonction de l'âge des mortiers quelque soit la variation du rapport C/S. La résistance continue son accroissement après 28 jours particulièrement pour le mortier de fort rapport C/S.
- L'augmentation de la résistance à la compression est due à l'augmentation du rapport C/S. Cette résistance est très élevée pour un rapport C/S = (1:2) avec badigeon dont les valeurs sont de 0,51 ; 0,86 ; 0,98 ; 0,9 ; 1,2 MPa enregistrées pour les mortiers de sable alluvionnaire, respectivement, à 14, 28, 90, 180, 365 jours.
- Les éprouvettes de mortier de sable alluvionnaire ou dunaire avec badigeon montrent une bonne résistance à la compression par rapport aux mortiers sans badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.

En conséquence, la résistance à la compression des mortiers de sable alluvionnaire est de 18% plus grande que celle des mortiers de sable dunaire. Donc le mortier à base de sable alluvionnaire donne une bonne résistance à la compression par rapport au mortier à base de sable dunaire.

III.3.3.2 Eprouvettes conservées à l'air libre

On a mesuré la résistance à la compression à 14, 28, 90, 180, 365 jours pour les dosages (1:2) ; (1:2,5) ; (1,3) ; (1:3,5) ; (1:4) avec et sans badigeon pour les deux types de mortiers à base de sables alluvionnaire et dunaire.

Les figures III.27 et III.28 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps d'un mortier à base de sable alluvionnaire pour des éprouvettes conservées à l'air libre.

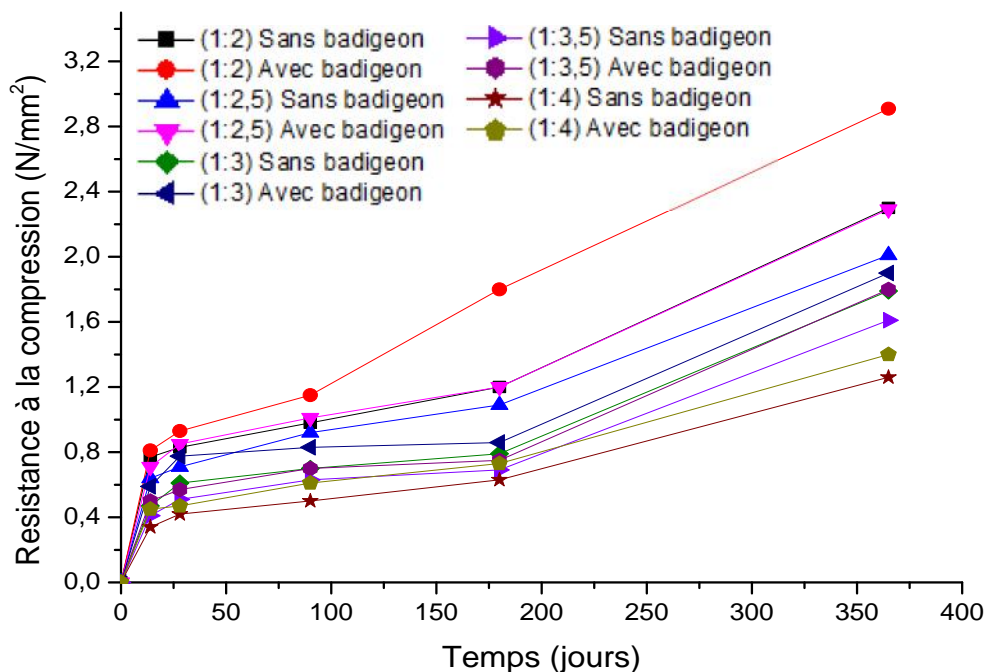


Figure III.27 Résistance à la compression des mortiers à base de sable alluvionnaire à l'air libre

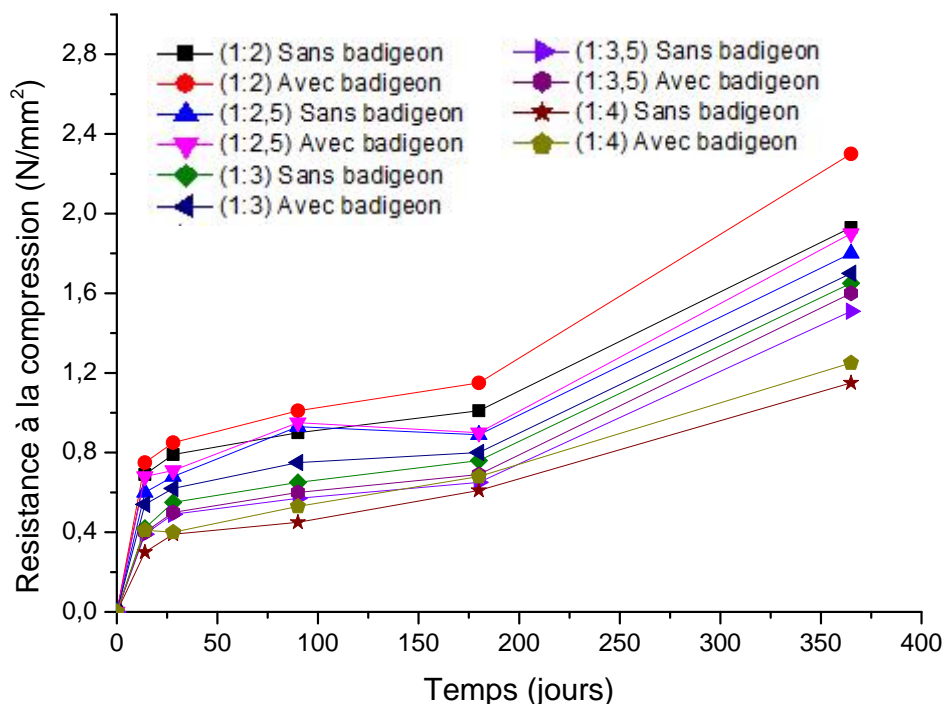


Figure. III.28 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable dunaire à l'air libre

D'après les résultats obtenus dans les figures III.27, III.28, on peut remarquer que :

- La résistance à la compression des mortiers augmente en fonction de l'âge des mortiers quelque soit la variation du rapport C/S. La résistance continue son évolution après 28 jours de coulage.
- Les résistances maximales à la compression sont obtenues pour les mortiers à base de sable alluvionnaire de rapport C/S = (1:2), traités par badigeon et conservés à l'air libre, dont les valeurs sont 0,93 ; 1,15 ; 1,80 et 2,91 MPa mesurées respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours. Cependant, pour les mortiers à base de sable dunaire ayant le même rapport C/S = (1:2), traités par badigeon et conservés à l'air libre, les résistances à la compression sont de 0,85 ; 1,01 ; 1,15 et 2,30 MPa obtenues respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours. En conséquence la résistance à la compression des mortiers de sable alluvionnaire est de 21% plus élevée que celle des mortiers à base de sable dunaire.
- Les éprouvettes de mortier de sable alluvionnaire ou dunaire avec badigeon montrent une bonne résistance à la compression par rapport au mortier sans badigeon quelle que soit la variation du rapport C/S.

III.3.3.2.3 Effet de type de sable sur la résistance à la compression

A fin d'analyser l'effet de type de sable sur la résistance à la compression des mortiers, on a établi les graphes de la figure III.29 et ceci pour les deux modes de conservation : à l'air libre et sous toile de jute.

