

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université 20 août 1955 - Skikda



وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي
جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة

Faculté de technologie
Département de Génie Civil
Ref : D012123018D

كلية التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية
المرجع: D012123018D

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat science

ELABORATION D'UN MORTIER DE CHAUX POUR LA RESTAURATION DU PATRIMOINE BÂTI (COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET PHYSIQUE)

Option

Techniques de réhabilitation du vieux bâti

Par

Amira AYAT

Septembre 2023

Devant le jury

PRÉSIDENT	DERABLA RIAD	MCA	Université 20 aout 1955 Skikda
RAPPORTEUR	BOUZERD HAMOUDI	PR	Université 20 aout 1955 Skikda
EXAMINATEUR	GUENFOUD MOHAMED	PR	Université 08 mai 1945 Guelma
EXAMINATEUR	BENOUIS ABDELHALIM	PR	Université 08 mai 1945 Guelma

« Savoir pour prévoir afin de pouvoir »

Auguste CONT

REMERCIEMENTS

Un travail de thèse est un chemin long et remplie de belles contraintes, qui peuvent à un moment donné peser sur le doctorant. Continuer et persévérer deviennent alors une tâche difficile, et c'est pour cela qu'il est nécessaire de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail :

En premier lieux louanges à Allah tout puissant, qui m'a mis sur la voie du savoir, et m'a accordé force, courage, patience et persévérance pour cueillir le beau fruit de ce travail scientifique.

Je remercie mon directeur de thèse, Pr. Bouzerd Hamoudi, d'avoir accepté de diriger ce travail, et particulièrement je le remercie pour, la confiance et la liberté qu'il m'a accordée tout au long du parcours. Ses précieux conseils m'ont été bénéfiques et très enrichissant sur tous les plans.

Un remerciement spécial est adressé au Dr Antonia-Navarro, enseignante à l'Ecole Polytechnique Supérieure des Edifices de Barcelone (Espagne). Son accueil au sein du laboratoire ainsi que son dévouement scientifique et humain m'ont marqué, et je lui suis très reconnaissante pour le temps et les enseignements qu'elle m'a apporté tout au long de cette thèse. Qu'elle puisse trouver ici ma profonde et sincère gratitude.

Ma vive reconnaissance va à Minerva Embuena qui m'a offert son soutien, son aide et son amitié pendant mon stage passé à Barcelone, et je lui souhaite un prompt rétablissement.

Mes vifs remerciements aux Membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail, avec une particulière reconnaissance au Pr. Benmalek Mohamed Larbi d'avoir accepté notre invitation et assisté à la soutenance.

J'adresse mes remerciements aux membres et techniciens des trois laboratoires : département de génie civil de l'université Badji Mokhtar, Ecole des mines d'Annaba et l'Ecole Polytechnique des Edifices de Barcelone, qui sans leur aide le travail expérimental aurait été plus éprouvant qu'il ne l'est déjà.

Je tiens à remercier également mes camarades de parcours, avec qui j'ai débuté cette aventure, et qui depuis le magistère nous partageons discussions et encouragements. Je vous souhaite à tous une bonne continuation et une soutenance dans un avenir proche.

Et comme on dit le meilleur reste toujours pour la fin, j'exprime ma profonde gratitude à tous ceux qui sont cher à mon cœur : ma mère à qui je dois la personne que je suis aujourd'hui, sa foi et sa confiance en moi, ont toujours été la source de ma volonté et ma persévérance. Un grand merci à mes beaux parents de m'avoir accompagné et encouragé tout au long de mon parcours de thèse, à mes deux frères qui sont mes éternels supporteurs, mes beaux frères, belles sœurs et amies proches. Je réserve cette dernière ligne à mon mari et mon fils Wassim, leur présence a rajouté une valeur particulière à ce travail.

*Cette thèse est dédiée à
la mémoire de mon défunt Père et à Tonton Lessad*

RÉSUMÉ

AUTEUR : Amira AYAT

TITRE : ELABORATION D'UN MORTIER DE CHAUX POUR LA RESTAURATION DU PATRIMOINE BÂTI (COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET PHYSIQUE)

DIRECTEUR DE THÈSE : Mr. BOUZERD Hamoudi, Professeur à l'Université 20 Aout 1955 - Skikda

Le but de cette thèse est d'élaborer des mortiers à base de chaux locale destinés à la restauration du patrimoine bâti. Pour valider cette démarche, le théâtre régional de la ville de Skikda en Algérie a été choisi comme cas d'étude. Unique monument du style Baroque de la ville, le théâtre souffre de plusieurs pathologies dont il est nécessaire de déterminer l'origine. A cet effet, différents échantillons de mortiers (jointement, enduits internes et externes) ont été prélevés des murs de l'édifice. Leurs propriétés physiques et minéralogiques ont été déterminées grâce à différents essais (porosité accessible à l'eau, DRX, MEB, ATG).

Pour l'élaboration des mortiers d'étude, la poudre de verre, la poudre de brique et le métakaolin ont été choisis comme additions. Les trois additions ont été substituées à la chaux selon cinq taux de 10, 15, 20, 25 et 30%, constituant ainsi un total de 16 formulations, mortier témoin compris. Ces mortiers obtenus ont à leur tour été étudiés à l'état frais (maniabilité et délais de début et fin de prise, performances mécaniques (résistance à la traction et à la compression), propriétés hydriques (absorption par capillarité), propriétés physiques (porosité accessible à l'eau) et carbonatation. Les résultats ont été satisfaisants et ont rempli le critère de compatibilité avec le théâtre de la ville, tout en respectant les exigences et les recommandations pour les mortiers de restaurations du patrimoine bâti. De surcroît, l'utilisation de la poudre de verre et de la poudre de brique offre un avantage environnemental par le recyclage des déchets, et par conséquent les mortiers avec ces deux additions rentrent dans la catégorie des éco-matériaux.

Mots clés : Mortier de chaux, poudre de verre, poudre de brique, métakaolin, restauration, patrimoine

ABSTRACT

AUTHOR : Amira AYAT
TITLE : ELABORATION OF LIME MORTAR FOR RESTORATION OF ARCHITECTURAL HERITAGE (MECANICAL AND PHYSICAL BEHAVIOUR)
DIRECTOR OF THESIS : Mr. BOUZERD Hamoudi, Professeur à l'Université 20 Aout 1955 - Skikda

The aim of this thesis is to develop mortars based on local lime intended for the restoration of built heritage. The theatre of the city of Skikda in Algeria was chosen as a case study in order to validate this approach. Unique monument of the Baroque style of the city, the theater suffers from several pathologies which need to be investigated. For this propose, different samples of mortars (jointing, coatings, internal and external) were taken from the walls of the building. Their physical and mineralogical properties were determined through various tests (porosity accessible to water, DRX, SEM, ATG). To elaborate study mortars, glass powder, brick powder and metakaolin were chosen as additions. The three additions were substituted with lime according to five rates of 10, 15, 20, 25 and 30%, thus constituting a total of 16 formulations including reference mortar. Mortars obtained were studied in: fresh state (Workability and setting time), mechanical performance (tensile and compression strength), water properties (absorption by capillarity), physical properties (porosity accessible to water) and carbonation . The results were satisfactory and fulfilled the criteria of compatibility with the city theatre, while respecting the requirements and recommendations for mortars to restoration of built heritage. In addition, the use of glass powder and brick powder offers an environmental advantage by recycling waste, and therefore mortars with these two additions can be classed in the category of eco-materials.

Keywords : Lime mortars, glass powder, brick powder, metakaolin, restoration, heritage.

ملخص

المؤلف	عياط أميرة
عنوان الرسالة	تحضير ملاط الجير لترميم التراث المبني (السلوك الميكانيكي والفيزيائي)
المشرف	السيد بوزرد حمودي، أستاذ بجامعة 20 أوت 1955-سكيكدة

الهدف من هذه الأطروحة هو تشكيل ملاط على أساس الجير المحلي مخصص لترميم التراث العمراني. للتحقق من صحة هذا النهج، تم اختيار المسرح الجهوي لمدينة سكيكدة في الجزائر كدراسة حالة. المسرحالذي يعتبر نصب تذكاري فريد من نوعه على الطراز الباروكي للمدينة، يعاني من العديد من الأمراض التي من الضروري تحديد أصلها. ولهذه الغاية، تم أخذ عينات مختلفة من ملاط (الوصلات والطلاءات الداخلية والخارجية) من جدران المبنى. تم تحديد خواصها الفيزيائية والمعدنية من خلال اختبارات مختلفة (المسامية، DRX، SEM، ATG) تطوير ملاط الدراسة، تم اختيار مسحوق الزجاج ومسحوق الطوب والميتاكرولين كإضافات. تم استبدال الجير الإضافات الثلاثة وفقا لخمس معدلات: 10 و 15 و 20 و 25 و 30%، و عليه تم الحصول على 16 تركيبة، بما في ذلك ا لملاط المرجعي. تمت دراسة الملاط المحصل عليه من حيث الخصائص الطازجة (الاتساق، وقت الإعداد) الأداء الميكانيكي (قوة الشد والضغط) وخصائص الماء (الامتصاص الشعري) والخصائص الفيزيائية (قابلية مسامية الماء) و كربونات. وكانت النتائج مرضية واستوفت معيار التوافق مع مسرح المدينة، مع احترام المتطلبات والتوصيات الخاصة بملاط ترميم التراث العمراني. بالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام مسحوق الزجاج ومسحوق الطوب يوفر ميزة بيئية من خلال إعادة تدوير النفايات، وبالتالي فإن الملاط مع هاتين الإضافتين يندرج في فئة المواد الإكولوجية.

الكلمات المفتاحية: ملاط جير، مسحوق زجاج، مسحوق طوب، ميتاكرولين، ترميم، تراث.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Table des matières	vi
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	2

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. GENERALITES SUR LES MORTIERS DE CHAUX	8
1.1. La chaux.....	8
1.2. Les pouzzolanes	14
1.3. Le sable.....	18
2. LES MORTIERS DE CHAUX POUR LA RESTAURATION	19
2.1. Définition de la restauration.....	19
2.2. Formulations des anciens mortiers	20
2.3. Propriétés des mortiers de chaux pour la restauration	22
3. FACTEURS DE PATHOLOGIES DES MORTIERS DE CHAUX	23
3.1. Humidité.....	23
3.2. Présence des sels.....	25
3.3. Pollution atmosphérique	26
3.4. Attaque biologique	27
4. TECHNIQUE DE CARACTERISATION DES ANCIENS MORTIERS DE CHAUX	28
4.1. Documents historiques.....	29
4.2. Analyse visuelle et échantillonnage	30
4.3. Caractérisation chimique et minéralogique.....	31

4.4. Caractérisation mécanique et physique.....	35
4.5. Essais complémentaires	37
4.6. Détermination de la courbe granulométrique.....	39
5. CONCLUSION	41

CHAPITRE II

ÉTUDE DE CAS : THÉÂTRE RÉGIONAL DE LA VILLE DE SIKKDA

1. PRESENTATION DU THÉÂTRE	44
2. ANALYSE VISUELLE ET PATHOLOGIQUE	49
3. ECHANTILLONNAGES ET TECHNIQUES D'ANALYSE AU LABORATOIRE	52
4. RÉSULTATS DES ANALYSES AU LABORATOIRE	55
4.1. Densités et porosité accessible à l'eau	55
4.2. Granulométrie et forme des grains	55
4.3. Analyse DRX	57
4.4. Analyse thermogravimétrique	59
5. CONCLUSION	62

CHAPITRE III

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

1. MATÉRIAUX UTILISÉS	66
1.1. La chaux	66
1.2. La poudre de verre	68
1.3. La poudre de brique	69
1.4. Le métakaolin	71
1.5. Le sable	73
1.6. L'eau de gâchage	74
2. FORMULATION DES MORTIERS	75
3. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	78
3.1. Essais sur mortier frais	78
3.2. Essais sur mortier durci.....	79
4. CONCLUSION	84

CHAPITRE IV
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1. RÉSULTATS DES MORTIERS A L'ÉTAT FRAIS	87
1.1. Effet des additions sur la consistance	87
1.2. Effet des additions sur les délais de prise.....	89
2. RÉSULTATS DES MORTIERS A L'ÉTAT DURCI	91
2.1. Résistance à la traction par flexion	91
2.2. Résistance à la compression	93
2.3. Module d'élasticité	95
2.4. Porosité accessible à l'eau.....	97
2.5. Absorption par capillarité.....	99
2.6. Suivre de la carbonatation	102
3. CONCLUSION	104
 CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	 107
 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 111
 ANNEXES	
Annexe A : Attestation des archives nationales d'outre-mer	125
Annexe B : Plans du théâtre	127
Annexe C : Dissolution des fractions granulométriques dans l'HCL des mortiers	136
Annexe D : Fiches techniques de la chaux	139
Annexe E : Carbonatation des mortiers dans le temps	140

Table des figures

1.1	Cycle de la chaux (Coutelas, 2005)	10
1.2	Four traditionnel en phase de calcination.....	12
1.3	L'intérieur d'un four traditionnel.....	12
1.4	Schéma simplifié d'un four à chaux industriel rotatif (Claude, 1994)	12
1.5	Schéma simplifié d'un four vertical industriel (Claude, 1994).....	13
1.6	Résumé graphique de l'utilisation des produits céramiques dans les mortiers de chaux (Matias <i>et al.</i> , 2014)	17
1.7	Mécanisme de condensation dans un mur	23
1.8	Coulée noire correspondant à l'écoulement de l'eau de pluie.....	24
1.9	Manifestations de la remontée capillaire dans le vieux bâti.....	25
1.10	Pathologies dues à la présence des sels (Goncalves, 2007)	26
1.11	Manifestations de la présence des sels dans un mur en brique	26
1.12	Manifestation de la pollution atmosphérique	27
1.13	Manifestation d'une attaque biologique.....	28
1.14	Représentations graphiques des anciens chantiers	30
1.15	Schéma de la méthodologie de caractérisation des mortiers.....	31
1.16	Diffraction des rayons X	33
1.17	Diagramme des phases de diffraction de rayon X d'un échantillon de mortier de chaux historique (Middendorf <i>et al.</i> , 2005)	33
1.18	Schéma récapitulatif des interactions causées par un faisceau électronique incident sur un échantillon de matière (Merckx, 2013)	34
1.19	Lame mince d'un mortier de chaux avec quartz (Q), calcaire (L), feldspath (F) et granulats	34
1.20	Cliché MEB de la microstructure d'un mortier historique de gypse	35
1.21	Courbe granulométrique : a) mortier historique, b) granulats standard. EN 196-1) .	40
2.1	Théâtre régional de Skikda. Source auteur 2019.....	45
2.2	Façade principale du théâtre. Source : photo auteur à partir des archives d'Outre-mer -Aix-en-Provence 2018	45
2.3	Page de garde du détail estimatif.....	45
2.4	Soumission de l'entreprise en charge des travaux.....	45
2.5	Coupole vue de la scène du théâtre. Source : photo auteur 2017	46
2.6	Principe de conception du théâtre. Source : rapport d'expertise du BET	47
2.7	Représentation du style baroque. Source : photo auteur 2022	48

2.8	Ecriture "THEATRE MVNICIPAL". Source : photo auteur 2022	48
2.9	Modèle du temple romain de Venus. Source de la planche : Exploration scientifique de l'Algérie (entre 1840-1845) Par DELAMARE.....	49
2.10	Dispositif de l'essai de la porosité accessible à l'eau	54
2.11	Résultat de l'analyse granulométrique des trois échantillons	54
2.12	Courbe granulométrique des mortiers (P2) (P4) et (P5)	56
2.13	Diffractogrammes RX des échantillons des mortiers du théâtre : C : Calcite, Q : Quartz, G : Gypse, Gh : Gehlénite, I : Illite, et H : Halite	59
2.14	Analyse thermogravimétrique des différents mortiers du théâtre	60
2.15	Classification des mortiers selon leur hydraulicité.....	61
3.1	Chaux aérienne éteinte.....	67
3.2	Image MEB de la chaux (agrandissement x2000)	67
3.3	Diffractogramme RX de la chaux.....	67
3.4	Poudre de verre.....	68
3.5	Image MEB de la poudre de verre (agrandissement x2000)	68
3.6	Diffractogramme RX de la poudre de verre.....	69
3.7	Débris de briques du théâtre régional de Skikda	69
3.8	Poudre de brique	70
3.9	Image MEB de la poudre de brique (agrandissement x5000)	70
3.10	Diffractogramme RX de la poudre de brique	70
3.11	Kaolin de Djebel Debbagh 3 (DD3)	71
3.12	Métakaolin.....	72
3.13	Image MEB du métakaolin (agrandissement x2000)	72
3.14	Diffractogramme aux rayons X du métakaolin	72
3.15	Courbe granulométrique de la chaux et des trois additions	73
3.16	Sable de dunes (0/2).....	71
3.17	Courbes granulométriques du sable (0/2)	73
3.18	Exemple de détermination du dosage en eau du mortier témoin.....	74
3.19	Conservation des éprouvettes.....	77
3.20	Etalonnage à la table à secousses d'un mortier de chaux	77
3.21	Détermination des délais de prise avec l'Appareil de Vicat	78
3.22	Essai de traction par flexion 3 points.....	79
3.23	Essai de compression	80
3.24	Etalonnage de l'appareil	81
3.25	Mesure de la vitesse ultrasonique d'une éprouvette	81
3.26	Essai d'absorption d'eau par capillarité	81

3.27	Mesure du poids hydrostatique.....	83
3.28	Photographie d'un échantillon de mortier de chaux à base de 30 % de poudre de verre à 56 jours de maturation	83
4.1	Effet de la substitution de la chaux sur la demande en eau des mortiers : a- Poudre de verre, b- poudre de brique et c- Métakaolin.....	88
4.2	Effet de la substitution de la chaux sur les délais de prise : a- Poudre de verre, b- poudre de brique et c- Métakaolin	90
4.3	Résistance des mortiers avec poudre de verre: a) court terme, b) long terme.....	91
4.4	Résistance des mortiers avec poudre de brique: a) court terme, b) long terme.....	92
4.5	Résistance des mortiers avec métakaolin: a) court terme, b) long terme.....	92
4.6	Résistance à la compression des mortiers avec la poudre de verre : a) court terme, b) long terme.....	93
4.7	Résistance à la compression des mortiers avec la poudre de brique: a) court terme, b) long terme.....	94
4.8	Résistance à la compression des mortiers avec métakaolin: a) court terme, b) long terme.....	94
4.9	Porosité accessible à l'eau : a-poudre de verre, b-poudre de brique, c-métakaolin	97
4.10	Effet de la substitution de la chaux sur l'absorption d'eau capillaire des mortiers avec poudre de verre a- 56 jours et b- 565 jours	98
4.11	Effet de la substitution de la chaux sur l'absorption d'eau capillaire des mortiers avec poudre de brique :a- 56 jours et b- 565 jours	100
4.12	Effet de la substitution de la chaux sur l'absorption d'eau capillaire des mortiers avec du Métakaolin : a- 56 jours et b- 565 jours	101
4.13	Evolution de la carbonatation du mortier (MPV30) a différentes échéances	102
4.14	Front de carbonatation des mortiers (MT), (MPV30), (MPB30) et (MK30).....	102
4.15	Front de carbonatation des mortiers (MT), (MPV30), (MPB30) et (MK30)	103

Liste des tableaux

1.1	Intervalles des caractéristiques mécaniques et physiques obtenues des essais sur des mortiers de chaux aérienne et de sable (Veiga, 2017)	21
1.2	Caractéristiques physico-mécaniques des anciens mortiers.....	37
1.3	Température de dissociations de certains liants minéraux.....	38
1.4	Caractéristiques chimiques des mortiers historiques issus de l'analyse ATG	39
1.5	Solvants pour liants minéraux	39
2.1	Principales pathologies observées	50
2.2	Description des échantillons.....	53
2.3	Propriétés physiques des mortiers analysés	55
2.4	Dissolution des grains de mortier dans l'HCL	57
3.1	Composition chimique et caractéristiques physiques de la chaux.....	66
3.2	Composition chimique et caractéristiques physiques de la poudre de verre	68
3.3	Composition chimique et caractéristiques physiques de la poudre de brique.....	70
3.4	Composition chimique et caractéristiques physiques du métakaolin.....	72
3.5	Caractéristiques physiques du sable.....	74
3.6	Analyse chimique du sable en (%)	74
3.7	Composition des mortiers d'étude	75
3.8	Plages de consistances des mortiers (NBN EN 1015-3, 2007)	78

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La restauration du patrimoine bâti est une intervention pluridisciplinaire, qui implique des recherches historiques, socioculturelles, scientifiques et parfois même archéologiques, contribuant au développement social et économique des pays. Préserver et maintenir les ouvrages historiques, devient alors une nécessité prioritaire, car ces édifices reflètent les anciennes techniques et témoignent du savoir-faire de nos ancêtres. C'est en effet à travers la restauration des édifices anciens que les générations futures, pourront connaître et identifier l'histoire et la culture de nos villes.

Sur le plan des matériaux de construction, la restauration s'avère assez ardue, voire plus délicate, car les édifices historiques sont construits au moyen de techniques ancestrales et traditionnelles, avec des matériaux, qui ont subi des altérations de toutes natures tout au long de leur vie. Une mauvaise connaissance ou interprétation des différents facteurs de dégradations, et des propriétés du support d'origine mènera fondamentalement à des résultats non satisfaisants, qui peuvent s'avérer néfastes pour la pérennité des ouvrages.

Les multiples interventions sur le vieux bâti, sans connaissances préalables du support et des pathologies qui en découlent, ont eu des impacts désastreux sur beaucoup d'édifices et monuments anciens de par le monde. Cette situation a incité ICOMOS (conseil international des monuments et des sites) à prendre l'initiative, lors de la Charte de Venise en 1964, d'établir des recommandations à suivre et les matériaux à proscrire dans le cadre des travaux de restauration des monuments historiques. C'est ainsi, que les mortiers à base de chaux, ont réintégré leur place dans les opérations de restauration du patrimoine bâti, après une longue période d'abandon, au profit du ciment.