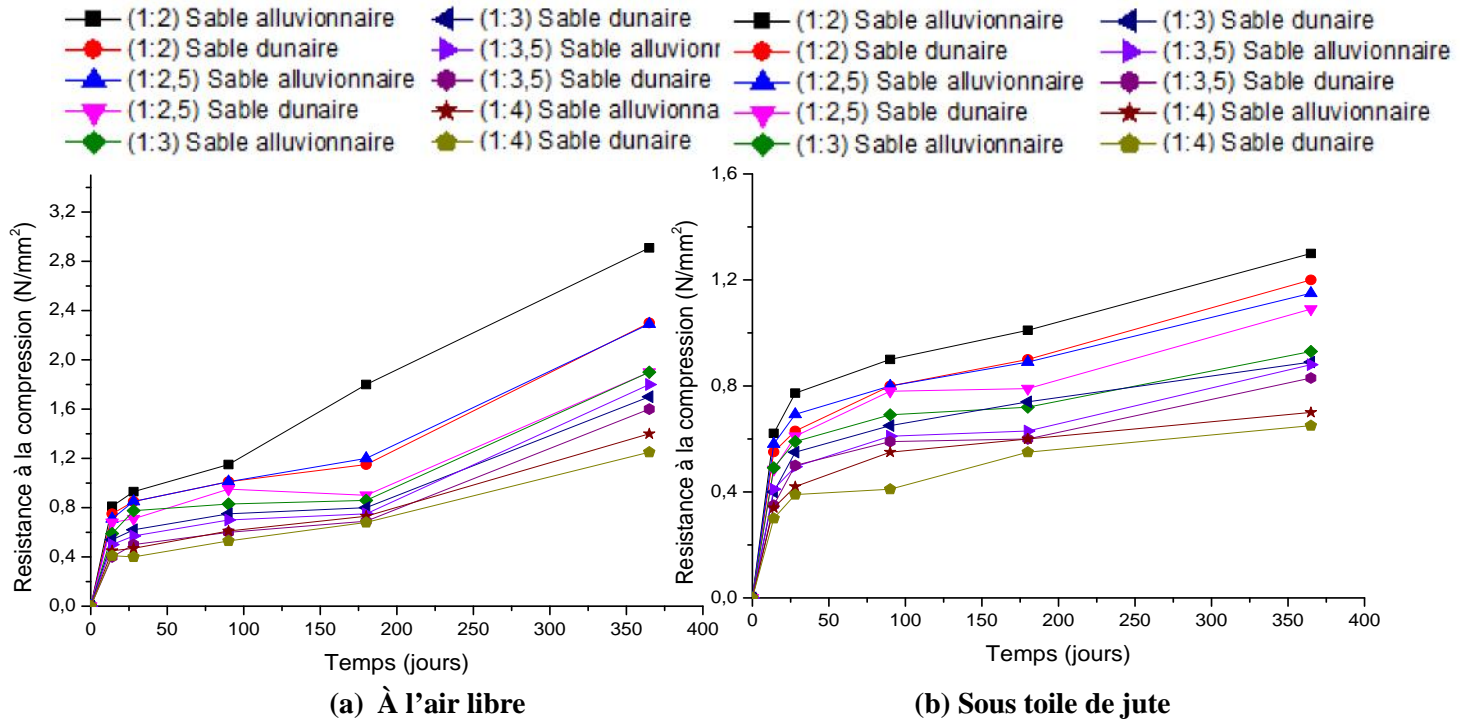


Figure III.29 Effet de type de sable sur la résistance à la compression pour les deux milieux de conservations (a) À l'air libre ;b) Sous toile de jute

D'après la figure III.29, la résistance à la compression des mortiers de sable alluvionnaire est de 20% et 13% plus grande que celle des mortiers à base de sable dunaire respectivement à l'air libre et de sous toile de jute.

III.3.3.2.4 Effet du mode de conservation sur la résistance à la compression

L'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression des mortiers est étudié à l'aide de la figure III.30 ci-après.

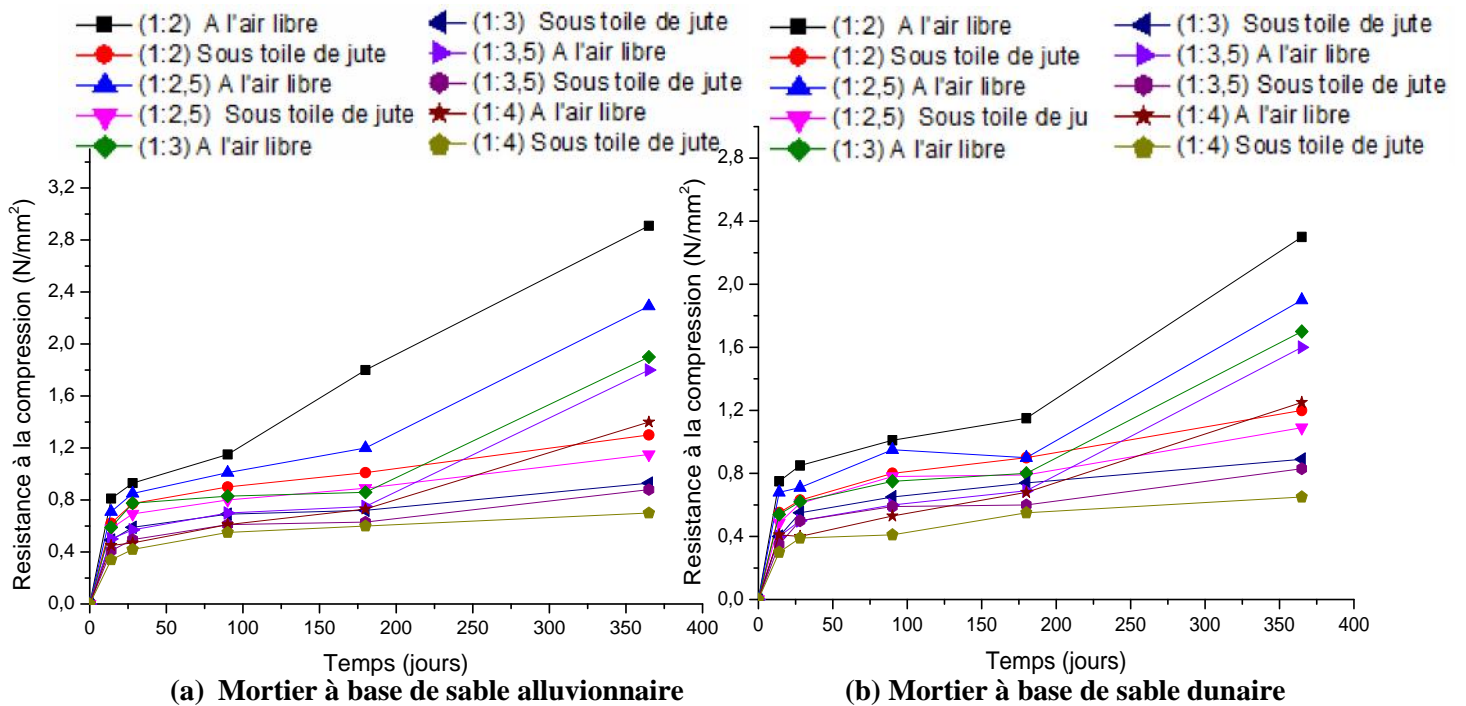


Figure III.30 Effet de mode de conservation sur la résistance à la compression pour les deux types de mortiers (a)Mortier à base de sable alluvionnaire ; (b) Mortier à base de sable dunaire

La figure III.30 montre que les mortiers à base de sables dunaire et ceux à base de sable alluvionnaire conservés à l'air libre présentent des résistances à la compression grandes de 27% et 30% respectivement par rapport à ceux conservés sous toile de jute.

III.3.3.3 Récapitulation de l'analyse des résultats

À partir de l'analyse des résultats de la résistance mécanique on remarque que :

Les éprouvettes conservées à l'air libre et sous toile de jute présentent le même développement de la résistance mécanique. Pour tous les dosages, la résistance à la compression ou flexion augmentent en fonction de l'âge des éprouvettes quelque soit la nature de sable alluvionnaire ou dunaire.

La résistance (flexion ou compression) dans les mortiers de sable alluvionnaire à l'air libre ou toile de jute est plus élevée que celle des mortiers de sable dunaire, cette amélioration est due à la présence des éléments grossiers de sable alluvionnaire dans le mortier de chaux.

Les éprouvettes de mortier de sable alluvionnaire ou dunaire traitées par badigeon à chaux montrent une bonne résistance mécanique (flexion, compression) par rapport au mortier sans badigeon quelque soit la variation du rapport C/S et cela prouve que le badigeonnage donne une bonne résistance au surface.

Les résultats de la résistance mécanique montrent trois phases de durcissement à vérifier :

A court terme (3 à 28 jours), les mortiers atteignent une valeur de 40 % de leur résistance maximale pour les mortiers à haute teneur en chaux ($C/S = (1 : 2), (1 : 2.5)$) et à 70- 75 % pour les dosages ($C/S = (1 : 3), (1 : 3.5), (1 : 4)$), dans cette période les mortiers perdent l'eau excédentaire. Les figures III.7 à III.10 montrent les pertes de masse dans les mortiers conservés à l'air libre jusqu'à 28 jours et celles conservées sous toile de jute jusqu'à 32 jours.

Les résistances déterminées à court terme (entre 3 et 28 jours) n'est pas conclusives car elles sont fortement influencées par la teneur en eau du mélange. Également, le degré de carbonatation était négligeable car la quantité de $Ca(OH_2)$ transforme légèrement [50].

La durée de 28 jours n'est donc pas suffisante pour que les mortiers à chaux à base de sable dunaire ou alluvionnaire atteignent leurs résistances maximales.

La résistance est due à l'hydratation de plusieurs composés hydrauliques qui forment les silicates de calcium hydratés (généralement phase de CSH) [51].

A moyen terme (28 à 180 jours), Dans cette période les mortiers commencent le processus de carbonatation.



A cette période la carbonatation est faible et loin d'être complète [31].

A long terme (> 180 jours), le processus de carbonatation est en cours. Le degré de carbonatation est dû à la transformation de portlandite en calcite,

Il est bien connu que le mortier à chaux peut prendre des années pour atteindre une carbonatation totale [52].

On constate une importante amélioration des résistances mécanique (flexion ou compression).

Les mortiers de dosage (C/S = (1 :3), (1 :3.5), (1 :4)) présente une diminution de résistance à la flexion et la compression par rapport aux dosages (C/S = (1 :2) et (1 :2.5)).

Donc, les résultats de cette étude indiquent que le dosage (1 :2) à haute teneur en chaux fournit la meilleure résistance mécanique à long terme. En général, la diminution de la quantité de liant dans les mortiers réduit sa résistance.

En fait, un incrément de pourcentage de la quantité de liant offre une structure plus dense dans la noyau de mortier, donnant une plus haute résistance [53].

Ce comportement est très semblable pour les mortiers de ciment : l'augmentation de liant dans le mélange améliore la résistance [54].

En effet, il est bien connu que le CaCO_3 qui se forme par carbonatation de la Portlandite est un excellent liant. C'est lui qui d'ailleurs assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers de chaux [55].

Pour le milieu de conservation à l'air libre, il ya toujours une amélioration des résistances en fonction de l'âge des éprouvettes par rapport au milieu de conservation sous toile de jute.

L'hydratation et les échanges d'eau avec l'atmosphère provoquent une amélioration de la résistance des mortiers, indépendamment de toute sollicitation mécanique externe.

Il est à noter que lorsqu' il y a une perte de masse, on remarque une augmentation de la compacité qui donne une résistance mécanique élevées.

III.4 Essais d'absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau est un phénomène physique représentatif du comportement hydrique du mortier durci. C'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Sa mesure est un outil de caractérisation macroscopique de son réseau poreux. C'est un paramètre important vis-à-vis de la durabilité des mortiers, car un grand nombre d'agressions telles que la carbonatation, l'attaque des sulfates et des acides, l'alcali-réaction, le gel-dégel, peuvent être minimisées si l'absorption d'eau du mortier est faible.

III.4.1 Essais d'absorption sur le mortier de sable alluvionnaire

Les résultats des essais d'absorption par capillarité en fonction du temps pour les mortiers à base de sable alluvionnaire sont représentés dans la figure III.31.

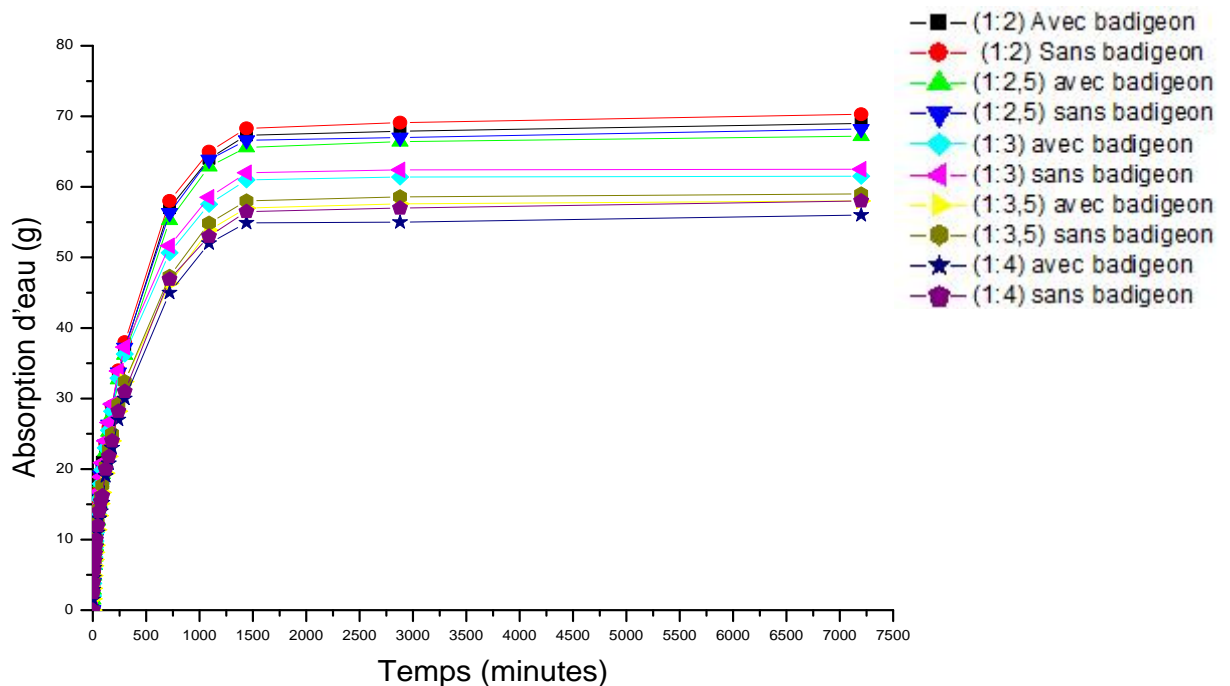


Figure III.31 Absorption d'eau par capillarité du mortier à base de sable alluvionnaire

La figure III.31 montre que l'absorption capillaire évolue très rapidement aux jeunes âges puis elle tend à se stabiliser quelque soit la variation de rapport C/S, pour une durée d'immersion supérieure à 1600 minutes (1jour), environ. La valeur maximale ultime de l'absorption capillaire de 70,3 g est obtenue pour des mortiers à base de sable alluvionnaire de rapport C/S = (1:2) sans aucun traitement par badigeon à chaux.