En effet, la chaux répond et remplit les exigences nécessaires à la restauration, notamment en ce qui concerne les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques, l'élasticité, la déformabilité et la capillarité, et c'est dans cet axe que plusieurs recherches se sont dirigées, en essayant d'améliorer à chaque fois les propriétés des mortiers à base de chaux par différentes additions généralement de nature pouzzolanique.

Les poudres de verre finement broyées présentent une activité pouzzolanique. La plupart des études sur la valorisation des déchets de verre en poudre se concentrent sur les mortiers et bétons, en évaluant sa durabilité, en remplacement du ciment. Même si la poudre de verre est classée en tant que pouzzolane selon la norme ASTM C618, on ne trouve que peu de recherches sur sa combinaison avec la chaux.

L'utilisation des déchets céramiques dans les mortiers à base de chaux présente un double avantage à la fois technique et environnemental, grâce à leurs caractéristiques pouzzolaniques, qui améliorent de façon significative la résistance mécanique, la perméabilité, la durabilité et la bonne cohésion entre les liants et les granulats.

L'incorporation des déchets de brique est une technique ancestrale qui remonte à l'époque romaine. Elle a fait l'objet de plusieurs études courantes dans le cadre de la fabrication des mortiers à base de chaux. Le métakaolin également considéré comme une addition intéressante de par ses caractéristiques pouzzolaniques, qui améliorent, d'une façon substantielle, les résistances mécaniques et la durabilité des bétons, a conduit plusieurs chercheurs à envisager son utilisation dans le domaine de restauration.

En Algérie, la plupart des ouvrages historiques ont subis de multiples dégradations de différentes natures, mais les multiples interventions entreprises n'ont, hélas, pas abouti à des résultats probants et durables. Les raisons de telles déconvenues sont multiples, mais la plupart d'entre-elles résultent d'un mauvais diagnostic ou de l'utilisation d'un matériau incompatible avec le tissu d'origine du bâti. Bien que l'utilisation de la chaux ait considérablement évoluée dans de nombreux pays ces dernières années, en Algérie, ce n'est toujours pas le cas. La production de la chaux en est exclusivement destinée à des fins industrielles.

Cette thèse s'inscrit dans le domaine de la restauration du patrimoine bâti avec comme objectif principal la valorisation de la chaux locale, des déchets recyclés (poudre des bouteilles de verre et déchets de brique), ainsi que le métakaolin, dans les mortiers à base de chaux aérienne pour la restauration des joints et enduits des bâtiments historiques. L'évaluation des mortiers élaborés est précisément sur les propriétés physiques et mécaniques. Cette démarche sera appuyée par un cas d'étude concret représenté par le théâtre régional de la ville de Skikda (Nord d'Algérie), qui fut choisi à cet effet, lors de l'intégration de l'Université de 20 Aout 1955 de Skikda, dans l'Atelier de Régénération Urbaine de Skikda, établie en collaboration entre l'OPGI et l'université Polytechnique de Barcelone (Espagne), comportant des exercices pratiques sur les édifices de la rue de Didouche Mourad, dont fait partie le théâtre.

La présente thèse comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique des mortiers à base de chaux, notamment pour les travaux de restaurations du patrimoine architectural, suivi d'une synthèse succincte établie à partir de nombreux travaux de recherches antérieurs, mettant l'accent sur les trois additions pouzzolaniques choisies pour l'élaboration des mortiers d'étude.

Le deuxième chapitre porte sur le diagnostic du Théâtre Régional de Skikda qui englobe deux étapes principales : la première est la collecte des données, par l'exploitation de différentes ressources documentaires, archives, livres et rapports divers élaborés au fil du temps, recueillis auprès des Organismes et Directions concernés par sa restauration. La deuxième étape est l'identification de la nature des mortiers d'origine du monument, ainsi que les causes des pathologies dont souffre ce dernier, à travers des analyses au laboratoire, d'ordre physique et minéralogique.

Le troisième chapitre est consacré à la formulation des mortiers à base de chaux pour la restauration du patrimoine bâti. Il est procédé en premier lieu à la caractérisation des matières premières, notamment l'évaluation du potentiel pouzzolanique des trois additions choisies et utilisées : poudre de verre, poudre de brique et métakaolin. Leur effet sur les mortiers élaborés

sera évalué à travers leur substitution à la chaux aérienne, à des taux de 10, 15, 20,25 et 30% pour chaque addition. Nous exposerons ensuite, les différentes procédures expérimentales, pour la caractérisation physique et mécanique des mortiers obtenus.

Le quatrième et dernier chapitre traite des résultats obtenus à partir des essais présentés dans le troisième chapitre. Il met en évidence l'influence de la poudre de verre, de la poudre de brique et du métakaolin sur les propriétés des mortiers à l'état frais, ainsi qu'à l'état durci à travers plusieurs échéances à court et à long terme. Une amélioration des propriétés étudiées est enregistrée, confirmant ainsi la possibilité de l'utilisation de ses additions dans le cadre de l'ouvrage cas d'étude.

Cette thèse s'achève par une conclusion générale rappelant les principaux résultats obtenus sur la compatibilité physique et mécanique des mortiers à base d'une chaux locale, de la poudre de verre, de la poudre de brique et du métakaolin, pour la restauration du théâtre de Skikda, ainsi que d'éventuels anciens édifices historiques.

CHAPITRE I
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce premier chapitre, une synthèse sur les mortiers à base de chaux et leur emploi dans la restauration du patrimoine architectural a été réalisée. Les principaux facteurs de dégradations des mortiers de chaux sont ensuite abordés et enfin sont exposées les méthodes de caractérisation des anciens mortiers.

Sommaire

1. GENERALITES SUR LES MORTIERS DE CHAUX	8
1.1. La chaux	8
1.1.1. La chaux aérienne	9
1.1.2. La chaux hydraulique	10
1.1.3. La chaux dolomitique	11
1.1.4. Fabrication de la chaux	11
1.2. Les pouzzolanes	13
1.2.1. Les pouzzolanes naturelles.....	14
1.2.2. Les pouzzolanes artificielles	14
1.2.2.1. La poudre de verre	15
1.2.2.2. La poudre de brique	15
1.2.2.3. Le métakaolin	17
1.3. Le sable	18
2. LES MORTIERS DE CHAUX POUR LA RESTAURATION	19
2.1. Définition de la restauration	19
2.2. Formulations des anciens mortiers	20
2.3. Propriétés des mortiers de chaux pour la restauration	21
3. FACTEURS DE PATHOLOGIES DES MORTIERS DE CHAUX	23
3.1. Humidité.....	23
3.2. Présence des sels.....	25
3.3. Pollution atmosphérique	26
3.4. Attaque biologique.....	27
4. TECHNIQUE DE CARACTERISATION DES ANCIENS MORTIERS DE CHAUX	28
4.1. Documents historiques	28
4.2. Analyse visuelle et échantillonnage.....	29
4.3. Caractérisation chimique et minéralogique.....	30

4.3.1. Caractérisation chimique.....	31
4.3.2. Caractérisation minéralogique.....	31
4.4. Caractérisation mécanique et physique.....	34
4.4.1. Caractérisation mécanique	35
4.4.2. Caractérisation physique	36
4.5. Essais complémentaires	37
4.6. Détermination de la courbe granulométrique	39
5. CONCLUSION	40

Chapitre I Étude bibliographique

PRÉAMBULE

Ce chapitre consacré à l'étude bibliographique des mortiers à base de chaux, est structuré en quatre parties principales. Une première partie décrit les mortiers à base de chaux, de la matière première aux mortiers d'aujourd'hui. Les différentes méthodes de fabrications ainsi que les principaux constituants sont passés en revue, tout en mettant l'accent sur les additions, notamment celles utilisées dans l'étude expérimentale. La seconde partie est consacrée aux mortiers de restauration du patrimoine architecturale et leurs principales propriétés. La troisième partie représente une synthèse des facteurs de dégradations que l'on rencontre dans le vieux bâti et qui affectent justement les mortiers à base de chaux. Enfin la quatrième et dernière partie comporte la méthodologie de caractérisation des mortiers de chaux, qui se limitera d'ailleurs aux essais de caractérisation des anciens mortiers, précisément dans le domaine de la restauration du patrimoine bâti.

1. GÉNÉRALITÉS SUR LES MORTIERS DE CHAUX

Depuis son apparition dans le domaine de la construction, la préparation du mortier répond toujours aux mêmes principes généraux. Il est le résultat du durcissement d'un mélange composé au départ d'un « liant », de « sable » et d'eau (Coutelas, 2005). Utilisés depuis tellement longtemps, remplissant plusieurs rôles : structurel, décoratif ou encore de protection, les mortiers de chaux peuvent nous raconter l'histoire de la construction et de l'architecture, probablement mieux qu'un autre matériau (Veiga, 2017). En effet les mortiers de chaux font pratiquement partie de toutes les anciennes constructions datant d'avant le début du 19^{ème} siècle, avant l'apparition du ciment et des bétons qui furent leur successeur dans le domaine de la construction. À partir de cette époque, tous les mortiers produits avant la fin du 19^{ème} siècle sont appelés anciens mortiers ou mortiers historiques (Ngoma, 2009) .

Tombant dans l'oubli pendant plusieurs années, les mortiers de chaux commencent à émerger progressivement ses dernières décennies, grâce aux chantiers de réhabilitation du vieux bâti et de restauration du patrimoine architectural, engendrant ainsi, plusieurs recherches scientifiques d'ordre historique, archéologique ou expérimental.

1.1 La chaux

La chaux est utilisée comme liant dans la construction, précisément dans la confection des mortiers depuis 12000 avant JC où des traces de son utilisation ont été trouvées en Palestine et en Turquie (Lawrence, 2006 ; Von Landsburg, 1992). Les Romains ont ensuite perfectionné les techniques de constructions des mortiers de chaux en rajoutant d'autres matériaux pour leurs conférer des propriétés bien déterminées, d'ailleurs Vitruve (1999) nous décrit les étapes à suivre pour obtenir un mortier de bonne qualité. Ces techniques se répandirent en Europe, en Asie, et en Afrique du Nord, et traversèrent le temps en s'améliorant et en se diversifiant jusqu'au début du 18^{ème} siècle, où l'approche scientifique ainsi que

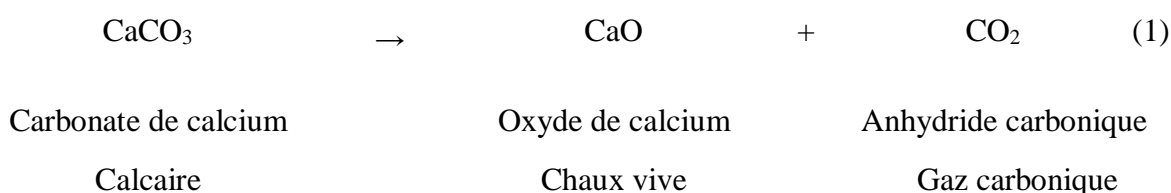
l'exploitation industrielle débutèrent avec l'anglais Black et le Français Lavoisier qui décriront les premières réactions empiriques, qui à leur tour, furent complétées par Vicat, Debrey et Le Chatelier, apportant ainsi, plus de précision sur les données physico-chimiques, et la description des différents processus et usage possible (Claude, 1994).

La chaux est généralement obtenue par la calcination d'un calcaire à une température supérieure à 900° C. Il faut noter toutefois que la présence d'autres éléments à réactions chimiques sensible peut modifier les phénomènes provoqués par l'extinction de la chaux et diversifier la nature du produit fini. C'est cette diversité qui a engendré un problème de terminologie dont souffre ce matériau, largement utilisé depuis des millénaires (Bourezg, 2000). En effet, même si la chaux est un matériau courant et qu'on ne soit pas en mesure de distinguer ses différents types, basés pour l'essentiel sur des critères de composition chimique, son emploi peut provoquer certains désagréments.

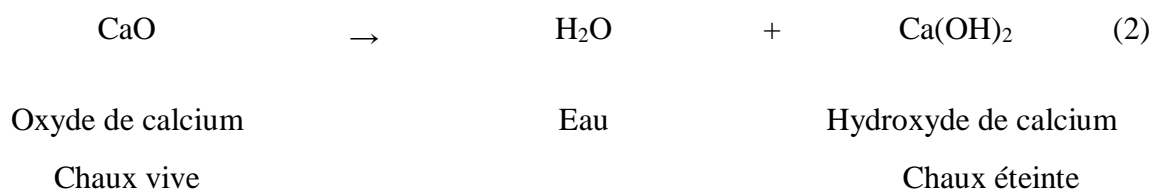
1.1.1 La chaux aérienne

L'appellation de chaux aérienne est attribuée à la chaux non-hydraulique produite par des calcaires relativement pure, raison pour laquelle ce type de chaux fait prise uniquement au contact du dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂). La chaux grasse et la chaux maigre sont deux types de chaux aérienne : la chaux grasse qui tient son nom de l'onctuosité qu'elle procure au mortier, est très pure en carbonate (plus de 95 %). Au contraire la chaux maigre contient un taux d'argile qui atteint les 5 %. Le processus de carbonatation est réversible comme il est illustré dans la figure.1.

La calcination est la première étape du cycle de la chaux. La cuisson s'effectue à une température autour de 900°C. Le calcaire composé principalement de Carbonate de Calcium (CaCO₃) se dissocie pour dégager le CO₂ lié à l'oxyde ce calcium (CaO), connu sous le nom de **chaux vive** :



La chaux vive est ensuite hydratée en présence d'eau, cette opération appelée **l'extinction** produit de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂, connu sous le nom de **chaux éteinte** :



La fin du cycle correspond à la réaction de carbonatation qui s'effectue en présence du CO₂, d'origine atmosphérique :



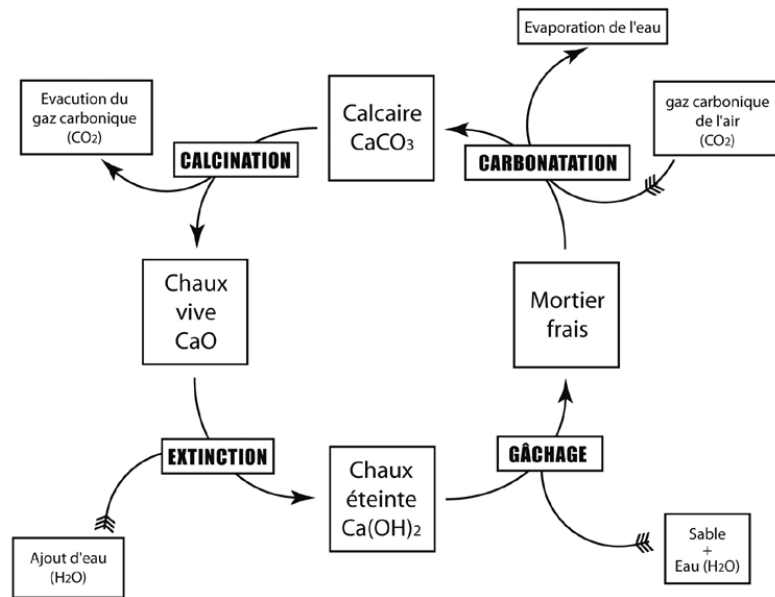


Figure 1.1. Cycle de la chaux (Coutelas, 2005)

La température du mélange peut s'élever jusqu'à 400°C , mais elle est généralement comprise entre 150 et 200°C . De fait, l'extinction de la chaux est une opération délicate et dangereuse. Si la quantité d'eau ajoutée est juste suffisante pour l'extinction, on obtient une chaux sous forme de poudre fine et blanche, prête à être utilisée. Par contre si l'eau ajoutée est en surplus, une suspension appelée pâte (mastic) de chaux se forme, qui avant son utilisation doit être conservée dans un récipient sous une couche d'eau pendant au minimum trois (3) mois, pour assurer la conversion complète de l'oxyde de calcium en hydroxyde de calcium (Portlandite), et permettre aux cristaux de former une taille et une distribution uniforme (Lawrence, 2006).

Lorsque la chaux est sous forme de poudre, elle nécessite une quantité d'eau pour former un mortier maniable, contrairement à la chaux en pâte qui peut être mélangée avec peu, voire même sans eau, pour obtenir un mortier prêt à l'emploi. D'ailleurs un vieil usage prescrivait aux maçons de Rome de n'utiliser que de la chaux grasse ayant reposé au moins 3 ans. Cette extrême lenteur du phénomène de prise, qui caractérise les calcaires purs, était fort prisée des constructeurs antiques, car elle permettait, grâce à la plasticité des mortiers, un tassement lent et progressif de la construction au fur et mesure de son élévation et une excellente répartition des pressions.

Les Romains avaient aussi constaté que lorsque les pierres calcaires contenaient des impuretés, qu'ils ne savaient analyser, les phénomènes accompagnant l'extinction s'en trouvaient atténués ce qui, croyaient-ils à tort, diminuaient les qualités de la chaux, mais nous savons aujourd'hui que c'est la présence de silicate d'alumine (argile) qui est responsable des profondes modifications qui affectent la chaux, tant à l'extinction qu'à la prise (Adam, 2005).

1.1.2 La chaux hydraulique

Lorsque le calcaire contient de l'argile (8 à 20%), la calcination donne lieu à la formation de silicates et d'aluminates de calcium, ce qui confère au liant, la propriété de faire prise sous l'effet de l'eau (caractère hydraulique). Les chaux obtenues sont alors appelées chaux hydrauliques, plus précisément chaux hydrauliques naturelles. Leur nom vient du fait que la

prise peut s'effectuer en milieu aqueux, c'est-à-dire qu'un mortier encore frais, lié avec de telles chaux, peut être submergé après mise en forme, sans que son durcissement ne soit interrompu, mais au-delà de 20% d'argile, les calcaires ne sont plus utilisables pour la chaux.

L'ensemble hydraulique implique principalement la réaction de la bélite ($2\text{CaOSiO}_2[\text{C}_2\text{S}]$) avec de l'eau pour former du silicate de calcium hydraté (C-S-H) suivant la relation suivante :



Une des propriétés les plus remarquables des chaux hydrauliques est de permettre au mortier de durcir plus rapidement que ceux confectionnés avec de la chaux aérienne, car les hydrates se forment sur une période comprise entre 2 et 28 jours. (Oates, 1998 ; Lawrence, 2006), néanmoins, les propriétés des chaux hydrauliques n'étaient pas connues avant la fin du 18^{ème} siècle. Durant cette même période historique, les mortiers dits hydrauliques ne correspondent pas à des mortiers de chaux hydraulique, mais à des mortiers de chaux aérienne mêlée avec un granulats réactif, « pouzzolanique », tel le tuileau (la « brique pilée ») (Coutelas, 2005).

1.1.3 La chaux dolomitique (magnésienne)

La calcination d'une roche calcaire contenant du carbonate de magnésium MgCO_3 , produit des chaux magnésiennes, contenant à la fois de l'oxyde de calcium CaO et de l'oxyde de magnésium MgO (magnésie). Ces chaux sont également appelées chaux dolomitiques.

Chaux dolomitiques et chaux hydrauliques naturelles peuvent, à l'égal des chaux aériennes, être soit vives, soit éteintes, selon qu'elles sont le produit direct de la calcination et contiennent donc des oxydes, ou qu'elles sont ensuite hydratées et contiennent alors des hydroxydes.

La chaux hydraulique artificielle n'est pas considérée comme une chaux, car son obtention n'est pas par calcination de calcaire, mais par broyage et mélange de clinker de ciment et de matériaux inertes (Claude, 1994).

1.1.4 Fabrication de la chaux

Comme toute procédure, la fabrication de la chaux a connu une évolution à travers le temps. La fabrication traditionnelle se faisait dans des fours construits près des lieux de mise en œuvre (figure 1.2 et figure 1.3), mais avaient aussi comme point commun, leur proximité des lieux d'approvisionnement en pierres et en combustibles.

L'observation d'installations de chauxfouriers dans différents pays méditerranéens (Italie, Grèce, Tunisie et Syrie), où les méthodes de productions n'ont guère changé depuis l'Antiquité, permet de décrire avec suffisamment de certitude, le déroulement de cette opération à l'époque romaine. Trois procédés peuvent être distingués :

- la cuisson au four avec foyer à la base,
- la cuisson au four par empilement
- et enfin la cuisson sur aire extérieure (Adam, 2005).

La fabrication de la chaux s'est maintenant industrialisée, elle consiste à transformer un matériau naturel (calcaire ou dolomie) en un produit aux multiples usages, avec des spécifications techniques différentes, adaptées à chaque usage.

Une fois le site retenu, la fabrication de la chaux passe par plusieurs phases : la première phase va de l'exploitation à la préparation de la roche et l'enfournement. La deuxième phase, concerne la calcination proprement dite de la pierre fragmentée dans des fours. La dernière phase permet l'élaboration et le conditionnement du produit final avant chargement pour expédition (Bourezg, 2000).

La calcination peut se faire dans différents types de fours (figure 1.4 et figure 1.5), qui ne cessent de s'améliorer pour augmenter leurs performances et pour les adapter à une production de plus en plus variée. Actuellement les débouchés de la chaux sont autres que le secteur du bâtiment, la chaux est devenue indispensable dans l'industrie sidérurgique et chimique.

De nos jours, le liant dominant dans le domaine des constructions neuves, reste le ciment, la production de la chaux destinée au secteur de la construction est marginale en comparaison aux autres secteurs industriels. Cependant, depuis le développement des connaissances dans le domaine de la réhabilitation et de la restauration du vieux bâtis, la chaux a réintégré le secteur du bâtiment en l'utilisant dans les mortiers, ce qui a relancé sa production dans plusieurs pays (Van Balen *et al.*, 2015).