Les rapports C/S = (1:2) et (1:2,5) donnent une absorption capillaire de 15% plus élevées par rapport aux autres rapports de (1:3) ; (1:3,5) ; (1:4).

Les éprouvettes de mortier de sable alluvionnaire sans badigeon montrent une absorption légèrement supérieur (3%) par rapport aux mortiers avec badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.

III.4.2 Essais d'absorption sur le mortier de sable dunaire

Les résultats des essais d'absorption par capillarité en fonction du temps pour les mortiers à base de sable de dune sont illustrés par la figure III.32.

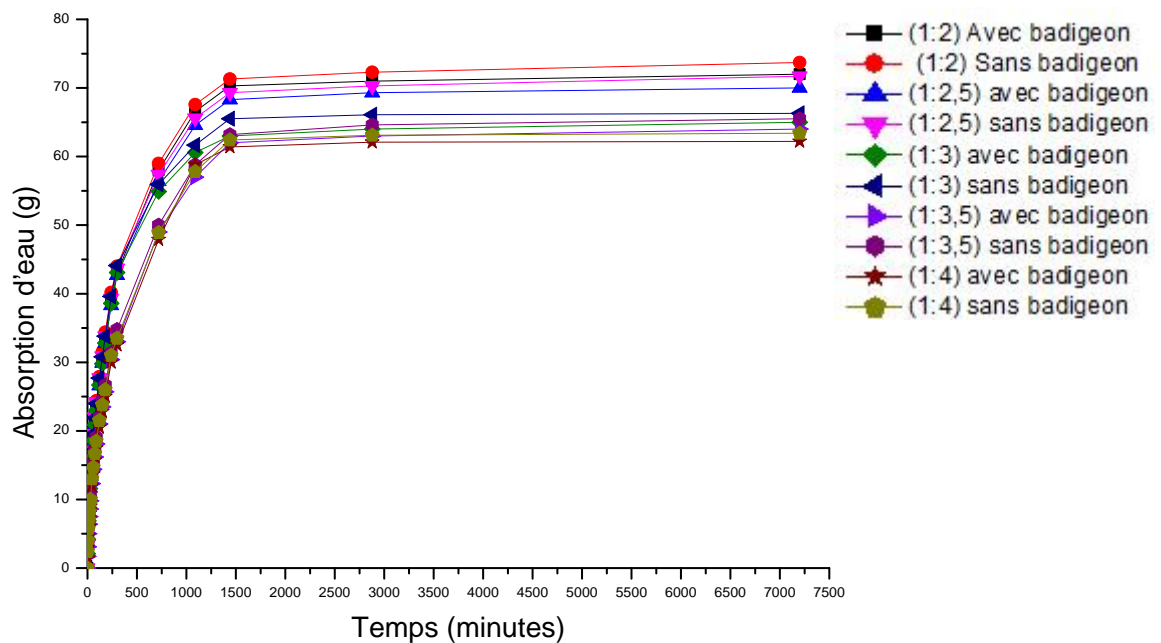


Figure III.32 Absorption d'eau par capillarité du mortier à base de sable dunaire

De même, la figure III.32 montre que l'absorption capillaire évolue très rapidement aux jeunes âges puis elle tend à se stabiliser quelque soit la variation de rapport C/S, pour une durée d'immersion supérieure à 1600 minutes (1jour), environ. La valeur extrême de l'absorption capillaire de 73.7 g est obtenue pour des mortiers à base de sable dunaire sans badigeon pour un rapport C/S = (1:2).

Les rapports C/S = (1:2) et (1:2,5) donnent une absorption capillaire de 13% plus élevée par rapport aux autres rapports de (1:3) ; (1:3,5) ; (1:4).

Les éprouvettes de mortier de sable dunaire sans badigeon montrent une absorption légèrement supérieure par rapport à celle du mortier avec badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.

III.4.3 Effet de type de sable sur l'absorption capillaire

La figure III.33 montre l'effet de type de sable (alluvionnaire ou dunaire) sur l'absorption capillaire des mortiers pour différents rapports C/S avec et sans badigeon.

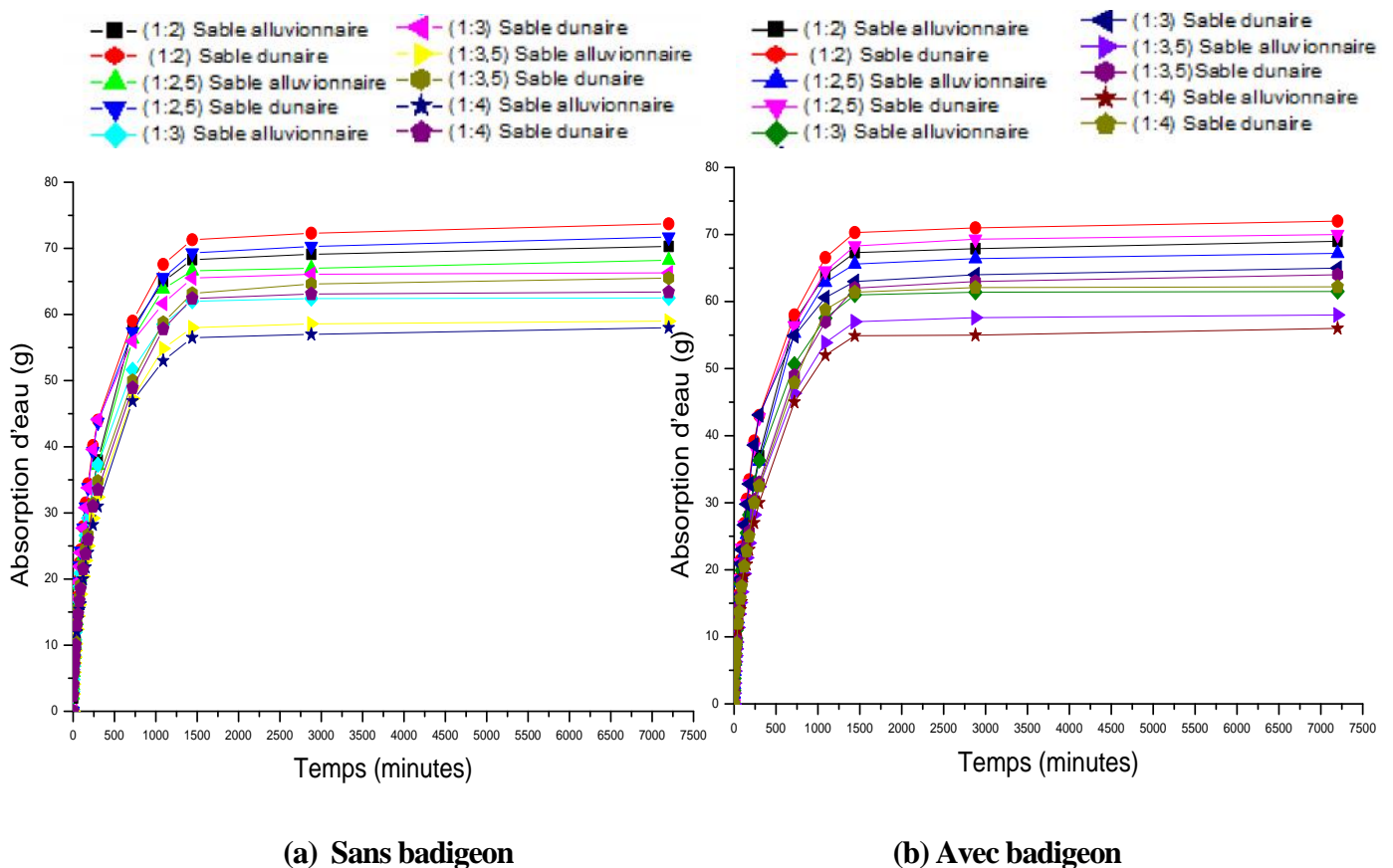


Figure III.33 Effet de type de sable sur l'absorption capillaire des mortiers
(a) Sans badigeon ; (b) Avec badigeon

L'absorption d'eau par capillarité des mortiers de sable de dune est supérieure de 4,61% que celle des mortiers de sable des alluvions sans badigeon et de 4,15% avec badigeon. Cet accroissement du taux d'absorption est probablement dû à la granularité des grains de sable de dune.