Figure 1.2. Four traditionnel en phase de calcination



Figure 1.3. L'intérieur d'un four traditionnel

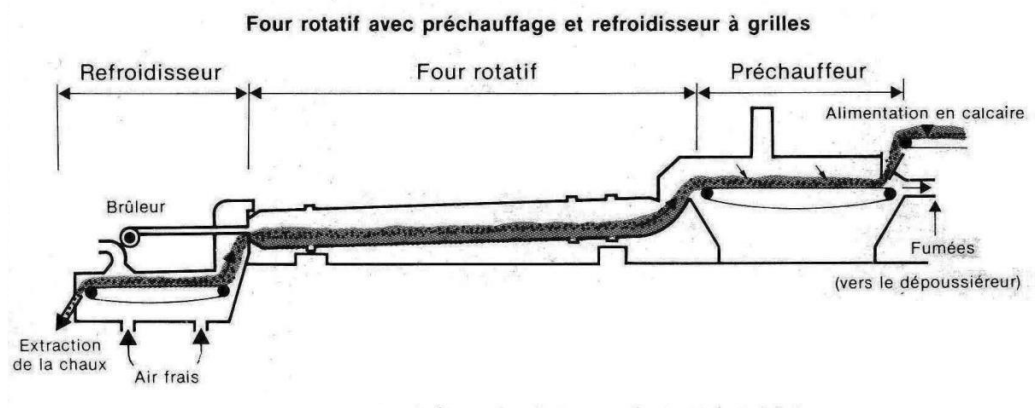


Figure 1.4. Schéma simplifié d'un four à chaux industriel rotatif (Claude, 1994)

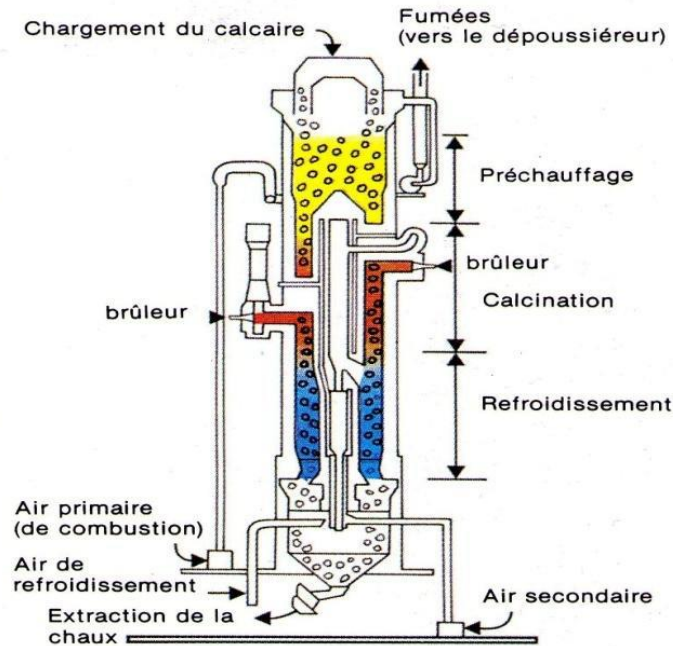


Figure 1.5. Schéma simplifié d'un four vertical industriel (Claude, 1994)

En Algérie la fabrication de la chaux se faisait dans de petites unités artisanales, implantées dans quelques anciennes citées algériennes à des dates plus ou moins reculées. La véritable production (à partir de calcaire et de dolomie) n'a démarrée qu'avec la réalisation de la première phase du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba) au milieu des années 1970 jusqu'à nos jours, il est considéré comme le principal consommateur. Le four à chaux est implanté à l'intérieur même du complexe sidérurgique. Les variétés fabriquées sont des chaux calcitiques et des chaux magnésiennes dont, la production excédentaire est commercialisée comme charge, pour des besoins d'hygiène, d'épuration, d'assainissement ou de construction. La production de chaux connaît des fluctuations. Elle suit en fait plus le rythme de fabrication des produits sidérurgiques que celui des autres utilisations encore marginales (Bourezg, 2000).

La chaux est également produite depuis 2007 par la société BMSD – Saida qui est toujours en activité et propose de la chaux vive ou sous forme de fleur de chaux. La compagnie CEVITAL Constantine, beaucoup plus récente, se joint à la production de la chaux en Algérie pour les besoins de l'industrie sucrière, dont le surplus de production est largement utilisé par l'industrie de production du Placoplatre et une faible quantité est écoulé auprès de quelques petites entreprises privées pour d'autres besoins.

1.2 Les pouzzolanes

La pouzzolane est une « poudre » dont le nom dérive de la ville de Pozzuoli (Pouzzoles), dans la région de Naples en Italie. Préconisée par Vitruve pour les ouvrages hydrauliques, elle fut largement utilisée par les Romains qui combinée au mastic de chaux, permet d'obtenir une chaux hydraulique artificielle ayant comme propriétés une grande résistance avec une faible porosité (Sanchez-Moral *et al.*, 2005).

Actuellement, les pouzzolanes sont normalisées, selon la norme ASTM 618-05, le terme Pouzzolane définit tous les matériaux siliceux ou silico-alumineux qui ne possèdent pas en eux-mêmes de propriétés liantes mais qui, combinés à la chaux (hydroxyde de calcium) en présence d'eau et à une température ambiante, vont former des composés stables et insolubles, possédant des propriétés de cimentation (Lawrenc, 2006 ; Ngoma, 2009).

La réactivité pouzzolanique qui est devenue synonyme de résistance, n'est pas liée uniquement à la composition chimique de la pouzzolane, mais aussi à la taille des particules (granulométrie). En effet (Moropoulo *et al.*, 2004) indiquèrent dans leur recherche que les pouzzolanes finement broyées étaient plus réactives. Les pouzzolanes peuvent être naturelles ou artificielles.

1.2.1 Les pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles proviennent de roches volcaniques réduite en poudre, ou de matériaux terreux, qui possèdent la propriété de réagir avec la chaux (hydroxyde de calcium, *portlandite*), en présence de l'eau, donnant ainsi du silicate de calcium hydraté, de l'hydrate de gehlenithe (C_2ASH_8), ou des hydrates d'aluminate de calcium (CAH_{10} , C_2AH_8 , C_3AH_6), en fonction de différents facteurs, tels que la température de durcissement, la présence d'alcalis, structure, composition et propriétés physiques de la phase réactive (Martinez-Ramirez & Thompson, 1999 ; Ngoma, 2009). Lorsque les pouzzolanes sont rajoutées à des mortiers composés de chaux faiblement ou pas du tout hydraulique, elles participent à leur durcissement et renforcent leur résistance finale.

1.2.2 Les pouzzolanes artificielles

On obtient les pouzzolanes artificielles par broyage de produits céramiques, tels que les briques, les tuiles et les cendres de fours à chaux. Ces matériaux qui ne sont pas naturels présentent les mêmes propriétés que les pouzzolanes naturelles, elles réagissent avec la chaux, et améliorent la résistance finale des mortiers de chaux (Van Balen *et al.*, 2015). Les matières premières des pouzzolanes artificielles sont constituées de matériaux cuits.

Les pouzzolanes artificielles ont toujours fait parties des composants des mortiers de chaux et cela depuis des siècles. Quand la pouzzolane naturelle n'était pas disponible sur place, d'autres matériaux étaient employés, plus fréquemment les produits céramiques (Matias *et al.*, 2014).

Actuellement avec l'intérêt croissant pour les mortiers de chaux et leur développement, plusieurs recherches ont été élaborées. En effet Cerney (Cerney *et al.*, 2006) a étudié l'effet du Métakaolin, de la brique broyée, et du verre émaillé broyé sur les propriétés mécaniques, thermiques, et hydrauliques des mortiers à base de chaux, quant à Andrejkovic̣ová (Andrejkovic̣ová *et al.*, 2015) ont élaboré des enduits pour la restauration des murs en pierre, en utilisant comme additions à la chaux aérienne, du Métakaolin et un faible taux de minéraux argileux (5%). La fumée de silice et les cendres volantes ont été utilisées dans des coulis de chaux aérienne pour réparer des fissures dans des constructions en terre (Müller *et al.*, 2016). Les pouzzolanes artificielles employées dans les multiples travaux de recherches sur les mortiers de chaux ont pratiquement tous remplis le rôle souhaité. L'introduction de

pouzzolanes artificielles résultantes des déchets, contribuent à renforcer la durabilité du secteur de la construction grâce au recyclage des matériaux.

Dans cette partie, on développe uniquement les trois types de pouzzolanes artificielles utilisées dans le cadre de nos recherches, à savoir : Poudre de verre, Métakaolin, et poudre de déchet de brique.

Dans ce qui va suivre, une synthèse des travaux de recherches antérieurs est exposée, ainsi que l'influence de ses additions sur le comportement et les propriétés des mortiers à base de chaux.

1.2.2.1 La poudre de verre

Du fait de sa nature vitreuse et de sa teneur relativement appréciable de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement, et il est classé comme tel selon la norme ASTM C618 (Idir, 2009 ; Ali-Boucetta, 2014), par conséquent beaucoup de travaux se sont dirigés vers la valorisation du verre dans les bétons et les mortiers de ciments, mais moins des travaux sur son éventuel emploi dans les mortiers à base de chaux, même si (Edawrads *et al.*, 2007) ont clairement présenté dans leur étude l'évidence de l'activité pouzzolanique du verre combiné à de la chaux.

Malheureusement en Algérie, le recyclage d'une façon générale n'est pas ancré dans les mœurs du pays et encore moins celui des bouteilles en verre. Aujourd'hui, seuls les pays développés ont recours à cette pratique, fortement encouragée par le tri des ordures ménagères, de plus en plus sélectif. L'intérieur des cités, jardins publics et espaces verts, bords de mer, chemins piétons, et le long des voies de circulation..., croulent sous le poids des bouteilles en verre, provoquant une pollution environnementale considérable, surtout que la durée de vie d'une bouteille en verre est de l'ordre de 4.000 ans, voire plus, avant qu'elle ne se désintègre. L'Algérie consomme l'équivalent de 50.000 tonnes/an de verre qui peut être valorisé. (Estimation faite par le Ministère de l'Environnement (Ali-Boucetta *et al.*, 2021).

Les verres utilisés dans cette étude sont des verres de silicates, composés d'oxydes formateurs, fondants, stabilisants et colorants. La silice (SiO_2) qui représente environ 68 à 74% de la masse, constitue l'élément formateur. Les fondants et les stabilisants sont constitués par (K_2O , Na_2O , CaO , MgO) et la couleur du verre est obtenue en additionnant aux crus, certains oxydes métalliques. Ainsi, le Fe_2O_3 donne la couleur brune, le Cr_2O_3 la couleur verte, le CuO la couleur bleue, le MnO_2 la couleur rose, et le AgO la couleur jaune. Leur emploi dans le verre permet de diminuer la température de fusion et d'augmenter la durée de travail du verre lors du façonnage. Les proportions entre ces trois constituants vont dépendre en grande partie des caractéristiques d'un verre. On obtient par fusion entre 1400°C et 1500°C une masse visqueuse, amorphe, homogène et transparente, le verre (Ali-Boucetta, 2014).

1.2.2.2 La poudre de brique

L'incorporation des déchets de brique est très courante dans la fabrication des mortiers de chaux. Cette technique très ancienne qui remonte à l'époque Romaine présente de nos jours des avantages économique et environnemental. Des traces d'argile traitée thermiquement (brique) ont souvent été détectées dans des vieux mortiers (Matias *et al.*, 2014).

Il est important de savoir que la nature des différents matériaux utilisés était principalement conditionnée par sa disponibilité. Les briques traditionnellement cuites à faible température (600-900 °C) semblent atteindre une activité pouzzolanique lorsqu'elles sont mélangées à la chaux. Leurs constituants amorphes principalement les aluminosilicates pourraient réagir avec la chaux, produisant ainsi une structure stable et dense (Nezerka *et al.*, 2015).

L'incorporation des déchets de briques sous forme de poudre/granulats concassés est un moyen d'augmenter l'hydraulicité des mortiers de chaux, et par conséquent leur performances mécaniques, et d'autres propriétés telles que : la perméabilité, la cohésion entre le liant et les granulats, et la durabilité grâce aux propriétés pouzzolaniques expliquées précédemment (**Cf**, § 1.2.1). Cependant plusieurs facteurs peuvent affectés ses propriétés tels que : composition minéralogique, température de cuisson des briques, indice d'activité pouzzolanique, ainsi que la taille et la surface des particules (Navratilova *et al.*, 2016).

Les avantages de l'utilisation des produits céramiques dans les mortiers de chaux ont été présenté dans plusieurs travaux dont ceux, par exemple, de Moropoulou (Moropoulou *et al.*, 2002) qui dans leur étude sur les mortiers de Justinian's Hagia Sofia qui date de l'époque Byzantine, ont conclu que la pérennité du monument malgré les grandes déformations statiques qu'il a subies à travers le temps, est liée à la nature du mortier chaux/briques concassées et à leur très longue période de durcissement.

(Torres *et al.*, 2020) se sont dirigés vers l'étude de l'influence des résidus céramiques sur le comportement physique et mécanique des mortiers à base de chaux hydrauliques naturelles, et ont trouvés des résultats très satisfaisants concernant les propriétés mécaniques.

Quant à (Pachta *et al.*, 2021), leurs recherches se sont portées sur l'influence des déchets de briques sur les propriétés des mortiers de chaux exposés à des températures élevées. Cette étude s'est faite dans le but de contribuer à l'évaluation du comportement des matériaux par mesure de sécurité en cas d'incendie lors des opérations de restauration des monuments.

(Matias *et al.*, 2014), ont publié un article qui présente une grande importance en termes de référence. Ils ont réussi à faire une revue bibliographique, synthétisant un bon nombre de recherche sur ce sujet, résumé dans le graphique de la figure 1.6.

Le recyclage des déchets des matériaux de démolition dans les chantiers de construction présente, comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, des avantages techniques, économiques, et environnementaux. Dans ce cas l'utilisation des déchets de brique dans les mortiers réduit les couts de transports, la consommation d'énergie et l'économie de la matière première et donc on obtient une conservation des ressources naturelles, en plus d'une réduction de la pollution due à l'accumulation des déchets (Silva *et al.*, 2010).

En Algérie, les déchets générés par les chantiers ne sont pas réutilisés, le recyclage dans ce secteur est toujours à l'état embryonnaire, contrairement aux pays développés où la gestion de ces déchets est normalisée. Les déchets des briques générés par les chantiers de construction, de réhabilitation, ou encore même de fabrication ne sont malheureusement pas exploités, et sont souvent abandonnés le long des voies de circulation ou sur des dépôts sauvages, alors qu'ils détiennent un fort potentiel économique et environnemental, notamment dans le domaine de la réhabilitation du vieux bâti. A titre d'exemple, le projet Volubilis dans le cadre

de la restauration du patrimoine architectural de la ville de Meknes au Maroc, avait suggéré comme étude préliminaire le potentiel de recyclage des déchets de briques dans les mortiers à base de chaux. Ceci a permis de proposer une formulation qui peut remplir les exigences en termes de résistance, retrait et expansion (Alili *et al.*, 2019).

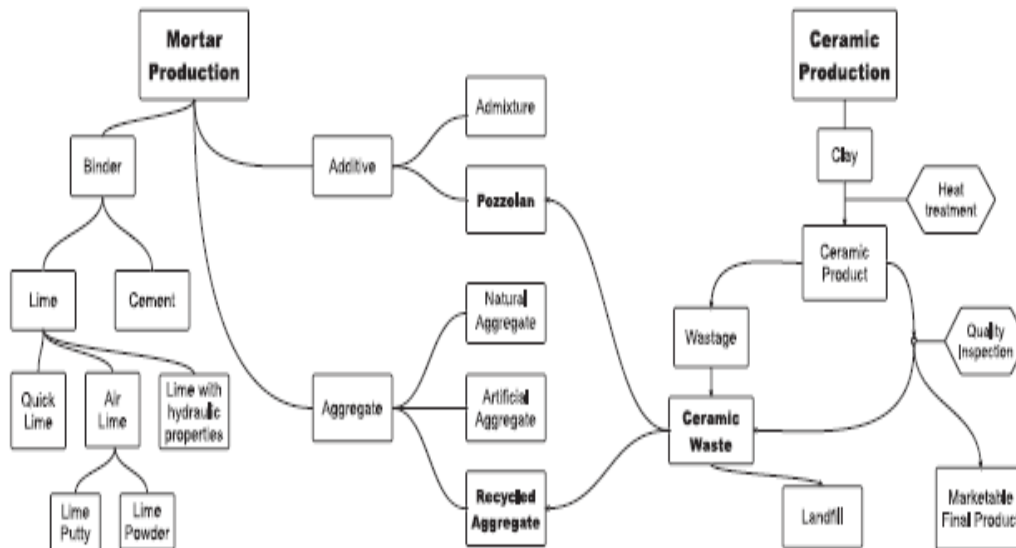


Figure 1.6. Résumé graphique de l'utilisation des produits céramiques dans les mortiers de chaux (Matias *et al.*, 2014)

1.2.2.3 Le métakaolin

Le métakaolin est un matériau pouzzolanique qu'on peut obtenir de la calcination de l'argile kaolinitique à une température comprise entre 500° C et 800°C. La matière première nécessaire pour la fabrication du métakaolin ($Al_2Si_2O_7$) est le Kaolin, qui en entrant en réaction avec $Ca(OH)_2$, produit des gels de CSH à une température ambiante.

Dans leur article (Siddique *et al.*, 2009) ont étudié l'influence du métakaolin sur les propriétés des mortiers et des bétons, et ont énuméré plusieurs de ses avantages dont : l'augmentation de la résistance à la flexion et à la compression, réduction de la perméabilité, réduction du retrait, augmentation de la durabilité, et bien d'autres propriétés. Par rapport à ses caractéristiques, plusieurs recherches se sont tournées vers l'utilisation du métakaolin dans les mortiers de restauration :

(Vavricuk *et al.*, 2018) se sont intéressés à l'effet de l'incorporation du métakaolin dans les coulis injectables à base de chaux hydraulique naturelle, ils se sont concentrés au début de leur étude sur son influence sur les propriétés à l'état frais, puis à la résistance à l'état durcis, ainsi que sur la porosité. Cette étude a révélé que la combinaison du métakaolin avec de la chaux hydraulique naturelle donne un coulis stable à l'état frais qui peut développer une résistance plus élevée à court terme, et qui peut être utilisé potentiellement dans les maçonneries structurelles historiques.

(Nezerka *et al.*, 2014) ont pu déduire de leur recherche sur l'étude des pâtes chaux-pouzzolanes pour modélisation ou conception des mortiers de réparation du patrimoine, que le

métakaolin à réduit considérablement le retrait. Ce grand avantage n'est que bénéfique sur les chantiers, car il entraîne une réduction de la fissuration.

Quant à (Menteiro *et al.*, 2021), les résultats de leur recherche sur l'effet du type de cure et la substitution du métakaolin sur la durabilité des mortiers à base de chaux aérienne, ont montré qu'en plus des avantages mentionnés dans l'étude de (Vavricuk *et al.*, 2018) qu'on a cité précédemment, il existe une amélioration notable vis-à-vis du comportement à l'eau.

L'Algérie possède de riches ressources naturelles de Kaolin, notamment dans la région de Guelma où il se trouve en abondance. Ce kaolin offre l'avantage d'avoir été sujet de plusieurs travaux de recherches, qui ont détaillés ses propriétés physico-chimiques, et qui étaient tous dirigé vers l'axe de la production de divers produits réfractaires (Rabehi, 2013). Malheureusement, l'utilisation du métakaolin obtenue de la calcination de ce kaolin n'a pas encore été exploitée dans les mortiers de réhabilitation et restauration.

1.3 Le sable

Le sable est le principal granulat employé dans les mortiers, il est généralement désigné par un nom spécifique qui correspond à son origine ou sa nature. Par définition le sable est « Particules de roches altérées, généralement riche en silice, plus petites que le gravier, et plus grosse que les limons, entre environ 0.06 mm et 0.5 mm. Les particules sont dures et ne s'effritent pas » (Holmes & Wingate, 1997 ; Ngoma, 2009).

Traditionnellement et surtout par souci d'économie, le choix du sable se fait par rapport à sa disponibilité à proximité des chantiers de construction.

(Papayianni & Karaveziroglou, 1992 ; Carrington & Swallow, 1996) ont résumé le rôle du sable dans les mortiers à base de chaux dans les points suivants :

- Contracte le retrait qui se produit avec le durcissement des mortiers de chaux
- Aide à la cristallisation du CaCO_3 en formant des conduits à travers lesquels la quantité nécessaire de CO_2 peut avoir accès et agir sur les particules de Ca(OH)_2 sous la surface.
- Améliore la cohésion du mélange, les particules de chaux adhèrent plus facilement au sable que les uns aux autres.
- Agit comme filler pour augmenter le volume de la masse.
- Augmente la résistance.

(Lanas & alvarez, 2003) ont étudiés les facteurs affectant le comportement mécanique des mortiers à base de chaux. Ils ont observé que la distribution granulométrique du sable représente l'attribue le plus important par rapport aux caractéristiques du sable.

Plusieurs aspects liés aux granulats (sable) peuvent avoir un impact sur la résistance du mortier. Les sables plus couramment utilisés sont les sables siliceux qui sont durs et chimiquement inertes. (Scannelle *et al.*, 2014) ont d'ailleurs étudié l'effet des types d'agrégats sur les propriétés des mortiers à base de chaux aérienne. Ils ont utilisé des sables siliceux et des agrégats calcaires, et ont observé une différence par rapport à la résistance mécanique, tant au niveau de la microstructure, qu'au niveau de la profondeur de carbonatation.

2. LES MORTIERS DE CHAUX POUR LA RESTAURATION

Comme il a été déjà mentionné au début de ce chapitre, ces dernières décennies l'intérêt pour les mortiers à base de chaux s'est vu croître, suite à la prise de conscience des Pouvoirs Publics, Maîtres d'Ouvrages et Maîtres d'œuvres concernant la préservation du patrimoine architectural.

La restauration se caractérise par la recherche du statu quo : toute modification de l'état originel est proscrite à moins d'être clairement lisible et facilement réversible ; elle se distingue de la réhabilitation par son rapport à la continuité et au changement. L'une est dévolue au maintien de la forme bâtie, sans égard particulier pour l'évolution éventuelle de son contenu ; l'autre transforme un bâtiment pour en actualiser à la fois le programme et la construction. Cette modification d'un lieu existant impose des arbitrages entre les exigences patrimoniales, sociales et économiques (Joffroy, 1999).

Les actions de préservation des monuments historiques regroupent plusieurs mesures de recherches et interventions pluridisciplinaires. Il a été donc nécessaire de clarifier la terminologie et les critères qui définissent les opérations de restauration, ainsi que les propriétés que doivent remplir les mortiers pour jouer leur rôle avec succès à court et à long terme.

2.1 Définition de la restauration

Selon la norme européenne EN 15898 : 2011 (F) Terme 3.3.7 (EN 15898, 2011), la restauration est définie comme étant les actions entreprises sur un bien en état stable ou stabilisé, dans le but d'en améliorer l'appréciation, la compréhension et/ou l'usage, tout en respectant son intérêt patrimonial et les matériaux techniques utilisés.

Au fil des années, les peuples ont pris conscience de l'immense valeur que représente l'héritage architectural. En 1964 la Charte de Venise a mis en valeur le domaine de restauration et de préservation des monuments historiques, en précisant les notions à une échelle internationale. Elle a donc défini la restauration comme étant « une opération qui doit garder un caractère exceptionnel. Elle a pour but de conserver et de révéler les valeurs esthétiques et historiques du monument et se fonde sur le respect de la substance ancienne et de documents authentiques. Elle s'arrête là où commence l'hypothèse, sur le plan des reconstitutions conjecturales, tout travail de complément reconnu indispensable pour raisons esthétiques ou techniques relève de la composition architecturale et portera la marque de notre temps. La restauration sera toujours précédée et accompagnée d'une étude archéologique et historique du monument ».

On peut aussi se référer à la définition de César Brandi (Brandi, 2001), qui pour lui, la restauration constitue « le moment méthodologique de la reconnaissance de l'œuvre d'art, dans sa consistance physique et sa double polarité esthétique et historique, en vue de sa transmission aux générations futures (...). La restauration doit viser à rétablir l'unité potentielle de l'œuvre d'art, à condition que cela soit possible sans commettre un faux artistique, ou un faux historique, et sans effacer aucune trace du passage de cette œuvre d'art dans le temps».

Avant d'entamer une opération de restauration, il est primordial de bien définir le but de l'intervention, pour ne pas porter atteinte à la nature du bâti ancien, et surtout pour ne pas engendrer des effets indésirables sur son état de conservation ainsi que sur sa pérennité et sa durabilité. Chercher et définir les valeurs qui nous poussent à préserver un monument sont une étape cruciale. Chaque monument a ses valeurs spécifiques qui se rattachent à lui, et les interventions doivent se faire dans le respect de ses valeurs, car ce sont elles qui font que ce patrimoine est précieux, et empêchent sa démolition.

2.2 Formulations des anciens mortiers

La composition du mortier constitue la *recette du mortier*, qui reprend tous les composants qui entrent dans sa préparation et leurs quantités respectives. Traditionnellement, les parts de matériaux de ces recettes étaient exprimées en volume. Néanmoins, les mortiers étaient fabriqués sur le chantier même, à partir de matières premières locales disponibles sur place, ou qui pouvaient être extraites à proximité, ce qui explique des variations et des différences de compositions des mortiers dans une seule construction.

Ces fluctuations dans la nature des matériaux employés s'expliquent par le fait que les différents groupes d'artisans qui étaient chargés des différentes parties de l'ouvrage, travaillaient chacun avec un mortier particulier. (Van Balen *et al.*, 2015). Le rapport chaux/sable est l'un des facteurs qui influencent les caractéristiques et les performances des mortiers de chaux aérienne. Vu son importance il a été étudié dès le début des recherches modernes sur ce matériau.

Beaucoup de travaux ont été réalisés avec diverses proportions dans le but d'obtenir à la fois des mortiers compatibles avec les bâtiments historiques et suffisamment durable pour les interventions de conservation et de réhabilitation. Nous citons par exemple (Lanez & Alvarez, 2003), (Arizzi *et al.*, 2011), et (Stefanidou & Papayanni, 2005).

La proportion volumétrique 1/3 (chaux aérienne/sable) a été soulignée comme référence, à cause de son indication par Vitruve dans son livre "les dix livres d'architecture". Cependant une certaine incertitude existe sur cette référence qui pourrait être liée à la chaux en pâte et non à la chaux hydratée en poudre, car l'agrégat comprenait généralement des pouzzolanes qui remplissent partiellement le rôle de liant, en plus du fait que la traduction du latin vers les langues modernes peut comporter plusieurs imprécisions liées au sens actuel des concepts de construction. (Thiemann *et al.*, 2010).

Le rapport 1/3 est aussi considéré comme le meilleur rapport en ce qui concerne la compacité, avec un sable possédant une granulométrie continue, du fait d'un meilleur remplissage des vides par la chaux. Ainsi il y a une bonne raison physique concernant le choix du rapport 1/3 comme référence et du choix de travailler avec des proportions volumétriques. Néanmoins, le comportement des mortiers de chaux aérienne est déterminé à la fois par les facteurs physiques (porosité du mortier, nature, forme et dimensions des granulats), mais aussi chimiques (type de chaux, degré de carbonatation, composés secondaires, dimensions et formes des cristaux).

Cependant, la recette d'un mortier historique ne doit pas nécessairement être celle du mortier de restauration. Les matériaux originaux s'altèrent de manière plus au moins prononcée en

vieillissant. La composition doit s'aligner sur les caractéristiques des matériaux originaux au moment de la restauration. En outre, certains désordres, apparaissent en parallèlement avec le vieillissement du bâtiment. (Van Balen *et al.*, 2015)

Ces dernières années, des mortiers à base de chaux aérienne avec différentes proportions des principaux composants ont été testés. Le tableau 1.1 présente une synthèse de ces recherches basées sur les spécifications des normes européennes avec des adaptations pour les mortiers à base de chaux aérienne (Lanez & Alvarez, 2003 ; Veiga *et al.*, 2010 ; Faria *et al.*, 2008 ; Stefanidou & Papayanni, 2005 ; Borsoi *et al.*, 2012 ; Marques *et al.*, 2006). Les rapports chaux/sable sont principalement indiqués en volume, et un rapport approximatif en poids est mentionné entre parenthèses. L'équivalence a été estimée en utilisant des masses volumiques apparentes moyennes.

Tableau 1.1. Intervalles des caractéristiques mécaniques et physiques obtenues des essais sur des mortiers de chaux aérienne et de sable (Veiga, 2017)

Chaux aérienne / sable_ rapport volumétrique. (masse approx)	Résistance à la flexion 90 jours (MPa)	Résistance à la compression 90 jours (MPa)	Module d'élasticité 90 jours (MPa)	Coef Capillarité 90 jours (Kg/(m ² .min ^{1/2}))	Porosité ouverte (%)
1 :4 (1 :14)	0.2-0.5	0.3-0.6	-	-	28
1 :3(1 :10.5)	0.2-0.8	0.6-1.6	2330-4440	1.1-2.3	27-35
1 :2(1 :7)	0.3-0.6	0.6-1.5	2090-4710	1.9-2.6	28-39
1 :1(1 :3.5)	0.4-0.5	0.5-1.2	2860		24-50

2.3 Propriétés des mortiers de chaux pour la restauration

Les mortiers à base de chaux sont les mortiers préférables pour la réparation des anciennes structures historiques. Cette préférence est liée au fait de leur compatibilité avec les caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et élastiques du support historique authentique. Cependant toute intervention de restauration d'un ancien édifice historique vise une certaine durabilité. Cette dernière est en générale étroitement liés aux conditions d'expositions environnementales ainsi qu'à d'autres aspects qui doivent toujours être pris en considération lors de la préparation des mortiers.

Les facteurs qui influent sur la durabilité des mortiers de restauration sont (Balén *et al.*, 2016) :

- Les conditions d'exposition environnementales (cela inclus la pollution atmosphérique, pluie acide, gel, dilatation, séchage-mouillage, altérations par le vent, attaque biologique).
- Les caractéristiques du support sur lequel le mortier est appliqué (compatibilité).
- La qualité des matériaux utilisés pour la confection des mortiers (liant, additions, granulats, adjuvants et eau), cela influence la porosité, les caractéristiques mécaniques, ainsi que l'élasticité et la déformabilité.

- Maintenance (dont l'absence entraîne des dégâts prématurés qui peuvent s'aggraver avec le temps)
- Pratiques de mise en œuvre sur le site.

Les exigences pour une bonne tenue et une bonne performance des mortiers diffèrent de leur fonction dans la construction. Par exemple, les caractéristiques mécaniques et élastiques sont d'une importance majeure pour les mortiers de jointement, tandis que pour les enduits, c'est l'adhérence et les interactions qui en découlent (migration des sels du support au mortier) qui ont la plus grande importance par rapport aux autres caractéristiques.

Les mortiers à base de chaux pour la restauration sont souvent employés pour remédier aux problèmes suivants (Papayianni & Huges, 2019):

- Fissuration,
- Humidité ascensionnelle,
- Accumulation de sel,
- Perte de cohésion du mortier et d'adhérence au support,
- Dégâts due au phénomène de gel-dégel,
- Altération due au vent,
- Altération de la couleur.

Selon le rapport de RILEM TC 203-RHM, les propriétés liées à la durabilité des mortiers à base de chaux pour la réparation sont :

- Porosité et distribution de la taille des pores, associée à l'absorption d'eau par capillarité, séchage, perméabilité à la vapeur d'eau, résistance au gel et à la cristallisation des sels.
- Résistance mécanique : résistance à la compression et à la traction.
- Élasticité : module d'élasticité, déformabilité.
- Retrait (à court et long terme).
- Adhérence, cisaillement, et flexion par traction.
- Coefficient de dilatation thermique.

D'autres caractéristiques spécifiques telles que la couleur (pour les façades architecturales) ou la résistance à l'abrasion pour les mortiers de revêtement de sol sont aussi pris en compte pour la durabilité des mortiers de réparation. Les propriétés relatives à la durabilité des mortiers seront différentes selon les cas. Des investigations et un diagnostic seront systématiquement effectués avant la préparation de la recette du mortier de réparation comme il a été réalisé dans certain projet, tel que celui de l'Odéon Romain du site archéologique de Dion en Grèce, ou des échantillons ont été pris in-situ, et ont été analysé selon une méthodologie holistique développée par le laboratoire de matériaux de construction de l'université Aristote de Thessalonique (Grèce). D'ailleurs cette méthodologie ne prend pas seulement en compte les résultats des analyses mais aussi d'autres aspects (Environnement, applications,...etc.), tout en étant flexible, puisqu'elle peut être appliquée dans tout type d'échantillon de mortier (quel que soit son type ou taille) (Papayianni *et al.*, 2013).

3. FACTEURS DE PATHOLOGIES DES MORTIERS DE CHAUX

Comme tout matériau, les mortiers de chaux sont sujets à plusieurs dégradations dépendantes de facteurs bien distincts : l'environnement immédiat, la nature des matériaux, la conception initiale, et le respect des règles de l'art. Le processus de dégradation va se manifester progressivement dans le temps, développant des pathologies qui vont affecter le côté esthétique mais aussi structurel du mortier dans la construction. Les facteurs les plus importants, qui reviennent le plus souvent sont : l'humidité, la présence des sels, la pollution et l'attaque biologique (Ngoma, 2009).

3.1 Humidité

Qu'elle soit sous forme solide, liquide, ou vapeur, l'humidité est considérée comme le principal facteur de dégradation des matériaux de construction. Elle peut agir de manière directe : infiltrations, fuites, condensation, etc..., ou indirecte par la réaction physico chimique qu'elle provoque : gel, dissolution, corrosion, etc.... L'humidité dans une construction a trois origines principales :

- Les remontées capillaires : leur mécanisme est lié directement aux caractéristiques des éléments de maçonnerie ou du mortier, telles que la porosité, la capillarité et l'absorption. Dans ce cas l'humidité peut être causée par la présence d'une nappe phréatique (humidité d'origine structurelle), ou à cause d'une nappe d'eau perdue qui circule sous la construction (humidité d'origine accidentelle).
- L'eau de pluie : elle peut pénétrer quand l'épaisseur du mur est trop faible, présence de fissures, ou encore joint et enduit fissurés, endommagés, voire inexistants. Elle se manifeste par des cloques, boursoufflures et décollement dans les revêtements et enduits.
- La condensation : ce phénomène de transformation de la vapeur contenue dans l'air en eau liquide peut se produire par deux formes, une condensation superficielle qui dépend principalement de la température atteinte sur la surface intérieure d'une paroi (voir figure 1.7). Ou une condensation en masse, qui se produit lorsque la pression partielle de vapeur dans une couche d'épaisseur, devient supérieure à la pression de vapeur saturante (Bureau Veritas, 2012).

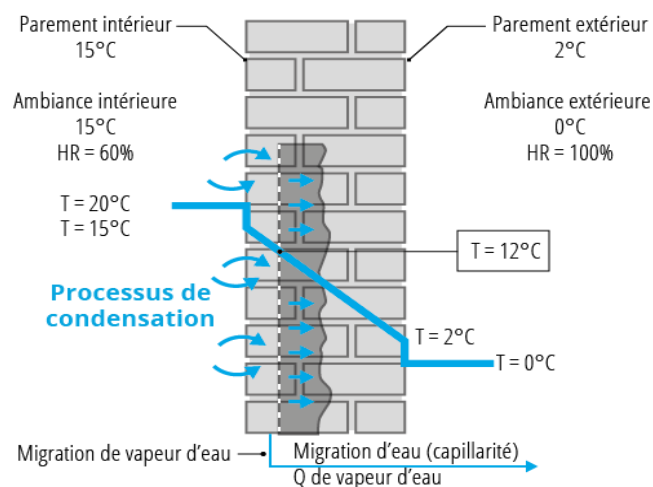


Figure 1.7. Mécanisme de condensation dans un mur

(<https://qualiteconstruction.com/fiche/condensations-dans-les-logements/> consulté le 29/06/2022)

Les manifestations de l'humidité varient selon son type, concernant la condensation, elle se manifeste visiblement sous formes de moisissures sur les murs, dans les angles, au niveau des ponts thermiques, décollements des enduits, formation de cloques dans le revêtement d'étanchéité, auréole sur les plafonds, taches sur les papiers peints des cloisons, etc.

Les effets de la pénétration de la pluie apparaissent sur le mur de façade exposé à la pluie, au niveau des toitures et des couvertures, sur les menuiseries extérieures. Elles se présentent sous formes de déformations, cloques, boursouflures, décollement dans les revêtements ou les enduits, ou sous forme de mousses et lichens sur les murs orientés au nord, nord-est, non exposés au soleil et soumis au ruissellement. La figure 1.8 présente un exemple de pathologie due aux eaux pluviales dans une façade. Dans le cas des remontées capillaires, l'humidité est généralement sous forme de taches et franges au niveau des soubassements des façades comme il est indiqué sur la figure 1.9, apparition des mousses et des lichens, efflorescences, salpêtre, etc.



Figure 1.8. Coulée noire correspondant à l'écoulement de l'eau de pluie (<https://www.techni-murs.com/nos-activites/ravalement/> consulté le 29/06/2022)



Figure 1.9. Manifestations de la remontée capillaire dans le vieux bâti (<https://www.ramond-maconnerie.com/lutter-contre-le-probleme-dhumidite-revel> consulté le 29/06/2022)

Dans le cas des mortiers, l'humidité est étroitement liée à leur nature poreuse. Lorsque l'eau circule dans le réseau poreux des matrices carbonatées, le carbonate de calcium peut être partiellement dissous. L'eau contenant du CO_2 dissous devient acide, participant ainsi à la dissolution du CaCO_3 , qui à son tour va provoquer l'érosion de la surface du mortier, augmenter sa porosité et par conséquent sa perméabilité, ce qui le rendra plus vulnérable à d'autres agents agressifs (Veiga, 2017).

3.2 Présence des sels

La cristallisation des sels fait parties des causes majeures de détérioration des matériaux poreux de construction, elle se produit lorsque la pression de cristallisation développée par les sels dans les pores, surpasse la résistance du matériau. La pression de cristallisation dépend de la saturation qui elle-même dépend de deux facteurs interdépendants : la saturation de la solution et la taille des pores (Lubelli *et al.*, 2014)

Les sels se transportent dans les mortiers par l'infiltration des eaux à travers la structure poreuse des mortiers, et se déposent lors de l'évaporation de l'eau (solvant) dans les pores ou sur les surfaces, produisant en général des efflorescences (Ransom, 2002).

Généralement, il existe plusieurs sortes de sels dans les maçonneries anciennes, les plus dommageables sont les chlorures, les sulfates et les nitrates, elles peuvent provenir du sol (eaux du sous-sol), de l'environnement (proximité de la mer), ou du matériau lui-même, les ions solubles (SO_4 , Cl^- , NO_3^-) peuvent être à l'origine de dégradations assez importantes dans les mortiers. En effet, lorsque les sels se cristallisent, ils développent des pressions dans les pores grâce à deux mécanismes : l'augmentation due à la cristallisation et l'augmentation due à l'hydratation des sels. Selon (Goncalves, 2007) la présence simultanée des sulfates et chlorures augmente le potentiel destructeur, et même si les processus de détérioration sont très complexes, la pathologie a été décrite d'une manière générique par lui selon le diagramme suivant :

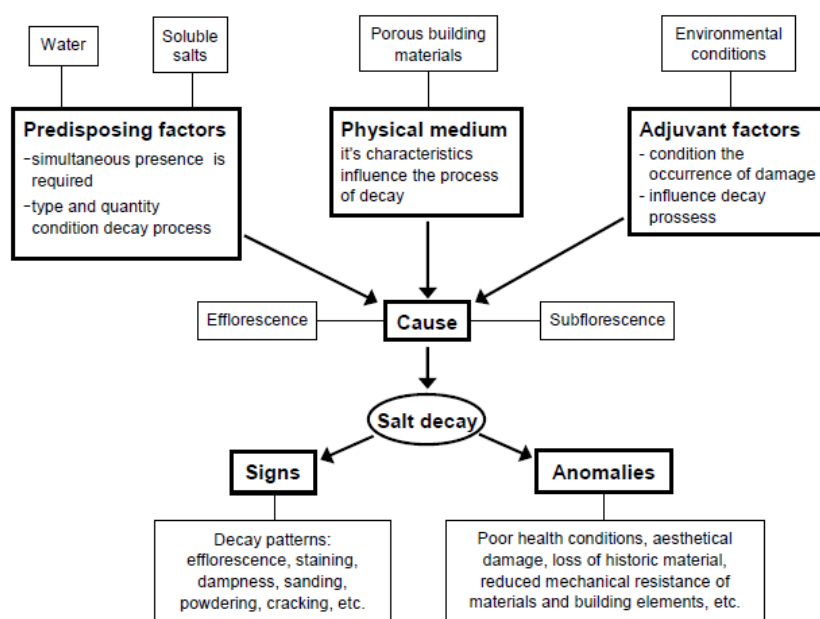


Figure 1.10. Pathologies dues à la présence des sels (Goncalves, 2007)

Lorsque des cristaux de sels apparaissent, on peut envisager trois cas de dégradations :

- Soit il s'agit de sels efflorescents (cristallisation en surface),
- soit de crypto-efflorescences (cristallisation sous la surface du matériau),
- ou encore de composés de gonflement issus de la réaction de composants du mortier avec des sels (Van Balen *et al.*, 2015).

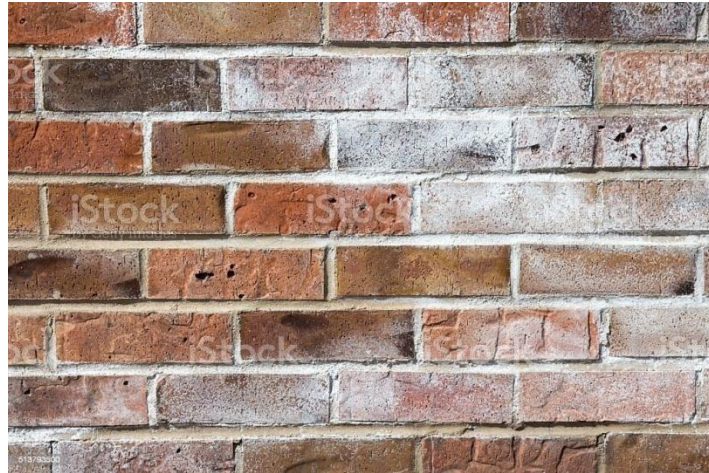


Figure 1.11. Manifestations de la présence des sels dans un mur en brique

3.3 Pollution atmosphérique

Par définition, les polluants atmosphériques sont les substances présentes dans l'atmosphère qui peuvent avoir des effets néfastes sur la santé et l'environnement. L'ampleur de leur influence sur le système (humains, écosystème, bâtiment ... etc.) est étroitement liée au type et à la concentration des polluants (Tidblad *et al.*, 2009).

Les effets de la pollution de l'air sur les constructions architecturales ont été largement reconnus au cours des dernières décennies. L'importance des dégâts engendrés par les polluants a suscité plusieurs travaux de recherches surtout sur les anciennes constructions. (Briblecombe, 2000) a justement abordé le sujet, en étudiant l'évolution à travers le temps passé et présent de ce phénomène sur le patrimoine architecturale, alors que (Lefèvre & Ausset, 2001) présentent dans leur article une synthèse des travaux, ainsi que les interprétations du laboratoire des systèmes atmosphériques sur les effets de la pollution atmosphérique sur l'altération des matériaux du patrimoine bâti, ils se sont concentrés sur la pierre et le verre, et ont souligné dans leur conclusion le manque d'approche par rapport aux autres matériaux tels que les mortiers.

Le gaz carbonique (CO_2), le dioxyde d'azote (NO_2), et le dioxyde de soufre (SO_2), sont les polluants les plus courants dans les milieux urbains ou industriels, ils se déposent directement sur les surfaces (voir figure 1.12), se dissolvent dans l'eau de pluie et réagissent avec les mortiers de chaux, en formant des sulfates (Veiga, 2017), et d'après Martinez (Martinez-Ramirez *et al.*, 1997) c'est le (SO_2) qui est considéré comment l'agent le plus agressif, formant à lui seul de l'acide sulfurique par dissolution dans l'eau.