III.4.4 Récapitulation de l'analyse des résultats et discussion

Les figures III.31 à III.33 montrent que l'absorption capillaire pour le mortier à sable dunaire ou alluvionnaire sans badigeon est nettement supérieure à celle du mortier avec badigeon. Ceci est attribué au rôle de badigeonnage qui réduit l'absorption d'eau et assure l'étanchéité de la surface.

L'absorption d'eau par capillarité des mortiers de sable de dune est plus élevée que celle des mortiers de sable des alluvions. Cet accroissement du taux d'absorption est probablement dû à la granularité des grains de sable de dune.

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est simple à réaliser avec une bonne reproductibilité des résultats. De plus, il est suffisamment sensible pour étudier l'influence des facteurs principaux intervenant dans le processus : composition, et éventuellement âge.

L'essai permet également l'approche de certaines grandeurs représentatives de la structure poreuse du mortier, telles que la dimension des gros capillaires et le volume des capillaires fins. Il s'avère être un outil pratique de caractérisation du comportement hydrique des mortiers. Il permet donc de comparer les mortiers à la chaux à sable de dunes avec les mortiers à la chaux à sable alluvionnaire vis-à-vis de leur durabilité.

D'une manière générale, le processus d'absorption d'eau d'un mortier à la chaux à base de sable de dunes est similaire à celui d'un mortier à la chaux à base de sable alluvionnaire et obéit aux mêmes lois.

III.5 Diffraction aux rayons x

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) est une méthode appropriée pour l'identification des différentes phases minérales de la structure cristalline des matériaux.

Un diffractomètre « X' PERT PRO », de l'université de Laghouat, a été utilisé pour la détermination des phases minérales de deux mortiers à base de sable alluvionnaire et dunaire avec badigeon conservés à l'air libre. L'analyse a été effectuée sur des échantillons broyés en poudre de diamètre inférieur à 80 μm .

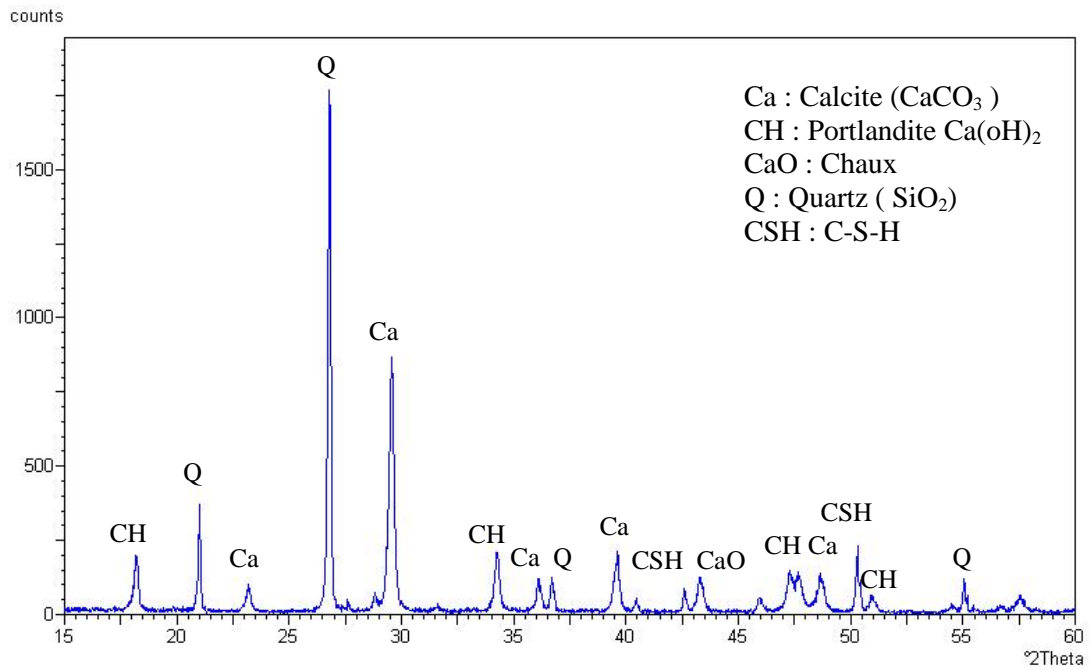


Figure III.34 Analyse par DRX de l'échantillon du mortier à base de sable alluvionnaire avec badigeon conservé à l'air libre C/S= (1:2)

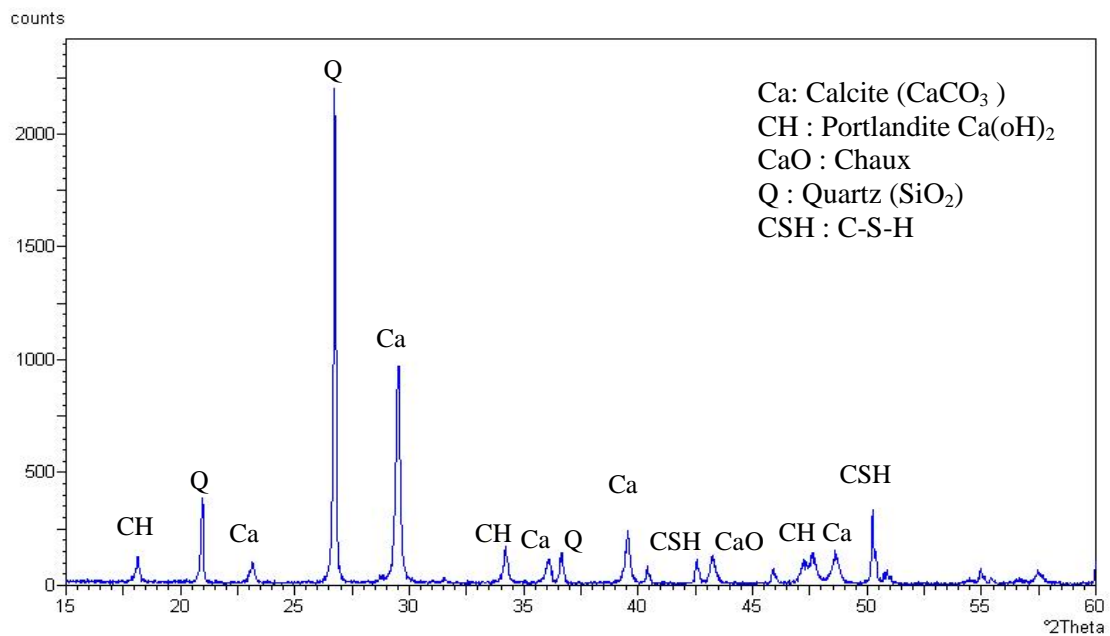


Figure III.35 Analyse par DRX de l'échantillon du mortier à base de sable dunaire avec badigeon conservé à l'air libre C/S= (1:2)

Les figures III. 34 et III. 35 montrent les diffractogrammes des deux mortiers précités. Puisque tous les mortiers sont confectionnés à partir de sable, on note l'existence de grands pics de quartz et de calcite dans tous les échantillons, ce qui est tout à fait évident, puisque tous les mortiers sont confectionnés à partir de sable siliceux. L'intensité du pic majeur de silice est de l'ordre de 1800 pour le mortier de sable alluvionnaire et de 2250 pour le mortier de sable de dune. Le taux de silice dans le deuxième mortier est plus élevé que celui du premier, ce qui implique la silice dans le sable de dune est plus grande que dans le sable alluvionnaire.