Figure 1.12. Manifestation de la pollution atmosphérique

3.4 Attaque biologique

La détérioration biologique est définie comme « toute modification indésirable des propriétés d'un matériau causée par des organismes vivants » (Coutinho *et al.*, 2015). Algues, mousses, lichens, champignons, plantes et insectes sont à l'origine de dégradations de plusieurs matériaux. La principale cause favorisant leur prolifération est l'humidité, donc n'importe quelle partie d'une construction peut être concernée.

Dans le cas des mortiers de chaux, certaines de leurs caractéristiques telles que la porosité et la rugosité favorisent la rétention d'eau qui à son tour aide au développement de micro-organismes, qui à leurs tours vont être sources de nutriment pour d'autres êtres vivants (Veiga, 2017).

Les organismes vivants sont capables d'interagir avec des matériaux en modifiant leurs propriétés, et dans le cas du patrimoine architectural bâti, la bio détérioration peut être esthétique, physique, et chimique, alors que la plupart du temps, ses trois formes de détériorations sont étroitement liées (Coutinho *et al.*, 2015).

Le premier impact de l'attaque biologique et le côté esthétique, la production de pigments organiques et le développement de bio films colorés sur la surface peuvent modifier l'aspect visuel des matériaux comme c'est le cas sur la figure 1.13, et ce type de détérioration est très négatif dans le cas du patrimoine bâti (Gazulla *et al.*, 2011). La croissance des micro-

organismes peut aussi modifier d'autres caractéristiques telle que l'isolation thermique, ou encore fragiliser la résistance physique suite à des variations de volume (dilatation et retrait) (Kuhnel, 2004).



Figure 1.13. Manifestation d'une attaque biologique (https://deavita.fr/maison/comment-enlever-la-mousse-sur-un-mur-exterieur-briques-beton-bicarbonat-vinaigre-javel-541145/?image_id=541224 consulté le 29/06/2022)

4. TECHNIQUE DE CARACTÉRISATION DES ANCIENS MORTIERS DE CHAUX

Les mortiers historiques n'étaient pas préparés selon des spécifications exactes et définies, ils étaient confectionnés à partir d'un large éventail de matériaux locaux combinés au savoir-faire du maçon. Cependant ils peuvent nous fournir des informations sur la technologie de construction des bâtiments ainsi que leur époque historique. Ces informations sont aussi utiles que les documents historiques et constituent le point de départ pour la préparation des mortiers de réparations, compatibles mais aussi durables. Il est donc primordial que leur caractérisation se fasse sur des bases scientifiques.

La caractérisation des anciens mortiers est effectuée pour plusieurs objectifs, néanmoins on peut distinguer trois catégories bien distinctes :

- Conservation (sauvegarde et consolidation des anciennes structures)
- Restauration (formulation de mortier de réparation approprié et compatible)
- Identification et documentation (Groot *et al.*, 2007).

Une approche systématique a été établie par RILEM TC 167 COM pour la caractérisation des mortiers historiques. Cette approche présente un outil précieux pour identifier les composants du mortier, la nature du liant, du granulat, des additions ainsi que leurs proportions (Schueremans *et al.*, 2011).

4.1 Documents historiques

L'étude des documents historiques incontournable à la compréhension et l'évaluation des anciens mortiers est une étape très pertinente dans la méthodologie de caractérisation, car au-delà de l'intérêt historique, elle renvoie sur un intérêt scientifique. D'après (Marinowitz *et al.*, 2012), on peut obtenir des informations sur les anciens mortiers à partir de trois sources

historiques : en premier lieu, on peut considérer le monument lui-même comme meilleure source, l'investigation au laboratoire sur des échantillons de mortiers originaux peut fournir des informations sur le type de liant, granulats, rapport liant/granat, et dans certains cas le processus d'extinction de la chaux peut aussi être déterminé. La deuxième source n'est autre que les anciens textes historiques liés à l'évolution de la technologie des mortiers depuis l'antiquité Romaine, l'ouvrage de (Vitruve, 1999) est le meilleur exemple. Jusqu'au début de la période du moyen âge, les romains ont détaillés plusieurs recettes de mortiers à base de chaux, expliquant les différents ajouts et proportions des ingrédients, mais malheureusement les descriptions de fabrications des mortiers sont devenues très rares avec le temps, pour disparaître complètement, perdant ainsi le précieux savoir-faire des anciens maçons. En plus des documents écrits, les représentations graphiques des anciens chantiers et artisans (voir figure 1.14) offrent pleins de détails sur la fabrication des mortiers de chaux.

Marinowitz (Marinowitz *et al.*, 2012), a publié 79 documents contenant une centaine de photos, datant du onzième au quinzième siècle, illustrant les procédures de fabrication de l'époque Médiévale.

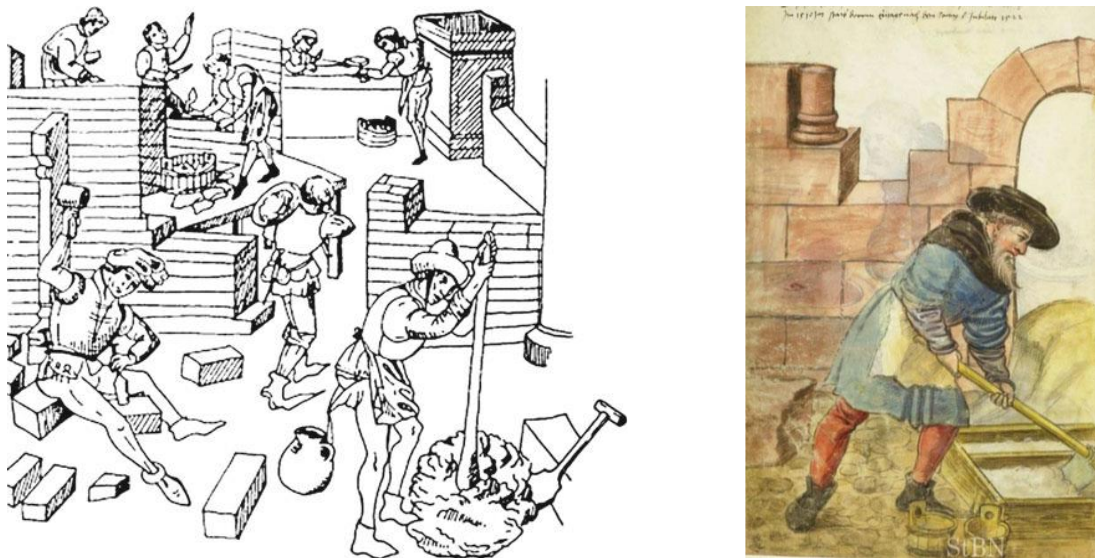


Figure 1.14. Représentations graphiques des anciens chantiers (Marinowitz *et al.*, 2012),

4.2 Analyse visuelle et échantillonnage

L'analyse visuelle et l'échantillonnage constituent une étape cruciale dans toute procédure d'investigation des anciens mortiers. Par définition, l'échantillonnage est l'acte d'enlever de façon permanente des matériaux de la structure d'un bâtiment pour une analyse ou une caractérisation (Hughes *et al.*, 2002).

Dans le cas des anciens mortiers, l'échantillonnage se fait dans le cadre des travaux de conservation ou de restauration du patrimoine architectural, ou encore pour une étude académique des caractéristiques des matériaux utilisés, visant des recherches de différentes natures comme l'archéologie ou la science des matériaux.

L'analyse visuelle permet d'identifier les désordres de l'édifice, et dresser son état de conservation générale, ce qui va mener ensuite à établir les priorités dans le plan de prélèvements d'échantillons. Grâce à l'inspection visuelle on peut déterminer certaines

caractéristiques physiques avant l'échantillonnage telles que : la forme des joints, la couleur et la texture des mortiers et la présence de certains matériaux rajoutés, pour formuler les premières hypothèses sur les mécanismes de dégradations (Van Balen *et al.*, 2015).

L'échantillonnage se fait dès que les désordres qui vont faire objet d'étude seront identifiés d'une manière précise. Les échantillons prélevés ne doivent pas être nombreux et de grandes tailles. L'échantillon doit être accompagné d'informations indiquant le lieu du prélèvement et son état de conservation (cohésion). Il est aussi très important lors de l'échantillonnage d'évaluer les conditions environnementales et climatiques dont sont exposées certaines parties de l'édifice. La variation de température et la fréquence du cycle séchage-mouillage sont des facteurs qui influencent les mécanismes de dégradations (Veiga *et al.*, 2001).

(Binda *et al.*, 2000) ont résumé les points principaux d'échantillonnage dans leur étude sur les procédures d'investigations pour le diagnostic des maçonneries historiques comme suit :

- l'échantillonnage doit être effectué en respectant le bâtiment existant ;
- la quantité de matériel échantillonné doit être cohérente avec la portée et les exigences des procédures d'essai;
- si la détermination du type et de l'étendue des dommages sont impliqués, un échantillonnage doit être effectué sur différentes parties du bâtiment afin d'étudier tous les types de dégradation ;
- l'échantillonnage doit être effectué à sec sur les parties du bâtiment non soumis à l'action de la pluie ou par une réparation antérieure, surtout quand c'est les caractéristiques des mortiers, du liant et des granulats qui sont nécessaires
- le nombre d'échantillons doit être assez élevé afin de représenter statistiquement la situation des maçonneries existantes, mais ce n'est jamais possible.

4.3 Caractérisation chimique et minéralogique

La composition des mortiers historiques est essentielle lors des travaux de restauration du patrimoine architectural. Dans le cas où il n'y a pas de documents, archives, ou autres sources qui peuvent fournir les informations nécessaires pour la détermination de la composition exacte des mortiers, un ensemble de procédures analytiques peut être employé, dont l'analyse chimique, diffraction des rayons X, analyse thermogravimétrique, et d'autres techniques qui se complètent les unes les autres, car il est difficile voire même peu judicieux de procéder à la caractérisation du mortier avec une seule méthode. La méthodologie couramment utilisée est présentée dans la figure 1.15.

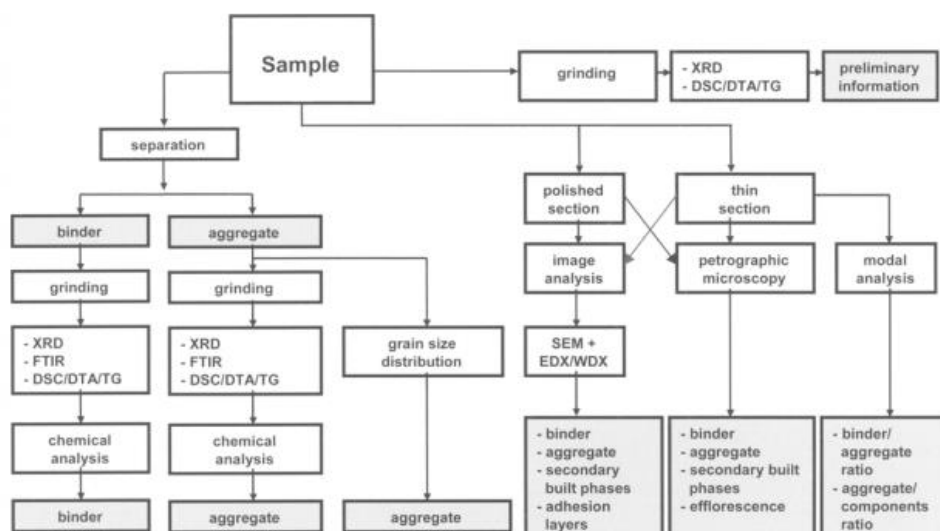


Figure 1.15. Schéma de la méthodologie de caractérisation des mortiers (Middendorf *et al.*, 2005)

4.3.1 Caractérisation chimique

En général, la caractérisation chimique se fait par la méthode d'analyse dite par voie humide, même si cette méthode n'est pas normalisée à l'échelle internationale. Les acides utilisés varient en fonction des laboratoires, car jusqu'à présent il n'existe aucun acide de concentration normalisée destiné aux analyses chimiques des mortiers de chaux. L'analyse chimique nécessite le broyage de l'échantillon de mortier, puis la séparation de l'agrégat du liant en dissolvant le liant grâce à de l'acide dilué. Habituellement, la solution acide est composée d'une part de concentrée acide pour neuf parts d'eau distillée (Van Balen *et al.*, 2015).

Cependant l'analyse chimique par voie humide est une analyse en masse, si l'agrégat contient d'éventuels composants solubles, il sera impossible de déterminer à partir de quelle phase les composés chimiques proviennent dans le mortier historique. C'est pour cette raison qu'une analyse microscopique et minéralogique doit toujours être effectuée, et les résultats de l'ensemble de ses analyses doivent être en accord et comparés entre eux pour une interprétation complète et précise.

Par ailleurs, il est possible d'établir toute une gamme d'analyses significatives. Parmi ces analyses, il y a la détermination de la silice soluble, cette dernière est l'un des composants des silicates hydratés de calcium du liant indicateur d'hydraulicité du liant. Il est possible aussi de faire des analyses par rapport aux oxydes solubles de Fe, Ca, Na et K. Il est probable aussi que d'autres identifications soient demandées tels que la présence de substances organiques et les sels solubles, qui sont souvent présents dans les anciens bâtiments, ou encore la caractérisation des pigments (Middendorf *et al.*, 2005).

4.3.2 Caractérisation minéralogique

On parle de diffraction au rayon X quand un faisceau de rayon X réagit avec la matière qu'il rencontre, de manière élastique (sans perte d'énergie) et inélastique. L'interaction élastique,

appelée diffusion Rayleigh, se traduit par une réémission d'ondes électromagnétiques de même fréquence en chaque atome, et ce dans toutes les directions de l'espace (Figure 1.16). Or, la longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques, les interférences des rayons diffusés peuvent s'ajouter (interférences constructives) soit s'annuler (interférences destructives). Selon la direction de l'espace, un flux important de photons X, ou au contraire très faible, peut être produit ; ces variations selon les directions forment le phénomène de diffusion. Il a été prouvé par M. Von Laue et MM. Bragg père et fils (Les prix Nobel de physique de 1914 et 1915) que pour les phases cristallisées, les directions pour lesquelles les interférences sont constructives sont propres à chaque phase.

Par conséquent, en faisant varier la position du détecteur, il est possible d'obtenir une carte d'identité d'une espèce minérale spécifique. Celle-ci se présente sous la forme d'une courbe, appelée diffractogramme (Figure 1.17), représentant l'intensité des rayons X perçus par le compteur (en nombre de coups) en fonction de l'angle rayon incident – rayon mesuré (2θ) (Merckx, 2013).

La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse de la structure d'un minéral. Elle permet de distinguer les différentes formes de cristallisation d'un même composé (par exemple pour la silice, distinguer le quartz de la cristobalite). Une poudre formée d'une phase cristalline donnée, va toujours donner lieu à des pics de diffraction dans les mêmes directions, avec des hauteurs relatives à peu près constantes. Ce diagramme de diffraction forme ainsi une véritable signature de la phase cristalline.

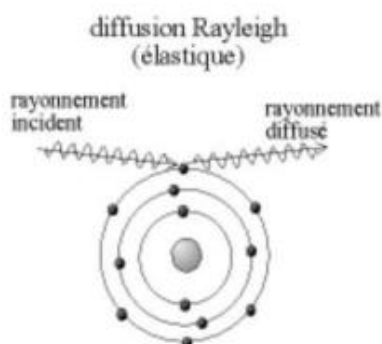


Figure 1.16. Diffraction des rayons X (Merckx, 2013).

La DRX est notamment utilisée pour la détermination des minéraux argileux, incorporés avec le granulat ou issus du liant. Elle peut, par extension, être employée pour vérifier la composition de la matrice des matériaux, notamment ceux dont le liant n'est pas entièrement composé de chaux (mortier plus terreux ou matériaux à base de plâtre) (Coutelas, 2005). La différenciation du ciment et de la chaux hydraulique naturelle n'est possible que par des analyses minéralogiques (Callebaut *et al.*, 2001 ; Middendorf *et al.*, 2005 ; Groot, 2007).

Les poudres sont obtenues par broyage d'un fragment de mortier, puis l'échantillon est placé sur un support (porte échantillon), pour être ensuite éclairé par des rayons X d'une longueur d'onde fixe. Le schéma d'intensité de réfraction avec l'angle d'incidence changeant du faisceau de rayons X, reflètera les caractéristiques de la minéralogie de l'échantillon déterminant ainsi la composition du mortier (Ngoma, 2009). En plus des détails généraux de

l'échantillon, il est indispensable de noter les conditions périphériques fixées pour la diffraction des rayons X, dont :

- Le type de tube à rayon X (Cu, Co, etc).
- Intensité du courant du tube à rayon X [mA].
- Voltage du tube à rayon X [kV].
- Vitesse de rotation du goniomètre en degrés par unité de temps[°min⁻¹].
- Zone d'angle [2 θ].
- Type de porte-échantillon.

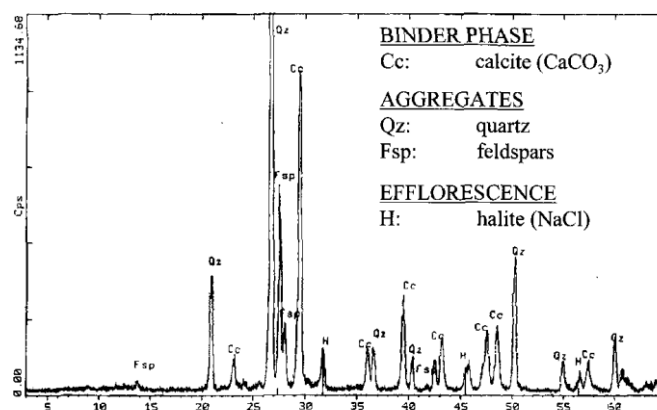


Figure 1.17. Diagramme des phases de diffraction de rayon X d'un échantillon de mortier de chaux historique (Middendorf *et al.*, 2005)

Grace aux phases finales détectées, il est possible de déterminer la relation entre les liants, granulats et adjuvants, ainsi que des indications sur d'éventuelles interactions avec l'environnement, comme l'efflorescence. On peut aussi trouver dans la littérature, plusieurs exemples d'analyse DRX sur des différents anciens mortiers de chaux (Middendorf *et al.*, 2005).

En plus de la diffraction des rayons X, il est commun de se diriger vers l'analyse pétrographique, qui grâce à sa pluralité le matériau peut être examiné à plusieurs échelles d'observations sans que son intégrité soit modifiée. L'analyse pétrographique consiste à observer et à décrire un mortier dans sa globalité (liant et granulat), ainsi que dans le détail de ces constituants comme le montre les figures 1.18 et 1.19. Ce point représente un atout majeur dans la caractérisation des anciens mortiers, les observations qui se font à la loupe de diamantaire (grossissement x 10 environ), ou sur lames minces au microscope optique (microscope polarisant en transmission : grossissement jusqu'à x200 environ), ou encore en microscope électronique à balayage (grossissement théorique x 300 000), offrent le plus grand nombre de critères et d'informations.

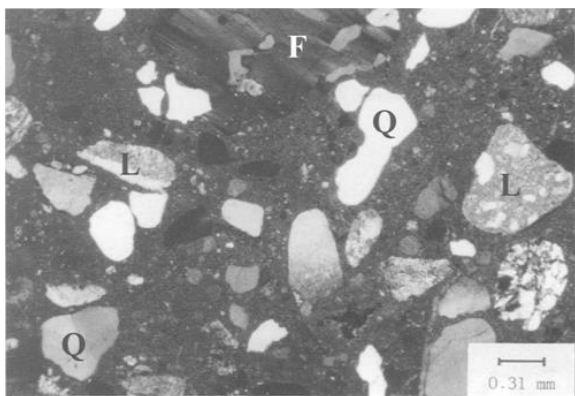


Figure 1.18. Lame mince d'un mortier de chaux avec quartz (Q), calcaire (L), feldspath (F) et granulats (Middendorf *et al.*, 2005)

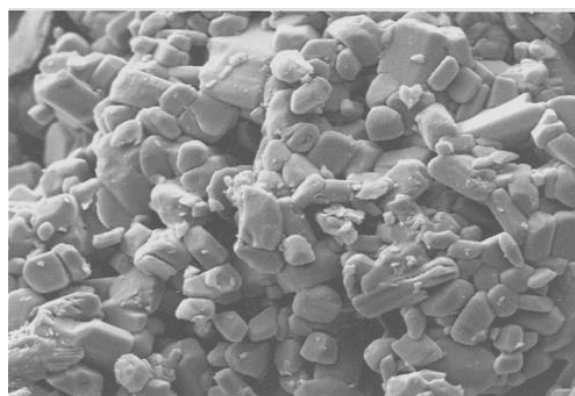


Figure 1.19. Cliché MEB de la microstructure d'un mortier historique de gypse (Middendorf *et al.*, 2005)

Un microscope électronique est un équipement d'analyse d'un échantillon suite au bombardement de la surface par un faisceau d'électrons dits primaires. Lors de la rencontre avec le solide, les électrons primaires interagissent avec les électrons du solide bombardé, apportant de multiples informations sur les propriétés du matériau : topographie, composition chimique locale, cristallographie, potentiel électrique, champ magnétique local... les interactions élastiques et inélastiques représentent les deux grands types pouvant être distingués (Figure 1.20) (Goldstein *et al.*, 2003 ; Merckx, 2013). Outre l'identification des éléments du granulat, ces observations permettent de noter la texture et la structure interne du mortier, et parfois même mettre en évidence la succession de couches, surtout quand il s'agit des mortiers d'enduits (Coutelas, 2005).