Du point de vue intensité, les pics des C-H dans le mortier à base de sable dunaire sont plus importants que ceux du mortier à base de sable alluvionnaire, ce qui fait que le taux de C-H dans le mortier à base de sable dunaire est inférieur à celui du mortier à base de sable alluvionnaire ; ceci est probablement le résultat de la réaction pouzzolanique. En effet, le C-H sont consommés pendant cette réaction et ils rentrent en combinaison avec la silice du sable pour donner des silicates de carbonates hydratés (C-S-H).

En ce qui concerne la teneur en portlandite est faible dans les deux mortiers et la teneur en carbonate de calcium est plus élevée. On parle parfois de la carbonatation du liant de chaux où la portlandite va donner de la calcite, mais dans notre cas ça sera trop tôt de parler de carbonatation et si elle a eu lieu, ce phénomène ne se produit qu'en surface.

III.6 Conclusions

D'après les principaux résultats obtenus aux différents essais effectués sur les mortiers à base de sables alluvionnaire et dunaire maintenus dans les deux milieux de conservation (à l'air libre ou couverts d'une toile de jute), on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le rapport Eau / Chaux (E/C) varie avec la nature du sable (alluvionnaire ou dunaire). Le rapport E/C du mortier de sable dunaire variant de 0,9 à 1,25 est plus grand à celui du mortier de sable alluvionnaire variant de 0,85 à 1,17.
- Les éprouvettes de mortiers de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire sans badigeon montrent une perte de masse un peu plus grande de 5% à l'air libre et de 2,5% sous toile de jute par rapport aux mortiers avec badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.

- la perte de masse des mortiers à base de sable alluvionnaire est plus grande que celle des mortiers à base de sable dunaire de 19 % pour les éprouvettes conservées à l'air libre et de 15 % pour les éprouvettes conservées sous toile de jute
- Les éprouvettes de mortiers de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire sous toile de jute sans badigeon montrent un retrait un peu plus grand de 7 % environ par rapport aux mortiers avec badigeon quelque soit la variation du rapport C/S et de 9% pour les éprouvettes conservées à l'air libre.
- Le retrait augmente avec l'augmentation du rapport C/S. Une augmentation du rapport C/S de 20 % engendre une augmentation de retrait de 11% pour les éprouvettes conservées sous toile de jute et de 19 % pour les éprouvettes conservées à l'air libre.
- Le mortier conservé à l'air libre montre une augmentation de retrait de 14% par rapport au mortier conservé sous toile de jute pour le sable alluvionnaire et de 9 % pour le sable dunaire.
- Le mode de conservation joue un rôle plus important dans cet essai puisque le retrait dans les éprouvettes couvertes en toile de jute est faible et lente par rapport aux éprouvettes exposées à l'air libre.
- Le retrait du mortier à base de sable dunaire est relativement plus grand que celui du mortier à base de sable alluvionnaire de 24 et de 20% pour les éprouvettes conservées respectivement à l'air libre et sous toile de jute. Ceci est dû probablement, à la présence des éléments fins dans le sable dunaire.
- La résistance à la flexion maximale des mortiers sous toile de jute est de 0,41 ; 0,47 ; 0,72 ; 1,11 N/mm² mesurées respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable alluvionnaire de rapport C/S = (1:2). Cependant, elle est de 0,29 ; 0,32 ; 0,59 ; 0,75 N/mm² à des âges de 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable dunaire de même rapport C/S = (1:2). En conséquence, la résistance à la flexion des mortiers de sable alluvionnaire est de 28% plus grande que celle des mortiers de sable dunaire.
- La résistance à la flexion maximale des mortiers à l'air libre est de 0,59 ; 0,67 ; 0,8 ; 1,29 N/mm² mesurées respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable alluvionnaire de rapport C/S = (1:2). Cependant, elle est de 0,39 ; 0,52 ; 0,77 ; 1,10 N/mm² à des âges de 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable dunaire de même rapport C/S = (1:2). En conséquence, la résistance à la flexion des mortiers de sable alluvionnaire est de 30% plus grande que celle des mortiers de sable dunaire. Donc le mortier à base de sable alluvionnaire donne une bonne résistance par rapport au mortier à base de sable dunaire.
- L'augmentation de la résistance à la flexion est due à l'augmentation du rapport C/S.

- Les éprouvettes de mortier de sable alluvionnaire ou dunaire avec badigeon montrent une bonne résistance à la flexion par rapport au mortier sans badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.
- La résistance à la flexion des mortiers de sable alluvionnaire est de 30% plus grande que celle des mortiers à base de sable dunaire à l'air libre et de 23% sous toile de jute.
- Les mortiers à base de sables dunaire et ceux à base de sable alluvionnaire conservés à l'air libre exhibent des résistances à la flexion assez grandes de 25% et de 28% respectivement par rapport à ceux conservés sous toile de jute.
- Les résistances maximales à la compression sont obtenue pour les mortiers à base de sable alluvionnaire de rapport C/S = (1:2), traités par badigeon et conservés à l'air libre, dont les valeurs sont 0,93 ; 1,15 ; 1,80 et 2,91 MPa mesurées respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours. Cependant, pour les mortiers à base de sable dunaire ayant le même rapport C/S = (1:2), traités par badigeon et conservés à l'air libre, les résistances à la compression sont de 0,85 ; 1,01 ; 1,15 et 2,30 MPa obtenues respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours. En conséquence la résistance à la compression des mortiers de sable alluvionnaire est de 21% plus élevée que celle des mortiers à base de sable dunaire.
- La résistance à la compression des mortiers de sable alluvionnaire est de 20% et 13% plus grande que celle des mortiers à base de sable dunaire respectivement à l'air libre et de sous toile de jute cette amélioration est due à la présence des éléments grossiers du sable alluvionnaire.
- Les mortiers à base de sables dunaire et ceux à base de sable alluvionnaire conservés à l'air libre présentent des résistances à la compression grandes de 27% et 30% respectivement par rapport à ceux conservés sous toile de jute.
- La variation en masse des mortiers soutient et confirme la variation de longueur et la résistance mécanique.
- Lorsque la perte de masse des mortiers augmente, la compacité s'améliore et engendre une résistance mécanique élevée.
- La perte de masse et le gain de résistance mécanique sont logiques à l'air libre et sous toile de jute, du moment que l'eau évaporée (ou absorbée) améliore la résistance mécanique.
- Les mortiers à haute teneur en chaux exhibent les plus hautes résistances mécaniques (flexion, compression).

- A 28 jours, les mortiers atteignent une valeur de 40% de leur résistance maximale en compression et flexion (à 365 jours) pour les mortiers ayant un rapport Chaux/Sable (C/S) de (1:2) et (1:2,5), cependant elle est de 70 à 75% pour les mortiers de rapport C/S égale à (1:3) ; (1:3,5) ; (1:4).