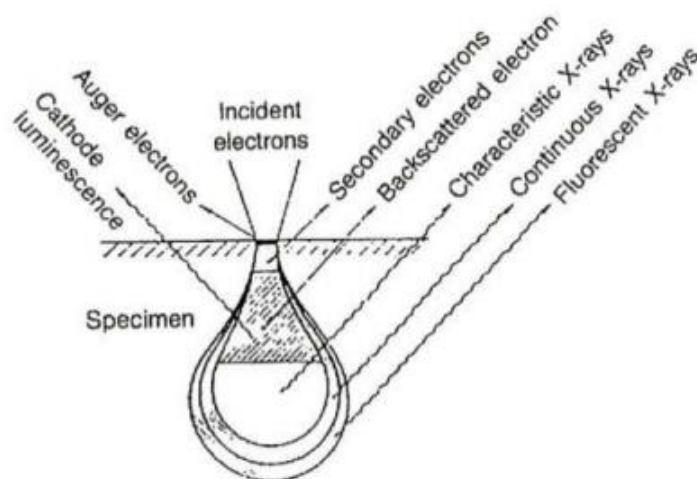


Figure 1.20. Schéma récapitulatif des interactions causées par un faisceau électronique incident sur un échantillon de matière (Goldstein, *et al.*, 2003).

4.4 Caractérisation mécanique et physique

La détermination des caractéristiques physiques et mécaniques des anciens mortiers est une étape vitale pour l'élaboration des mortiers de réparation pour les anciens bâtiments, car ce genre d'intervention nécessite que les mortiers de réparations proposés doivent être durables et compatibles avec les propriétés chimiques et physiques du support d'origine, surtout que la

composition chimique et minéralogique ne peut pas fournir à elle seule les informations nécessaires pour prendre une décision.

4.4.1 Caractérisation mécanique

En règle générale, et notamment à cause de la taille des échantillons des mortiers historiques, ou encore de leur état de détérioration, déterminer leurs propriétés mécaniques s'avère une tâche assez difficile. La détermination des caractéristiques mécaniques des mortiers historiques peut être très utile dans la préparation des mortiers de réparation, et dans ce cas il est préconisé de considérer la maçonnerie comme un seul ensemble et non comme des parties isolées. Les outils utilisés in-situ sont standardisés, et le matériel le plus couramment employé est le scléromètre, qui offre l'avantage d'un emploi facile et non destructif.

Ayant su que les mortiers historiques sont principalement fabriqués à base de chaux, leur résistance à la compression est généralement comprise entre (0.5 et 3 MPa) pour la chaux aérienne. La détermination de la résistance mécanique en laboratoire est obtenue à partir d'échantillons de forme cubique.

Dans le cas des mortiers historiques, l'épaisseur des échantillons est en général très limitée, la taille et la géométrie d'un échantillon sont conditionnés par son emplacement dans la structure et par le type de maçonnerie (blocs de pierre réguliers, moellons, brique...), les échantillons extraits sont très limités en nombre, ont souvent une forme irrégulière, peuvent ne pas être intacts et contenir des vides, de grosses particules de granulats, ou des petits cailloux. Tous ces facteurs rendent difficile, voire presque impossible l'obtention d'échantillons de taille standardisée. Dans leurs travaux de recherches, (Valek & Veiga, 2006), ont justement soulevé tous ces points, et ont présenté deux essais non-standardisés pour évaluer la résistance à la compression de mortiers historique d'un château en Slovénie.

- La première méthode consiste à couper les échantillons par voie humide avec une scie circulaire diamantée, de manière à avoir des spécimens d'échantillons avec au moins deux cotés parallèles et réguliers.

- Dans le cas de la deuxième méthode, les essais ont été effectués sur les échantillons prélevés sur le site, ils ont été conservés dans leur forme et dimension d'origine, sans découpe pour éviter tout dommage. Les échantillons ont juste été dépoussiérés et nettoyés de la colonisation biologique. La forme régulière nécessaire à l'adaptation à la machine de compression a été réalisée au moyen d'un mortier de confinement, conçu et calculé spécialement pour être plus résistant que les échantillons extraits. Cependant les deux méthodes n'ont donné que des résultats indicatifs. Donc concernant la résistance mécanique, on se trouve souvent dirigé vers le module d'élasticité E pour avoir une idée sur la résistance du matériau (Callebaut, 2000; Hughes & Valek, 2003 ; Ngoma, 2006). Cependant une autre propriété qui peut être très utile dans l'analyse comparative de la résistance, il s'agit de la porosité, en raison de la relation inverse qui lie la résistance à la compression à cette dernière, car habituellement une diminution de résistance à la compression est accompagnée du gain du taux de porosité totale.

4.4.2 Caractérisation physique

Généralement les caractéristiques physiques les plus étudiées sont la porosité et la capacité d'absorption d'eau. La porosité est définie comme l'ensemble des volumes des vides sur le volume total du matériau, sa détermination est la principale caractéristique physique dans les mortiers historique, car elle influe à la fois sur les comportements mécaniques, que sur les transferts thermiques, d'humidité, le sel, ou encore sur le développement d'organismes microbiologiques.

(Lanas & Alvarez, 2003), ont rapporté dans leur étude expérimentale que contrairement au ciment, les mortiers les plus résistants sont ceux qui présente une plus grande porosité, expliquant que ce phénomène peut être lié à la combinaison d'une teneur en liant plus élevée et d'une plus grande accessibilité au dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂), entraînant une carbonatation plus importante. Ils ont étudié la structure des pores par la technique du porosimètre au mercure pour établir la distribution des pores, cependant dernièrement, certains chercheurs ont considéré que cette technique est inappropriée sur les mortiers à base de chaux, en raison des fortes pressions utilisées qui peuvent endommager la texture du mortier et donc conduire à des estimations erronées de la porosité (Ngoma, 2006). Une autre méthode est utilisée pour mesurer la porosité totale et la porosité ouverte, qui consiste à submerger des échantillons dans de l'eau sous vide, et mesurer le poids avant et après submersion « méthode d'essai de la pierre naturelle - Détermination de la masse volumique réelle, et densité apparente, et de la porosité totale et ouverte ».

(Groot & Huges, 2007), recommandent de prendre en considération tous les points ci-dessous, dans toute analyse et interprétation de la porosité d'un mortier :

- Il n'y pas de méthode analytique qui peut donner la nature précise des pores d'un matériau.
- Une méthode peut donner des résultats différents d'une autre.
- Sans un échantillonnage statistique complet, les résultats analytiques restent de simples estimations.
- D'autres données, tels que l'analyse chimique ou l'examen pétrographique doivent être évaluées pour la compréhension de la nature de l'échantillon (mortier d'origine, mortier de remplacement, ou mortier endommagé).

Quant à l'absorption d'eau, elle est généralement évaluée par l'essai d'absorption par capillarité, car ce phénomène est très fréquent dans les anciens bâtiments, et influe beaucoup sur les mécanismes de détérioration, telles que la cristallisation des sels et le gel-dégel, qui sont le résultat du mouvement de l'eau dans, à travers et hors de la pierre (Russel *et al.*, 2002).

Le tableau 1.2 résume les caractéristiques physico-mécaniques des anciens mortiers les plus courants identifiés par (Moropoulou *et al.*, 2005) dans leurs travaux de recherche.

Tableau 1.2. Caractéristiques physico-mécaniques des anciens mortiers

Type de mortiers	Volume Cumulé (mm ³ /g)	Densité apparente (g/cm ³)	Diamètre des pores (µm)	Surface spécifique (m ² /g)	Porosité totale (%)	Résistance à la traction (MPa)	Rapport liant/agrégat
Mortier de chaux	170-230	1.5-1.8	0.8-3.3	1.3-3.3	30-45	<0.35	1 :4-1 :1
Mortiers de chaux avec portlandite non altérée	105-241	1.8-1.9	0.03-6.5	1.7-10.6	20-43	0.6-0.7	1 :2-1 :1
Mortier de chaux hydraulique	90-230	1.7-1.2	0.1-3.5	2.5-13.5	18-40	0.35-0.55	1 :4-1 :1
Mortier de pouzzolane naturelle	160-265	1.6-1.9	0.1-1.5	3-14	30-42	>0.60	1 :5-1 :3
Mortier de pouzzolane artificielle	170-280	1.5-1.9	0.1-0.8	3.5-9	30-40	>0.55	1 :3

4.5 Essais complémentaires

Il est fréquent d'utiliser d'autres techniques pour identifier les liants, les agrégats et les adjuvants, comme l'analyse thermique. Cette analyse thermique peut se faire selon trois méthodes d'essai, nécessitant de très petites quantités d'échantillons ce qui représente un avantage dans la caractérisation des mortiers historiques, et même si chacune de ces méthodes sont distinctes les unes des autres, elles aboutissent toutes approximativement, aux mêmes résultats, en ce sens qu'elles sont toutes basées sur le même principe des transformations physiques par chauffage dans des conditions contrôlées (Moropoulou *et al.*, 1995). Il s'agit de :

- La thermogravimétrie (TG), qui mesure la perte de poids d'un échantillon lorsqu'il est chauffé. La perte de poids pendant le chauffage peut être liée à des décompositions physiques spécifiques dans les matériaux dues à l'augmentation de la température.
- L'analyse thermique différentielle (ADT), s'illustre par le tracé d'un graphique en continu pendant toute la durée du chauffage, ce qui permet de montrer la différence de température entre l'échantillon et un matériau de référence inerte (généralement Al₂O₃), chauffé en même temps, à la même vitesse et durant la même période. Les pics endothermiques sont enregistrés lorsque l'étalon continue d'augmenter en température et l'échantillon ne le fait plus. Les transitions endothermiques caractérisent certains minéraux, qui peuvent être quantifiés et identifiés à l'aide de l'ADT. (Middendorf *et al.*, 2005).

- La calorimétrie différentielle à balayage (CDB) est effectuée sur le même principe de base que celui de l'ADT, à la seule différence que l'ADT, enregistre simultanément et maintient la même température pour l'échantillon et le matériau de référence (Al_2O_3), le CDB, ajoute de l'énergie au fur et à mesure du chauffage de l'échantillon. L'énergie consommée est utilisée comme mesure de la valeur calorifique des transitions thermiques des échantillons (Willard *et al.*, 1981).

Par rapport à la TG, les deux dernières méthodes (ADT et CDB) offrent l'avantage de leur capacité à identifier des transformations polymorphes dans les composés qui n'impliquent pas la perte de poids.

Les analyses thermiques sont des techniques assez complexes à réaliser. Elles nécessitent des connaissances rigoureuses et de l'expérience. Elles doivent être réalisées uniquement par des experts qualifiés. Le tableau 1.3 présente quelques exemples de température typique de la dissociation des liants minéraux les plus communs :

Tableau 1.3. Température de dissociation de certains liants minéraux

$CaCO_3$	650-890°C
$Ca(OH)$	400-520°C
$MgCO_3$	450-520°C
$Mg(OH)_2$	350-420°C
Ca_3SiO_5 (C_3S , Alite)	1425°C (phase de transition donc uniquement ADT ou CDB)
Ca_3SiO_4 (C_2S , Belite)	Phase de transition 693
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	45-120°C

(Moropoulou *et al.*, 2005) ont pu collecter les données présentées dans le tableau 1.4, à travers les essais effectués dans leur recherche sur un grand nombre d'échantillons différents (environ 400), prélevés en Grèce ancienne, échantillons de mortiers et de béton romain, byzantins, post-byzantins, ainsi que d'anciens mortiers prélevés des fortifications, monastères, églises, bâtiments historiques et structures de maçonnerie, tous situés dans le bassin méditerranéen.

Tableau 1.4. Caractéristiques chimiques des mortiers historiques issus de l'analyse ATG

Type de mortiers	Eau physiquement liée (%)	Eau structurellement liée (%)	CO ₂ %	CO ₂ / Eau structurellement liée
Mortier de chaux	< 1	< 3	> 32	10, 7.5-10
Mortiers de chaux avec portlandite non altérée	> 1	4-12	18-34	1.5-9
Mortier de chaux hydraulique	> 1	3.5-6.5	24-34	4.5-9.5

Mortier de pouzzolane naturelle	4.5-5.5	5-14	12-20	< 3
Mortier de pouzzolane artificielle	1-4	3.5-8.5	22-29 , 10-19	3-6

4.6 Détermination de la courbe granulométrique

La courbe granulométrique des agrégats constituant le mortier, ainsi que le rapport liant/granulat sont des caractéristiques utiles surtout quand il s'agit de reproduire le mortier d'origine. Cependant, certains problèmes peuvent survenir lorsque le liant et le granulat sont séparés, car très souvent des erreurs surviennent lors de la séparation, notamment si le granulat est très fin. Dans cette situation il est très important de sélectionner soigneusement le solvant approprié ou d'utiliser des procédures mécaniques minutieuses, étant donné que certaines combinaisons de liant-granulat sont pratiquement impossible à séparer. Le tableau.1.5 ci-dessous présente les solvants utilisés pour la séparation des liant-granulats.

Tableau 1.5. Solvants pour liants minéraux

Agrégat	Liant	Solvant /agent de séparation	Remarques
Agrégat non carbonaté ou non lié au sulfate (exp : quartz, feldspath, mica, grès, basalte, pierre ponce)	Tous les liants	HCl dilué HCl acide salicylique /méthanol mélangé. EN 196, partie 4	Les types et les concentrations d'acides ne sont pas encore normalisés, et peuvent être différents d'un pays à un autre et d'un laboratoire à un autre
Agrégat lié au carbonate	Chaux non hydraulique	L'eau comme solvant EDTA (dilué)	Séparation mécanique, particules grossières en raison de recristallisation avec croissance de grain doit être surveiller, attaque le CaCO ₃ le plus fin du granulat
Agrégat lié au carbonate		L'eau comme agent de séparation	Séparation mécanique, si possible compactage de phase sur la section
Agrégat lié au carbonate	Liants hydrauliques	L'eau comme solvant	Séparation mécanique, comptage de phase sur section polie, comptage de phase sur lame mince.
Agrégat lié au sulfate	Chaux non hydraulique	Non applicable	comptage de phase sur section polie. comptage de phase sur lame mince

Les échantillons doivent être broyés avec soin, de préférence à la main. Pour les échantillons friables, un prétraitement thermique à 400°C peut être effectué pour ségréguer le mortier.

Selon le genre du liant déterminé au préalable par une autre analyse, un solvant/agent de séparation approprié sera choisi et ne fera que dissoudre le liant et non l'agrégat. Après séchage à 105°C, les agrégats sont pesés et tamisés, les poids des fractions retenues sur les tamis sont enregistrés. Les résultats de la pesée des fractions doivent être affichés dans un diagramme semi-logarithmique des pourcentages en poids des passants à travers le tamis. La figure 1.21 présente un exemple d'une courbe granulométrique d'un mortier historique (Middendorf *et al.*, 2005).

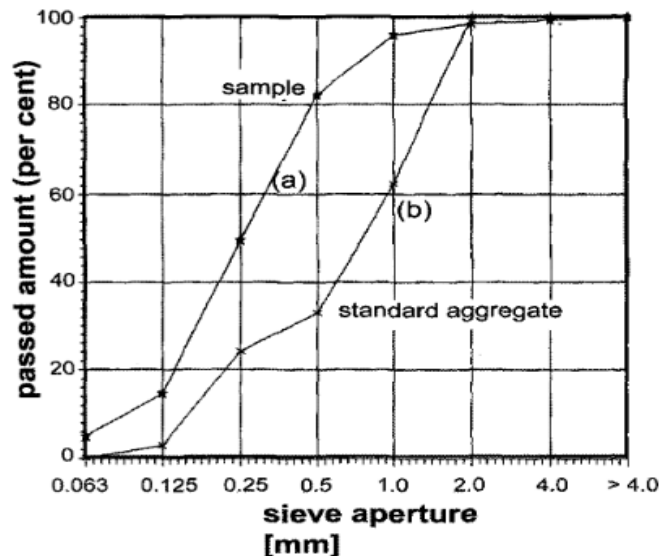


Figure 1.21. Courbe granulométrique: a) mortier historique, b) granulat standard. EN 196-1)

5. CONCLUSION

Les mortiers à base de chaux aérienne ou hydraulique sont maintenant connus comme étant les mortiers les plus compatibles avec les bâtiments anciens ou historiques, dont les enduits sont justement à base de ce matériau. De nombreuses études et recherches scientifiques et techniques ont été développées dans ce contexte, pour faciliter l'exécution et l'application des mortiers pour les différents travaux à mener sur le vieux bâti.

Ce premier chapitre consacré aux mortiers à base de chaux, pour la restauration du patrimoine architectural, a fait le tour des principales données utiles et nécessaires aux études expérimentales, essentiellement tournées vers la proposition d'un mortier à base de chaux, pour les besoins de restauration d'un édifice historique implanté dans la ville de Skikda.

Comme nous avons pu le voir dans ce chapitre, il est nécessaire, voire impératif de procéder à des tests sur le support d'origine, pour être en mesure de remplir toutes les conditions de compatibilité et d'obtenir les résultats les plus prometteurs. D'où les multitudes de recherches scientifiques qui proposent des méthodes et des essais de caractérisations développés par plusieurs laboratoires et centres de recherches à travers le monde.

Cependant, il y a lieu de noter qu'il n'existe pas de recette toute prête et une méthodologie précise à suivre, les facteurs de dégradations des mortiers sont différents d'un ouvrage à l'autre et restent étroitement liés aux conditions environnementales et à bien d'autres aspects.

La synthèse de ce chapitre sera exploitée dans l'étude d'un monument historique architectural. Nous avons choisi le théâtre régional de la ville de Skikda, qui sera présenté dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

**ÉTUDE DE CAS : THÉÂTRE
RÉGIONAL DE LA VILLE DE
SKIKDA**

CHAPITRE II

ÉTUDE DE CAS : THÉÂTRE RÉGIONAL DE LA VILLE DE SKIKDA

Dans ce chapitre, nous présenterons un descriptif du théâtre de la ville de Skikda, objet de la présente étude. On procède au diagnostic puis au prélèvement de différents échantillons du mortier in-situ. Les résultats obtenus sont interprétés et démontreront la nature du tissu d'origine ainsi que les éventuelles causes de dégradation.

Sommaire

1. PRESENTATION DU THÉÂTRE	44
2. ANALYSE VISUELLE ET PATHOLOGIQUE	49
3. ECHANTILLONNAGES ET TECHNIQUES D'ANALYSE AU LABORATOIRE	52
4. RÉSULTATS DES ANALYSES AU LABORATOIRE	55
4.1. Densités et porosité accessible à l'eau	55
4.2. Granulométrie et forme des grains	55
4.3. Analyse DRX.....	57
4.4. Analyse thermogravimétrique	59
5. CONCLUSION	62

Chapitre II Étude de cas : Théâtre régional de la ville de Skikda

PRÉAMBULE

Selon l'étymologie, le théâtre signifie un lieu pour voir et regarder. Le théâtre est un édifice qui a toujours eu une grande importance dans les villes, depuis l'antiquité. Vitruve de son vrai nom Marcus Vitruvius Pollio est un architecte Romain, à l'origine du nombre d'or (ou divine proportion), utilisé dans le monde entier, aussi bien en architecture que dans les différents domaines de la science et de la technologie, a consacré six chapitres de son cinquième livre, à parcourir les notions théoriques et pratiques de l'art de construire les théâtres. C'est dire combien est-ce important pour les anciens, le théâtre sous toutes ses formes, qu'ils soient bâti ou à ciel ouvert.

Le choix du cas d'étude, s'est porté sur le théâtre régional de la ville de Skikda, pour proposer un mortier de réparation qui soit compatible et en adéquation avec la structure existante de l'édifice, dans le respect de toutes les règles et recommandations existantes.

Dans ce chapitre, on commence par une succincte présentation de ce prestigieux monument historique et culturel, avant de s'intéresser à l'analyse visuelle de l'état des lieux, qui permettent de dresser la liste des principales pathologies, dont souffre la construction, en mettant l'accent, notamment sur celles en rapport avec la dégradation des mortiers d'origine. Cette étape permettra ensuite de collecter différents échantillons et de les analyser au laboratoire selon une méthodologie de caractérisation, avec pour objectif, la détermination de la composition des mortiers d'origine et les facteurs causes de ses dégradations.

1. PRESENTATION DU THÉÂTRE

Ancien comptoir phénicien, la ville de Skikda fut fondée en l'an 45 avant J.C (Bertrand, 1903), son emplacement stratégique lui a valu beaucoup de colonisation et chacune d'elle a ancré ses marques à jamais, en faisant construire des édifices pour marquer son empreinte, devenant au fil du temps, sa richesse patrimoniale architecturale actuelle.

Le théâtre municipal est situé en plein centre de la ville de Skikda (figure 2.1), jadis sur le site des ruines du temple Romain de Vénus, à l'emplacement de l'ancien théâtre en bois de la ville qui fût la proie d'un incendie. Une planche a été établie à cet effet, lors des toutes premières inspections scientifiques réalisées vers 1850, par l'officier et archéologue français Adolphe Hedwige Alphonse Delamare. La décision de sa construction fut prise en 1851, et s'est concrétisée avec des plans et des devis quantitatifs et estimatifs (voir figure 2.2, 2.3, et 2.4), collectés lors de notre recherche au centre d'Archives nationales d'outre-mer en France (voir Annexe A). Finalement, c'est au début du vingtième siècle qu'on commença sa construction, et fut officiellement inauguré en 1932, dans le cadre de la célébration du centenaire de la sinistre colonisation française en Algérie.