- L'absorption d'eau par capillarité des mortiers de sable de dune est supérieure de 4,61% que celle des mortiers de sable des alluvions sans badigeon et de 4,15% avec badigeon. Cet accroissement du taux d'absorption est probablement dû à la granularité des grains de sable de dune.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Dans cette étude nous avons traité le comportement des mortiers à l'état frais et à l'état durci et les propriétés physique-mécanique, par des essais tels que: le temps d'écoulement des mélanges en fonction des rapports chaux /sable (C/S) et eau/chaux (E/C), la variation de masse, le retrait des mortiers, les résistances à la flexion et la compression, l'absorption d'eau en faisant varier le rapport C/S et diffraction aux rayons x.

L'étude expérimentale nous a conduit à tirer plusieurs conclusions parmi lesquelles:

- ✓ Le rapport Eau / Chaux (E/C) varie avec la nature du sable (alluvionnaire ou dunaire). Le rapport E/C du mortier de sable dunaire variant de 0,9 à 1,25 est plus grand à celui du mortier de sable alluvionnaire variant de 0,85 à 1,17.
- ✓ Les éprouvettes de mortiers de sable alluvionnaire et ceux de sable dunaire sans badigeon montrent une perte de masse un peu plus grande de 5% à l'air libre et de 2,5% sous toile de jute par rapport aux mortiers avec badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.
- ✓ Le retrait augmente avec l'augmentation du rapport C/S. Une augmentation du rapport C/S de 20 % engendre une augmentation de retrait de 11% pour les éprouvettes conservées sous toile de jute et de 19 % pour les éprouvettes conservées à l'air libre.
- ✓ Le mortier conservé à l'air libre montre une augmentation de retrait de 14% par rapport au mortier conservé sous toile de jute pour le sable alluvionnaire et de 9 % pour le sable dunaire.
- ✓ Le mode de conservation joue un rôle plus important dans cet essai puisque le retrait dans les éprouvettes couvertes en toile de jute est faible et lent par rapport aux éprouvettes exposées à l'air libre.
- ✓ Le retrait du mortier à base de sable dunaire est relativement plus grand que celui du mortier à base de sable alluvionnaire de 24 et de 20% pour les éprouvettes conservées respectivement à l'air libre et sous toile de jute. Ceci est dû probablement, à la présence des éléments fins dans le sable dunaire.
- ✓ La résistance à la flexion maximale des mortiers à l'air libre est de 0,59 ; 0,67 ; 0,8 ; 1,29 N/mm² mesurées respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable alluvionnaire de rapport C/S = (1:2). Cependant, elle est de 0,39 ; 0,52 ; 0,77 ; 1,10 N/mm² à des âges de 28, 90, 180 et 365 jours pour des mortiers à base de sable dunaire de même rapport C/S = (1:2). En

conséquence, la résistance à la flexion des mortiers de sable alluvionnaire est de 30% plus grande que celle des mortiers de sable dunaire. Donc le mortier à base de sable alluvionnaire donne une bonne résistance par rapport au mortier à base de sable dunaire.

- ✓ Les éprouvettes de mortier de sable alluvionnaire ou dunaire avec badigeon montrent une bonne résistance à la flexion par rapport au mortier sans badigeon quelque soit la variation du rapport C/S.
- ✓ La résistance à la flexion des mortiers de sable alluvionnaire est de 30% plus grande que celle des mortiers à base de sable dunaire à l'air libre et de 23% sous toile de jute.
- ✓ Les résistances maximales à la compression sont obtenue pour les mortiers à base de sable alluvionnaire de rapport C/S = (1:2), traités par badigeon et conservés à l'air libre, dont les valeurs sont 0,93 ; 1,15 ; 1,80 et 2,91 MPa mesurées respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours. Cependant, pour les mortiers à base de sable dunaire ayant le même rapport C/S = (1:2), traités par badigeon et conservés à l'air libre, les résistances à la compression sont de 0,85 ; 1,01 ; 1,15 et 2,30 MPa obtenues respectivement à 28, 90, 180 et 365 jours. En conséquence la résistance à la compression des mortiers de sable alluvionnaire est de 21% plus élevée que celle des mortiers à base de sable dunaire.
- ✓ La résistance à la compression des mortiers de sable alluvionnaire est de 20% et 13% plus grande que celle des mortiers à base de sable dunaire respectivement à l'air libre et de sous toile de jute cette amélioration est due à la présence des éléments grossiers du sable alluvionnaire.
- ✓ Les mortiers à base de sables dunaire et ceux à base de sable alluvionnaire conservés à l'air libre présentent des résistances à la compression grandes de 27% et 30% respectivement par rapport à ceux conservés sous toile de jute.
- ✓ La perte de masse et le gain de résistance mécanique sont logiques à l'air libre, du moment que l'eau évaporée améliore la résistance mécanique.
- ✓ Les mortiers à haute teneur en chaux exhibent les plus hautes résistances mécaniques (flexion, compression) à long terme.
- ✓ L'âge du durcissement des mortiers influe toujours sur la résistance à la compression et à la flexion quelque soit le rapport C/S et le type de sable (alluvionnaire ou dunaire).

- ✓ Pour les deux types des mortiers à sables alluvionnaire et dunaire, la meilleur résistance à la compression et à la flexion est obtenue pour un rapport C/S = (1 :2). La meilleure résistance correspond à celle des mortiers à sable alluvionnaire.
- ✓ Les propriétés de micro-porosité exceptionnelles du badigeon de chaux offrent de bons échanges hygrométriques et permettent la bonne conservation du support.
- ✓ Le badigeon assure la protection de la surface et l'étanchéité.
- ✓ L'absorption d'eau par capillarité des mortiers de sable de dune est supérieure de 4,61% que celle des mortiers de sable des alluvions sans badigeon et de 4,15% avec badigeon. Cet accroissement du taux d'absorption est probablement dû à la granularité des grains de sable de dune.

PERSPECTIVES

Les perspectives qui sont nécessaires pour compléter cette étude sont comme suit:

- Utiliser d'autres ajouts minéraux et organiques (clinker – cendres volantes) afin d'améliorer les caractéristiques physico- mécaniques et de durabilité des mortiers.
- Utiliser des fibres (naturelle ou artificielle) pour étudier le comportement des mortiers et améliorer les caractéristiques mécaniques.
- Compléter l'étude par d'autres essais de durabilité : perméabilité ; résistance au gel dégel ; carbonatation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **MCKEE, HARLEY J.** Introduction to Early American Masonry - Stone, Brick, Mortar, and Plaster. National Trust for History Preservation, Columbia University, 1973. p 61.

[2] **Boynton, Robert S.** Chemistry and Technology of Lime and Limestone. Second Edition. New York: John Willy & Sons, Inc., 1980.

[3] **Frank Gramger.** Vitruvius d'architecture. Book II, V. Frank Granger's translation. Heinemann, 1931.

[4] **Davey, Norman.** A History of Building Materials. New York: Drake Publishers Ltd., 1971.

[5] **Cowper, A.D.** Lime and Lime Mortars. Building Research Station. London: HM Stationery, 1927.

[6] **ASTM C270** Standard Specification for Mortar for Unit Masonry

[7] **Spewiek, John P.** The History of Masonry in America, Proceedings of the 7th Canadian Masonry Symposium. Vol 2. Canada: McMaster Université, 1995. pp. 663-677.

[8] **ASTM C207** Standard Specification for Hydrated Lime for masonry Purpose

[9] **DESSAINT.A.** Techniques et pratique de la chaux, Edition 1990, Paris, EYROLLES.

[10] **TEUTONICO GIBBONS. J. M.P, J. ASHURST D JOHNSTON** Pure and natural hydraulic lime, tests and research Lime Mortar; Tests (24 months). Conforms to European Norm (EN 459) and French Norm NFP 15.311. (2000)

[11] **DAVIDOVITS.F.** Les mortiers de pouzzolanes artificielles chez Vitruve évolution et historique architecturale. D.E.A. Université Paris X-Nanterre (1992-1993).

[12] **DUVAL,R.** La durabilité des armatures et du béton d'enrobage. Press ENPC.Paris, 1992, pp.173-225.

[13] **VALSARAJ, K.T.** Elements of environmental Engineering--- thermodynamics and kinetics. New York: Lewis Publishers, 1995, 649 p.

[14] **MASSAZA, F.** Chimie des additions pouzzolaniques et des ciments mélangés. Il cemento, 1976, 73, vol. 1,p3-38.

[15] **MAJUNDAR.A.J and LARNER, L.J.** The mesasurement of pozzolanic activity. Cement and Concrete Research, 1977, vol.7, p209-210.

[16] **DRON.R.** Activité pouzzoulanique. BULL. liaison Labo. Pont et chaussées. Vol.1978, p66-69.

[17] **DRON.R.** Les différents liants hydrauliques et pozzolaniques. Obtention et mode d'activation. BULL. liaison Labo. Pont et chaussées.1978, vol. 94, p73-83.

[18] **BARRET.P,MIENETRIER.,D., COTTIN.B..** Study of silicate-lime solution reaction. Cement and Concrete research, 1977,N° 7, p61-67.

[19] **KONDO, R.OHSAWA, S.** Reactivities of variious silicates with calcium hydroxyde and water. Journal of American Ceramic Society, 1979, vol. 62, n°9-10, p311-324.

[20] **BLOMBLED, JP.** Liant à bat cout pour les pays en développement. Lyon : INSA.1985, 123 p. rapport de fin de contrat REXCOOP.

[21] **J.I. DAVISON**. CBD-123-F. Comportement mécanique des mortiers de maçonnerie. CNRC.Publié 1974.

[22] **Noureddine Bouaroua**. Contribution Technique, OPVM (office de protection et promotion de la vallée de M'zab .

[23] **ASTM C150** Standard Specification for Portland Cement.

[24] **FERNANDO.M, A. HENRIQUES, AND. A.E CHAROLA**, Comparative study of standard test procedures for mortars. Berlin : Moller Druck, 1996. In “8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone’”, Josef Riederer (ed.), p.1521-1528.

[25] British Standards Institution (BSI) **BS 4551** (1980): Methods of testing mortars, screeds and plasters. BSI, London.:1980.

[26] Comité Européenne de Normalisation (CEN) **BS 1961** (1987): Methods of testing cement; determination of strength.CEN, Brussels.

[27] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment **CSTB** (1982): Modalités d’essais des enduits extérieurs d’imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques. Cahiers du CSTB, Paris, (230), cahier 1779.

[28] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment **CSTB** (1993): Certification CSTB des enduits monocouches d’imperméabilisation. Cahier du CSTB, Paris, (341), cahier 2669-4.

[29] **RILEM**. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. II.6 Water absorption (capillarity). In Matériaux et Construction , commission 25-PEM (1980) :, vol. 13, n°75.

[30] **NORMAL (1985)**. Assorbimento d’acqua per capillarità. Coeficiente di assorbimento capillare. CNR-ICR , Rome, 11/85.

- [31] **J. Lanas, J.L. Pérez Bernal, M.A. Bello, J.I. Alvarez Galindo.** Hydraulic Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. Cement and Concrete Research 34 (2004), p 2191-2201.
- [32] **KOMAR.A** Matériaux et élément de construction- Edition mir, 2Pervi Rijski péréoubk Moscou – I110, GSP, URSS.
- [33] **M.MOUSSA JALEL.** Produits silico-calcaire, CNERIB (Centre Nationale d'Etude et de Recherche Intégrées du bâtiment) .1992.
- [34] **BUTSCHI, P.-Y DESCHENAUX, B. MIAO, N. K. SRIVASTAVA** Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction. Dans Batir notre civilisation. Comptes rendus, 31^{em} Congrès annuel de la société canadienne de génie civil, Moncton Société canadienne de génie civil, Moncton Société canadienne de génie civil, Montréal (Qué.).2003 pp. 336-1-336-6.
- [35] **NORME FRANCAISE AFNOR NF P18-558.** Granulats - Détermination de la masse volumique absolue des fines. Expérimentale décembre 1990.
- [36] **NORME FRANCAISE AFNOR NF EN196-3.** (Méthode d'essais des ciments-partis 3/Détermination du temps de prise et de la stabilité), Paris, 1990.
- [37] **DREUX G.,** « Nouveau guide du béton », E. Eyrolles, Paris, 1998.
- [38] **NORME FRANCAISE AFNOR NF P18-555.** (Granulats : mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables), Paris, 1990.
- [39] **NORME FRANCAISE AFNOR NF P18-598.** (Granulats : Equivalent de sable), Paris,1990.
- [40] **NORME FRANCAISE NF EN 933-2** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 2 : détermination de la

granularité, tamis de contrôle et dimensions nominales des ouvertures. AFNOR –Paris – 1997.

[41] **NORME FRANCAISE EN- 196-1** (chaux, essais mécanique/ compression et flexion), paris, 1994.

[42] **NORME FRANCAISE AFNOR NF EN18-452.** (Béton essai d'affaissement), Paris, 1981.

[43] **NORME FRANCAISE AFNOR NFP 15-433.** (Essai de retrait) AFNOR, Paris, 1981.

[44] **ABBANI Saïd.** Caractérisation et durabilité des béton, Mémoire de magister, Université d'Ouargla, 2003.

[45] **NORME FRANCAISE AFNOR NFP 10-502.** (Essai de capillarité) AFNOR, paris, 1989.

[46] **A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou,** Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures, Constr. Build. Mater. 14 (2000) 35–46.

[47] **A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou,** Investigation of the technology of historic mortars, J. Cult. Herit. 1 (2000) 45– 58.

[48] **A. Moropoulou, G. Biscontin, A. Bakolas, K. Bisbikou,** Technology and behavior of rubble masonry, Constr. Build. Mater. 11 (2) (1997) 119–129.

[49] **EN V 197 – 1"** Ciment : composition , spécifications et critères de conformité – Partie 1 :ciments courants " AFNOR – Paris- 1996.

[50] **J. Lanas, J.I. Alvarez.** Masonry repair lime based mortars: factors affecting the mechanical behavior.

- [51] **P.J.P. Gleize, A. Müller, H.R. Roman**, Microstructural investigation of silica fume – cement – lime mortar, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2) (2003) 171–175.
- [52] **O. CAZALLA, Morteros de cal**. Aplicacion en el patrimonio historico, unpublished ph D thesis (in spanish) univervidad de Granada, Granada, 2002.
- [53] **A. Moropoulou, G. Biscontin, A. Bakolas, K. Bisbikou**, Technology and behavior of rubble masonry, *Constr. Build. Mater.* 11 (2) (1997) 119–129.
- [54] **M.J. Mosquera, D. Benitez, S.H. Perry**, Pore structure in mortars applied on restoration. Effect on properties relevant to decay of granite buildings, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1883–1888.
- [55] **Y.F. Houst** . Le retrait de carbonatation. *Chantiers*, 20 (1), 1989, 55-60;