Figure 2.1. Théâtre régional de Skikda.
Source auteur 2019

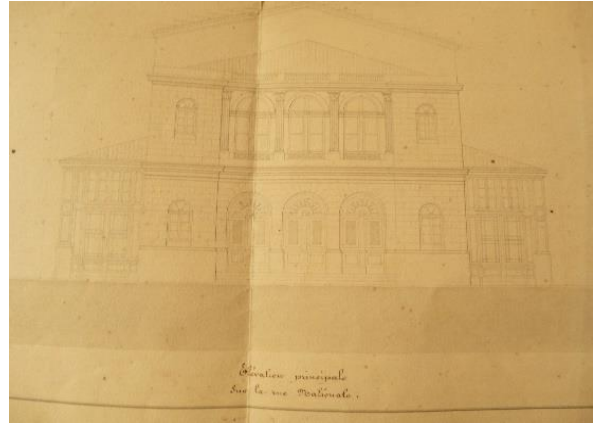


Figure 2.2. Façade principale du théâtre.
Source : photo auteur à partir des archives d'Outre mer -Aix-en-Provence 2018

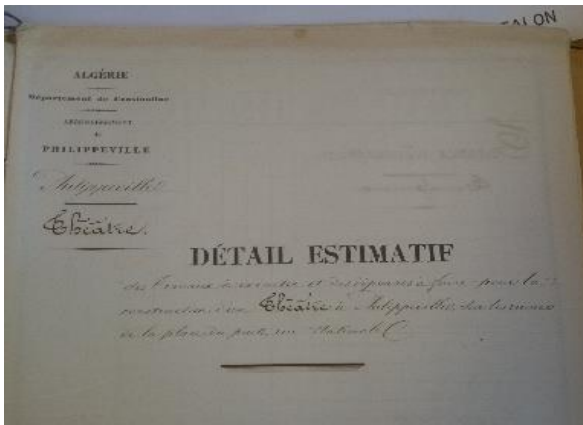


Figure 2.3. Page de garde du détail estimatif



Figure 2.4. Soumission de l'entreprise en charge des travaux

Source : photos prises par l'auteur (centre d'archive d'outre-mer Aix-en-Provence) 2018

Le théâtre régional de Skikda couvre une superficie de 1 000 m² pour une capacité totale d'accueil de 500 places. L'édifice s'articule autour d'un imposant mur porteur longitudinal qui s'épare l'édifice en deux, à partir de la scène et qui semble avoir été consolidé à un moment donné par une grosse poutre en béton armé. Ce gros mur porteur qui sépare la salle de la partie privative, réservée aux différentes fonctions du théâtre est voulu par le concepteur de l'ouvrage et de la structure porteuse, pour créer une certaine homogénéité structurelle entre l'avant et l'arrière de l'édifice, comportant plusieurs niveaux. La façade arrière du théâtre est adossée à un grand mur de soutènement, pour reprendre la route longitudinale Mekki Ourtilani, très haute par rapport à la rue Didouche Mourad. Ce mur porteur longitudinal, combiné au reste de la structure porteuse du théâtre, enveloppe l'ensemble de l'édifice, pour composer sa volumétrie et distinguer ses quatre principales fonctions, tel qu'illustré sur la figure 2.6 ci-après.

Comme la plupart des édifices de l'époque coloniale, il est construit en traditionnel avec des murs porteurs et des murs de refend, réalisés en pierres et en briques pleines, contreventés par une structure en béton armé suivant un système constructif poteaux/poutres qui reprennent

les balcons de la salle et une partie du foyer central. Les différents planchers en béton armé, reposent sur des solives métalliques, prenant appui sur les murs porteurs et de refend.

Une charpente métallique support d'une couverture en ardoise à l'avant et en tuiles plates à l'arrière, prenant appui sur les murs porteurs et les refends de l'édifice, complète l'enveloppe extérieure du théâtre. Une large coupole richement décorée et ornée de vitraux, située entre la salle réservée au public et la scène, à environ 13,00 m de hauteur, procure à l'édifice un éclairage naturel zénithal, augmentant le faste de l'ouvrage.

La coupole (présenté sur la figure 2.5), soutenue par des éléments structuraux en adéquation avec l'architecture d'ensemble de l'édifice, est contreventée en partie inférieure par une ceinture en béton armé et deux poutres renversées, prenant assise sur une série de huit colonnes en béton armé, richement décorées. Le balcon latéral droit est soutenu par une charpente en bois, ce qui ajoute à cet édifice, une complexité supplémentaire à la structure.



Figure 2.5. Coupole vue de la scène du théâtre. Source : photo auteur 2017

L'édifice est surélevé par rapport au niveau du trottoir sur toute la hauteur des voûtes, l'escalier monumental, qui orne l'entrée principale sur toute sa longueur, se termine de part et d'autre par deux boutiques. Une librairie de l'ANP sur la gauche et une agence de voyage sur la droite, complètent le faste décor du théâtre.

L'entrée principale s'ouvre sur un large hall d'accueil ovale qui se prolonge sur les deux (2) extrémités, en donnant accès sur un hall de distribution avec le foyer au centre et des escaliers en colimaçon de part et d'autre, qui mènent vers les loges et balcons qui entourent la scène.

La salle de spectacle en forme de corbeille, est richement décorée. Les places du public sont conçues pour voir et être vu, que l'on soit en mezzanine ou au niveau des balcons et loges. La scène à l'italienne, située au centre de l'édifice derrière un immense rideau, a été légèrement surélevée par rapport à la mezzanine. Au pied de la scène se trouve la fosse de l'orchestre et sous la scène, les locaux de rangement des effets scéniques.

A l'arrière de la scène, un large espace s'ouvre sur un escalier qui donne accès aux trois étages supérieurs, réservés aux loges des artistes et à l'administration du théâtre. L'accès du personnel et des artistes se fait directement par la rue Mekki Ourtilani, située à l'arrière de l'édifice.

La figure 2.6, montre une coupe transversale qui illustre les principaux volumes constituant le théâtre, de l'avant à l'arrière. Les différents plans sont présentés dans l'Annexe B.

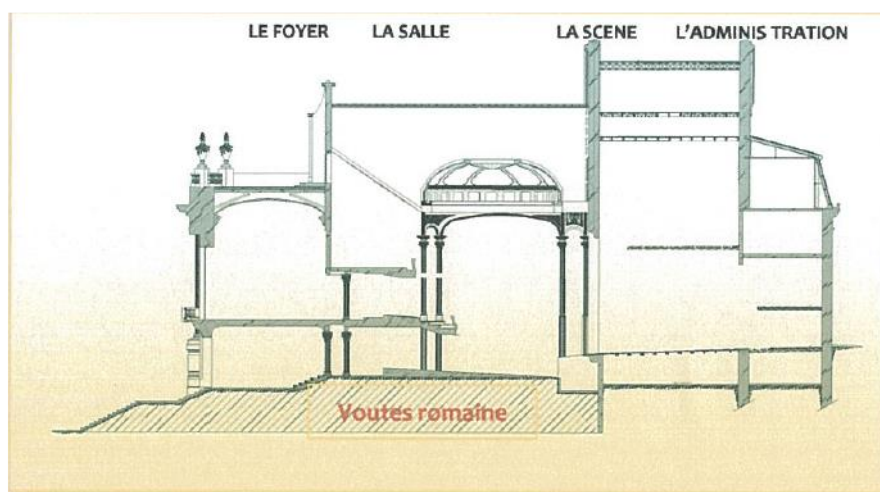


Figure 2.6. Principe de conception du théâtre. Source : rapport d'expertise du BET

Le choix du théâtre régional de la ville de Skikda comme cas d'étude n'était pas un choix aléatoire, car cet édifice fait partie intégrante du patrimoine de la ville, et possède plusieurs valeurs patrimoniales. Le théâtre a une valeur historique qui ne représente pas seulement la valeur du passé en générale, mais aussi la valeur d'une époque précise (Riegl, 1903), car comme nous l'avons mentionné un peu avant, un théâtre en bois fut détruit et remplacé par le théâtre actuel et ce, à l'occasion de la préparation des festivités du centenaire de la sinistre colonisation française de l'Algérie. Son emplacement en plein centre-ville de Skikda, lui confère une seconde valeur qui est la valeur de position, celle-ci accentue plus sa valeur architecturale, qui réside dans sa particularité d'être le seul édifice du style baroque de la ville.

Son imposante façade hautement perchée est constituée d'une partie médiane saillante épousant le contour d'un arc de cercle, dotée de trois grandes portes d'entrées et de trois balcons en demi-lune, à balustrade ajourée, mettant en valeur trois grandes et larges baies vitrées monumentales. Sous chaque balcon et au-dessus de chaque porte, un mascarón représentant la tête d'un personnage chevelu qui hurle. Cette représentation impressionnante symbolise l'art baroque et le style des masques, du théâtre antique (figure 2.7). Par ailleurs, la façade est surmontée d'une frise sur laquelle est gravé le nom de l'édifice "THEATRE MVNICIPAL" en caractères latins classiques comme on peut le voir sur la figure 2.8. Une corniche en forme "d'Oméga" ornée à l'arrière-plan d'une terrasse protégée par une classique

balustrade ajourée, surmontée de quatre remarquables pots à feu, (expression de l'art baroque), dressés comme des témoins regardant vers le ciel. En léger retrait à partir de la terrasse et dans un style gréco-romain, se dresse un tympan avec un fronton, en forme de triangle à longue base, se prolongeant, par le toit en ardoises bleues.



Figure 2.7. Représentation du style baroque. Source : photo auteur 2022



Figure 2.8. Ecriture "THEATRE MVNICIPAL". Source : photo auteur 2022

Comme il a été déjà mentionné ci-avant, l'ensemble du théâtre est construit sur les substructures antiques d'un ancien temple romain. Le temple y est bien présent comme il est illustré sur la figure 2.9. Sachant que l'histoire des temples est plus ancienne que celle de tout autre monument (Gros, 1996), ce point ajoute à cet édifice une valeur archéologique importante d'autant plus que ce temple, n'a fait l'objet d'aucune étude archéologique jusqu'à nos jours.

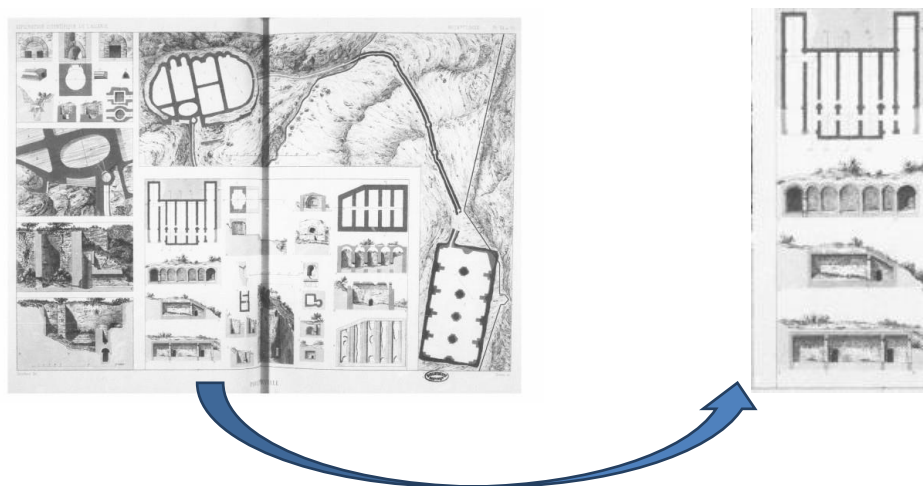


Figure 2.9. Modèle du temple romain de Venus. Source de la planche : Exploration scientifique de l'Algérie (entre 1840-1845) Par DELAMARE

Toutes ses valeurs font du théâtre un vrai patrimoine qui doit être conservé, sa conservation remplis les caractéristiques du monument architectural qui sont l'intérêt historique, artistique, scientifique, ou urbanistique pour la communauté (Giebler *et al.*, 2012).

Le théâtre reste un véritable joyau de l'architecture coloniale, considéré comme le premier édifice du genre, classé monument historique et culturel à l'échelle nationale en 2016, sous le n°34 en date du 08.06.2016, suivant arrêté du 28 avril 2016, paru dans le JORADP. Il a été inscrit en 2015 sous l'égide de la Direction de la Culture, puis transféré en 2016 à la Direction des Equipements Publics (DEP) de la wilaya de Skikda.

Actuellement, le monument est fermé. Il connaît une vaste opération de restauration du bâti et des équipements. Les travaux de restauration portent essentiellement sur la consolidation de l'édifice. Cette situation a permis d'effectuer des visites et de prendre les échantillons nécessaires à ces études.

2. ANALYSE VISUELLE ET PATHOLOGIQUE

L'analyse visuelle de l'ouvrage s'est effectuée avec l'accord de la Direction des Equipements Publics de la wilaya de Skikda, en présence du Bureau d'Etudes en charge de la maîtrise d'œuvre et de l'Entreprise chargée des travaux de restauration.





Les informations recueillies in-situ ont beaucoup aidé à établir un pré-diagnostic. Cependant et comme il sera constaté dans les paragraphes qui suivent, l'édifice est sujet à plusieurs dégradations de nature différentes. Les principales pathologies détectées sont reportées sur le tableau 2.1, selon leur nature :

- En premier lieu, les pathologies structurelles sont répertoriées. Elles englobent tous les désordres des éléments structurels de l'ouvrage (fondations, structures et murs porteurs, voûtes romaines, ...etc),
- En deuxième lieu, les pathologies naturelles, liées à la nature des matériaux (intrinsèque), ou de l'environnement.

- La troisième catégorie englobe les pathologies biologiques, qui se manifestent en présence d'agents biologiques : micro organismes, lichens, moisissures, végétations,...etc.).
- La quatrième et dernière catégorie est celle liée à des pathologies anthropiques, qui regroupent toutes les altérations résultantes des actions de l'homme.

Pour se faire, on a opté dans le pré-diagnostic pour cette approche, qui convient le mieux à ce type d'ouvrage et qui permet de réaliser une caractérisation expérimentale, qui vise essentiellement à l'identification des causes de dégradations des mortiers de l'édifice.

Tableau 2.1. Principales pathologies observées

Pathologies structurelles		
	Effritement et perte de matière au droit des menuiseries	Fissures aux droits des clefs de voûtes de l'ancien temple (fondations)
Pathologies naturelles		
	Moisissure due à l'écoulement de l'eau de pluie, par suite de la dégradation des DEP	Salpêtre due aux sels

Pathologies biologiques		
	Pourriture du bois	Poussée de la végétation
Pathologies anthropiques		
	Arrachement de la rampe d'escalier	

Comme le montre les photos du tableau 2.1 ci-dessus, l'ouvrage souffre de plusieurs pathologies de différents types :

- Concernant le côté structurel, on a constaté des fissures accompagnées de décollement des clefs de voûtes sur toute la longueur de plusieurs voûtes romaines, dont certaines menacent de tomber, ses fissures sont dues probablement aux surcharges accidentelles de la superstructure, séisme, ou des infiltrations d'eau sous le carrelage. Une perte de matière importante, des mortiers de jointement et des crépissages, notamment aux droits des murs extérieurs, fortement soumis aux effets de la nature (infiltration des eaux pluviales et de ruissellement le long des murs) dévoile l'usure profonde des murs, laissés à l'abandon depuis plusieurs décennies, impactant la solidité des murs porteurs et par là même, l'ensemble de la structure.
- Les manifestations des dégradations dues à l'humidité sont prédominantes. L'eau sous toutes ses formes est le facteur majeur de dégradation dans les bâtiments anciens. Plusieurs coulées noires ou vertes comme il est illustré dans le tableau 2.1 correspondent à l'écoulement de l'eau sur toute la hauteur des murs, provoquée par la détérioration de la couverture et des descentes des eaux pluviales, par l'usure du temps et un manque d'entretien préventif et curatif. Des taches d'humidité ont aussi été remarquées, des salpêtres bien présents sur la plupart des murs, se sont développés, par suite des travaux

d'entretien, réalisés avec des mortiers de ciment incompatibles avec les mortiers d'origine. Les mortiers de ciment forment un film imperméable, qui empêche la circulation de l'air et permet la rétention de l'humidité et du sel dans les murs en maçonnerie de pierres et de briques.

- L'humidité a également engendrée des pathologies biologiques, un certain degré d'humidité a favorisé le développement de microorganismes qui ont attaqué le bois comme on peut le remarquer sur la photo dans le tableau 2.1. La poussée racinaire est aussi très présente dans les différentes façades du théâtre, les arbustes s'installent aux endroits où les mortiers sont désintégrés.

L'étape de pré-diagnostic est fondamentalement importante pour la connaissance de l'état de la structure et des conditions physiques des matériaux et des éléments. Concernant le présent travail, cette étape est réalisée afin d'orienter l'étude en fonction des pathologies observées, et d'émettre des hypothèses quant à leurs origines.

En tenant compte, des données obtenues par l'analyse visuelle des pathologies, accompagnées d'une recherche documentaire, les hypothèses suivantes ont été formulées sur la nature des mortiers utilisés, ainsi que sur leurs éventuels mécanismes de dégradations :

- Les mortiers utilisés dans l'édification de cet ouvrage, sont des mortiers à base de chaux ou de ciment romain,
- Les principales causes de dégradations sont liées à l'humidité, la pollution atmosphérique et la proximité de la mer.

La confirmation de ses hypothèses nécessite un échantillonnage pour des analyses de caractérisations au laboratoire. Cette approche est compatible avec la philosophie de la conservation qui a pour objectif de minimiser les interventions sur les bâtiments historiques, et donc éviter de les endommager encore d'avantage.

3. ECHANTILLONNAGES ET TECHNIQUES D'ANALYSE AU LABORATOIRE

De nos jours, il n'existe aucune procédure analytique standard à suivre se rapportant à la caractérisation des mortiers historiques. Différentes techniques qui se complètent les unes les autres sont recommandées.






Dans cette étude, une approche basée sur plusieurs techniques couramment employées est utilisée. Pour la prise des échantillons, la méthodologie de prélèvement s'est opérée d'une manière traditionnelle à l'aide d'un marteau, et d'un burin, en tenant compte des recommandations existantes en la matière. Le nombre d'échantillons prélevé et leurs tailles est le minimum qui puisse garantir le succès d'une analyse et la confirmation des études futures. Les points de prélèvement des échantillons ont été limités au strict minimum nécessaire.

Les procédures d'échantillonnage ont été établies selon deux critères :

- Comparaison du développement technologique à travers les périodes historiques,
- Comparaison du niveau et de la nature des détériorations des différents mortiers.

Dans le présent cas, il a été possible de prélever cinq (5) échantillons représentatifs du mortier de référence de l'ouvrage. Le tableau 2.2 présente leurs emplacements ainsi que la période probable de leur réalisation.

Tableau 2.2. Description des échantillons

Echantillon	Description	Probable période	Emplacement	Photo
P1	Mortier de jointement en une seule couche	Romaine	Sous-sol	
P2	Enduit, en une seule couche	Coloniale	RDC côté jardin intérieur	
P3	Enduit, en deux couches	Coloniale	Parement extérieur RDC côté Nord	
P4	Mortier en une seule couche	Coloniale	Mur porteur Façade Nord intérieure	
P5	Enduit en une seule couche + une couche de peinture	Coloniale	Parement intérieur 2eme niveau	

Les essais de caractérisation physico-minéralogique sur les échantillons ont tous été réalisés au Laboratoire de l'École Supérieure Polytechnique des Edifices de Barcelone. L'analyse physique a consisté à la détermination de la masse volumique apparente, la masse volumique réelle et la porosité accessible à l'eau selon la norme Européenne EN1936 :1999, par saturation à l'eau sous vide et pesée hydrostatique. Les échantillons ont été séchés à 60° C jusqu'à stabilisation de la masse. (Voir figure 2.10).

L'analyse granulométrique a été réalisée sur trois échantillons de mortier, ils ont été écrasés en tous petits morceaux dans un récipient (mortier d'Agathe), sans pour autant altérer la morphologie des grains, le matériau obtenu fut tamisé à travers des tamis normalisés 4,2, 1, 0.5, 0.25., 0.125, et 0,063 suivant la norme EN933-1. Les fractions retenues de chaque tamis ont été étudiées séparément sous une loupe après leurs avoir ajouté du HCL dilué (analyse chimique par voie humide). La figure.2.11 présente les tamisats des trois échantillons de mortier P2, P4, et P5.



Figure 2.10. Dispositif de l'essai de la porosité accessible à l'eau



Figure 2.11. Résultat de l'analyse granulométrique des trois échantillons

Il a été procédé à la mise en évidence de la composition minéralogique de tous les échantillons par la diffraction aux rayons X à l'aide d'un appareil PANalytical X'Pert PRO MPD Diffractomètre avec une Radiation $K\alpha$ de Cu ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). La tension et le courant sont de 45 k et 40 mA respectivement. Les préparations des poudres ont été confectionnées après broyage à 63 μ m.

L'analyse thermogravimétrique est une analyse complémentaire que nous avons utilisée pour déterminer le degré d'hydraulicité des mortiers. L'équipement utilisé est un appareil qui a été conçu au laboratoire. Cet appareil se compose d'une balance de précision de 0,001 g et de deux capteurs de température (intérieur et extérieur). La rampe de température est de quatre (4) heures à partir de la température ambiante et augmente progressivement pour atteindre 1000°C. Les mesures sont prises à intervalle régulier toutes les 10 secondes.

Pour finir, les observations au Microscope Electronique à Balayage ont été réalisées sur deux échantillons : le mortier de l'époque romaine (P1), et l'enduit de l'époque coloniale (P3) qui fut séparé en deux parties (P3a) et (P3b). Le microscope électronique à balayage utilisé est un appareil du type JEOL JSM-7001F, qui dispose d'un détecteur pour la détermination de la

composition élémentaire (EDX). Les échantillons ont été recouverts avec du palladium-platine.

4. RÉSULTATS DES ANALYSES AU LABORATOIRE

4.1. Densités et porosité accessible à l'eau

Les résultats des essais sur les cinq échantillons sont reportés dans le tableau 2.3. Les valeurs de la densité apparente se situent entre [1.6 et 2.4] g/cm³, ses valeurs sont souvent celles rencontrées dans la littérature (Callbaut *et al.*, 2001), où il a été présenté que les densités apparentes se situant dans l'intervalle [1.5 et 1.8] g/cm³ sont ceux des mortiers à base de chaux, et les valeurs entre [1.7 et 2.1] g/cm³ sont attribuées aux mortiers à base de chaux hydraulique.

La densité apparente de l'enduit du parement extérieur du rez-de-chaussée côté Nord (P3) est la plus grande (2.31g/cm³) et celle du mortier du mur porteur (P4) est la plus petite (1.60 g/cm³). Quant à la densité réelle, la majorité des mortiers présente des valeurs autour de 2,6 et 2.7 g/cm³. Ses valeurs sont proches des densités de la calcite (2.71 g/cm³) et du quartz (2.65 g/cm³), qui sont les deux minéraux constitutifs les plus pondérant (Merckx, 2013 ; Aalil, 2017). L'échantillon (P2) est l'exception notable qui présente une valeur de 3.31 g/cm³.

Concernant la porosité ouverte, les valeurs sont assez élevées (entre 30% et 40%), sauf pour le mortier (P3), qui présente un plus faible taux de l'ordre de 12%.

Tableau 2.3. Propriétés physiques des mortiers analysés

Echantillons	Densité apparente (g/cm ³)	Densité réelle (g/cm ³)	Porosité accessible à l'eau (%)
P1	1,79	2,61	31,14
P2	2,00	3,31	39,48
P3	2,31	2,65	12,70
P4	1,60	2,72	40,86
P5	1,85	2,77	33,42

4.2. Granulométrie et forme des grains

La granulométrie a été déterminée pour les trois échantillons suivants :

- Enduit intérieur du côté sud du jardin (P2).
- Mortier du mur porteur de la façade nord intérieur (P4).
- Et l'enduit intérieur du deuxième niveau (P5).

La figure 2.12 Présente la courbe granulométrique des trois échantillons, sur laquelle on constate clairement que la distribution des grains pour le mortier (P2) et (P4) est assez similaire, alors que celle du mortier (P5) montre une différence. Les résultats de l'analyse historique du tamis de mortier servent de guide pour la sélection des agrégats pour le mortier

de restauration. Comme les courbes granulométriques des mortiers historiques ne sont qu'indicatives que pour la courbe des granulats d'origine, sachant qu'après plusieurs siècles le matériau s'est détérioré et s'est altéré, la courbe des granulats du mortier de restauration doit être le plus proche possible de celui du mortier historique présentant le moins d'altération, tout en présentant une distribution normale (Apostolopoulou *et al.*, 2017).

Chaque fraction de chaque mortier a été diluée dans du HCL afin de dissoudre le liant, et l'agrégat est sensé rester intacte.

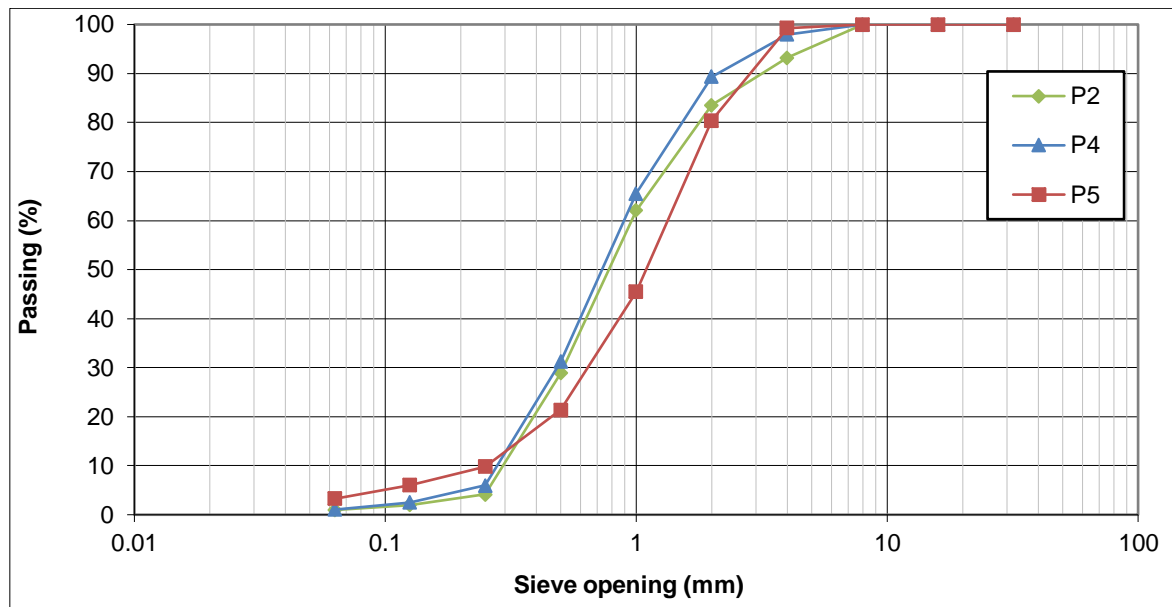


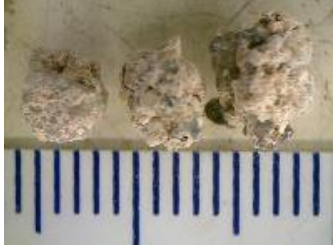
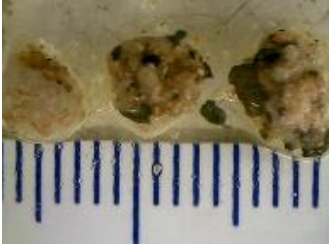

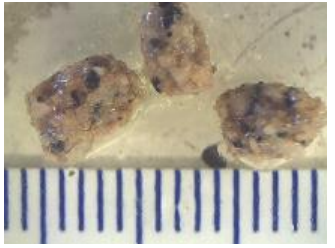


Figure 2.12. Courbe granulométrique des mortiers (P2) (P4) et (P5)

Les observations obtenues sous la loupe permettent de déterminer la forme des grains mais aussi la nature du liant. Le tableau 2.2, présente les résultats de l'analyse chimique (dissolution dans l'acide), pour laquelle on a pris uniquement une fraction identique pour chaque échantillon de mortier, le reste est présenté dans l'Annexe C.

La réaction avec l'HCL était immédiate, le liant s'est dissous à cause de son origine calcaire. Les formes des grains du mortier (P2) et (P4) sont sphériques, de forme ovale. Cette similarité peut expliquer la similitude de leur distribution granulométrique et peut également indiquer que les grains proviennent d'un même site. Le mortier (P5) se compose de grains de formes plus au moins irrégulières et angulaires, ce qui marque une différence par rapport aux deux autres précédents.

Cependant, l'analyse par voie humide à elle seule, ne garantit pas un résultat complet, le doute que le liant peut être partiellement ou complètement dissout par l'acide est présent. (Casadio *et al.*, 2005; Middendorf *et al.*, 2005 ;Silva loureiro *et al.*, 2020). C'est pour cela que des essais complémentaires combinés sont associés à cette analyse pour aboutir à des informations plus fiables, permettant de corroborer cette analyse.

Tableau 2.4. Dissolution des grains de mortier dans le HCL

Echantillons	Avant dissolution HCL	Après dissolution HCL	Forme	Nature
P2			Ronde	Calcaire
P4			Ovale	Calcaire
P5			Assez irrégulière	Calcaire

4.3. Analyse DRX

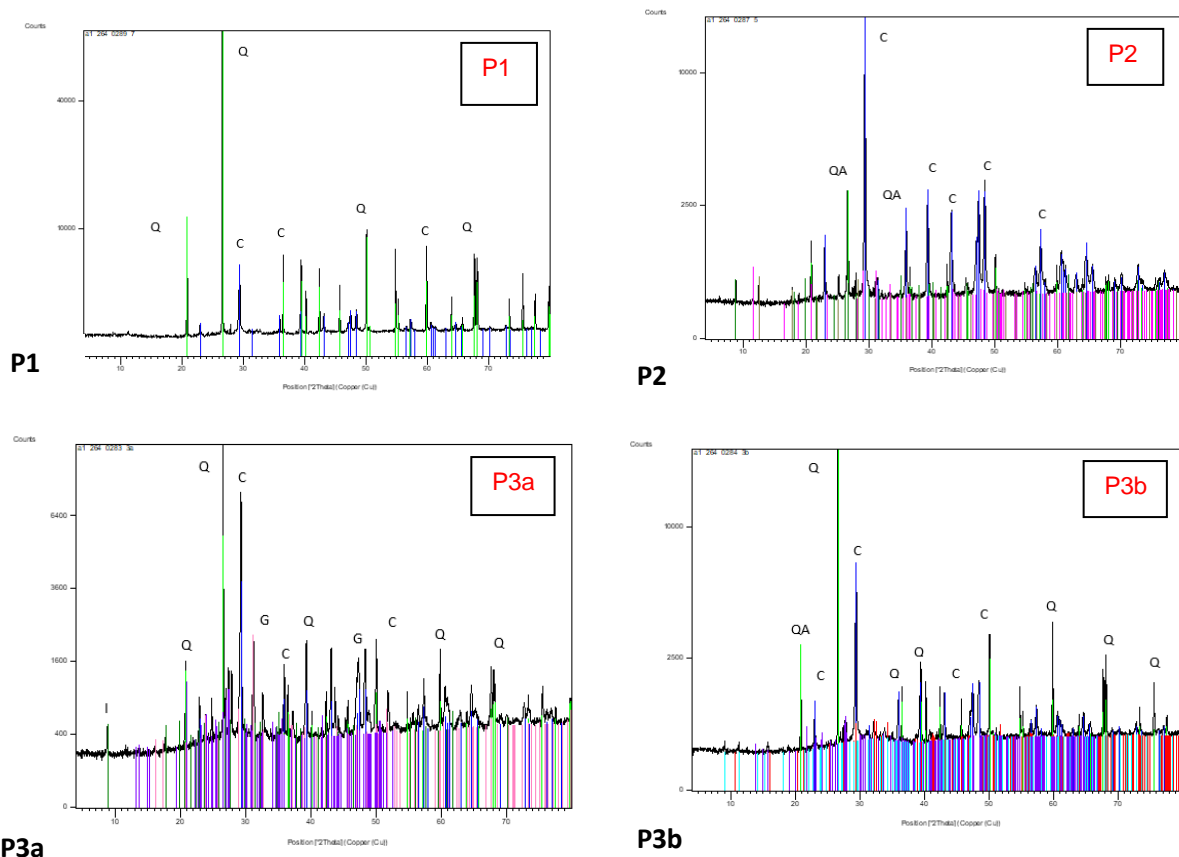
D'après les résultats de l'analyse DRX, tous les mortiers sont composés principalement en phases cristallisées, par de la calcite et du quartz. La différence des autres composants dans les mortiers confirme l'écart entre périodes historiques, ainsi que la différence des matériaux utilisés pour leur confection. Le quartz étant le principal constituant du sable dans tous les mortiers. Les quatre mortiers de la période coloniale présentent une diversité de minéraux, contrairement au mortier de l'époque romaine.

En effet P1 se constitue uniquement de quartz et de calcite, de ce résultat il est clair que P1 est un mortier de chaux entièrement carbonaté. Le mortier P2 contient de la Géhlinite, composant principal des mortiers à base de chaux hydraulique, pouvant être aussi un indicateur important de distinction entre le ciment et la chaux hydraulique naturelle (Borges *et al.*, 2010). L'illite et le gypse sont présents dans presque tous les autres mortiers à l'exception du mortier P1, alors que l'halite est présente uniquement dans le mortier (P4). L'halite et le gypse sont deux sels exogènes qu'on rencontre souvent dans les monuments historiques (Charola *et al.* 2006; Doehne, 2002 ; Aalil, 2017), et qui peuvent aussi être détectés dans des environnements de nature urbaine, rurale et marine (Al-Omari *et al.*, 2015; Janvier-Badosa *et al.*, 2013; Zaouia *et al.*, 2005, Aalil, 2017). Quant à l'Halite, son origine est

surtout due à l'eau de mer, aérosols marins (Cardell *et al.*, 2003 ; Aalil, 2017) ou encore aux sels de déverglaçage (Winkler,1987 ; Aalil, 2017).

Le gypse peut se former du Ca (OH)₂ des mortier et des sulfates présents dans l'air (Borges *et al.*, 2010). Il est principalement associé à la pollution atmosphérique (Janvier-Badosa *et al.*, 2013; Beck & Al-Mukhtar 2010), mais peut aussi être associé à la colonisation biologique (Sand & Bock 1991) ou des matériaux incompatibles comme des mortiers et des produits de nettoyage et de conservation (Přikryl & Svobodova 2004; Silva Hermo *et al.*, 2010 ; Kloppmann *et al.*, 2011 ; Aalil, 2017).

La présence de ses composants renseigne sur les principales causes de dégradations des mortiers du théâtre. Sachant que ses sels peuvent contaminer même la pierre (Aalil, 2017), sa source peut être détectée. En effet, en analysant la position ainsi que l'environnement immédiat du théâtre, on trouve qu'il se situe dans une zone urbaine, à proximité de la mer (500 mètres environs), et donne directement sur la route Didouche Mourad principale artère de la ville, avec une capacité de trafic de l'ordre de 500 voitures/ heure. Ces dix dernières années cette capacité a enregistré un énorme bond pouvant arriver jusqu'à de 1200 voitures/heure. Ces conditions environnementales favorisent et accélèrent fondamentalement la dégradation des mortiers. Le fait que le mortier (P1), provenant des fondations du sous-sol (temple Romain), non soumis à une exposition directe et permanente avec l'environnement, ne contient aucun des sels détectés dans les autres mortiers, renforce nos déductions.



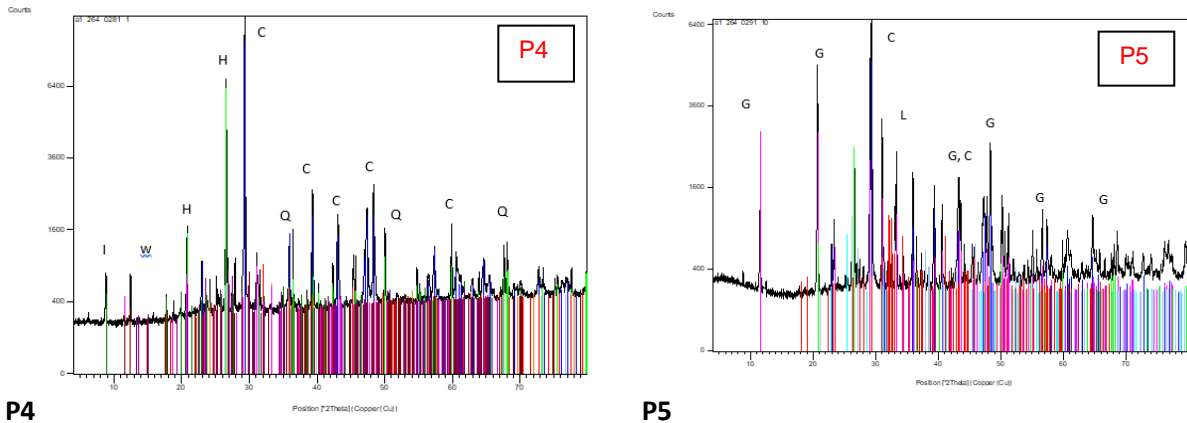
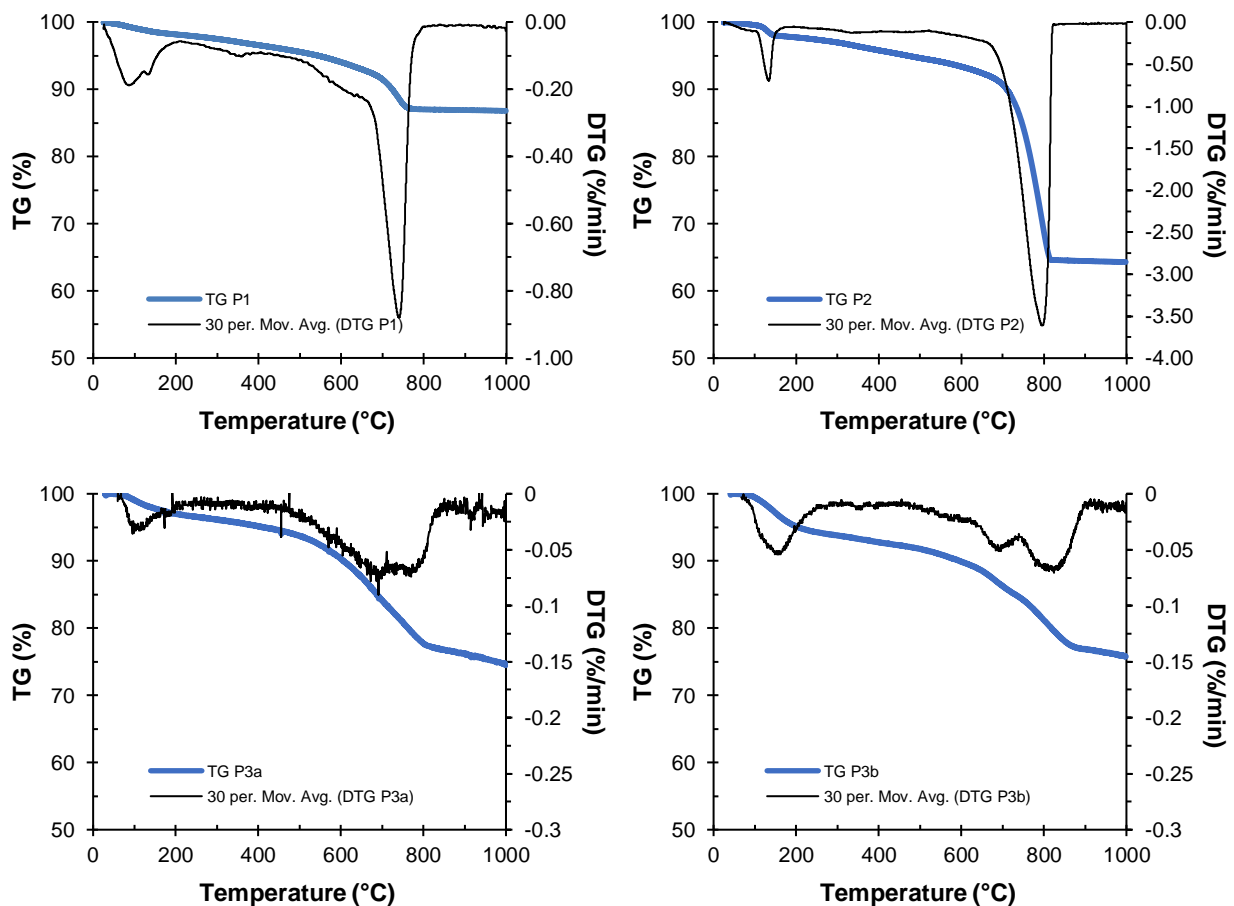


Figure 2.13. Diffractogrammes RX des échantillons des mortiers du théâtre : C : Calcite, Q : Quartz, G : Gypse, Gh : Gehlénite, I : Illite, et H : Halite

4.4. Analyse thermogravimétrique

Les résultats obtenus présentés par l'analyse thermogravimétrique (figure 2.14) sont venus confirmés ceux de la Diffractions aux rayons X (DRX).



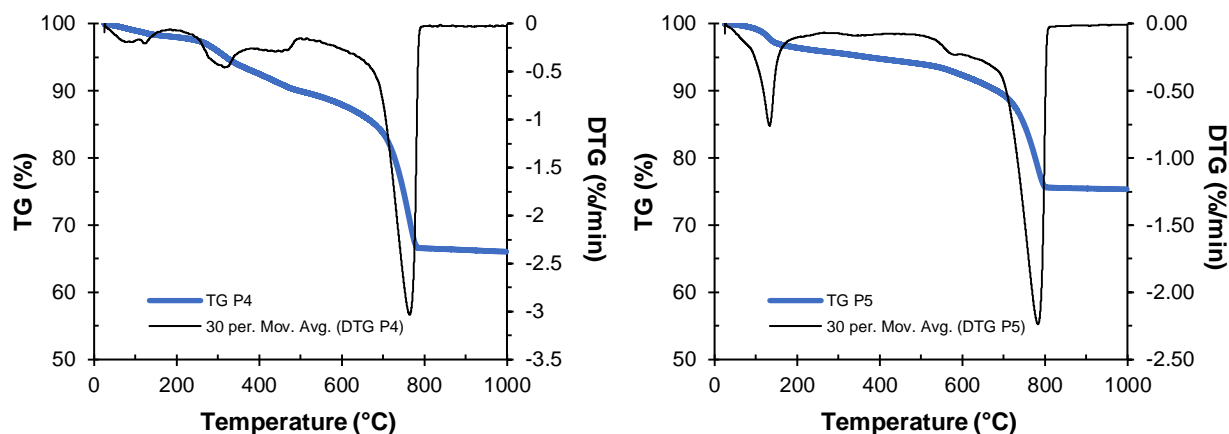


Figure 2.14. Analyse thermogravimétrique des différents mortiers du théâtre

Concernant les mortiers de l'époque coloniale, ils contiennent plus de composant que le mortier de l'époque romaine. En effet la courbe thermogravimétrique du mortier (P1) montre une seule perte de poids importante dans la plage $> 600^{\circ}\text{C}$ qui correspond à la décarbonation de la calcite CaCO_3 (Veiga *et al.*, 2001) alors que dans les mortiers (P2), (P3a), (P3b), (P4), et (P5), on remarque plusieurs pertes de masse dans des plages assez similaires. La plage 105°C - 200°C correspond à la déshydratation des C-S-H (Bakolas *et al.*, 2006 ; Veiga *et al.*, 2001). Le gypse se déshydrate entre 110°C - 200°C (Moropoulou *et al.*, 1995; Bakolas *et al.* 1998). Sa déshydratation s'effectue en deux étapes. Initialement, le gypse subit une déshydratation partielle vers 110°C - 130°C en perdant 1,5 molécules d'eau et devient par conséquent sous forme hémihydrate. Ensuite, il perd la moitié restante de la molécule d'eau à 170 - 190°C et forme par conséquent le sulfate de calcium déshydraté (Papageorgiou *et al.*, 2005). Les pertes de masse dans la plage de température 120°C - 150°C pourraient être attribuées également à l'évaporation de l'eau physiquement liée (Marques *et al.*, 2006; Podoba *et al.*, 2014), ou encore à l'eau intercouche des silicates de calcium hydratés, qui se décompose entre 100 et 125°C (Feldman & Ramachandran 1971, Aalil, 2017). La plage 180°C - 200°C correspond à la déshydratation de la gehlenite qui a été détectée auparavant par la DRX, et quant à la phase 575°C , elle correspond à la transformation du quartz non réactif (Bakolas *et al.*, 2006 ; Veiga *et al.*, 2001).

L'analyse thermogravimétrique est une analyse complémentaire qu'on a utilisée aussi pour étudier l'hydraulicité des mortiers. Elle permet la détermination du degré et du taux de durcissement des liants par carbonatation et formation de composés hydrauliques. La figure 2.15 représente le rapport du CO_2 à l'eau structurellement liée (eau chimiquement liée), qui exprime inversement le caractère hydraulique des mortiers, par rapport au CO_2 (% de perte de poids).

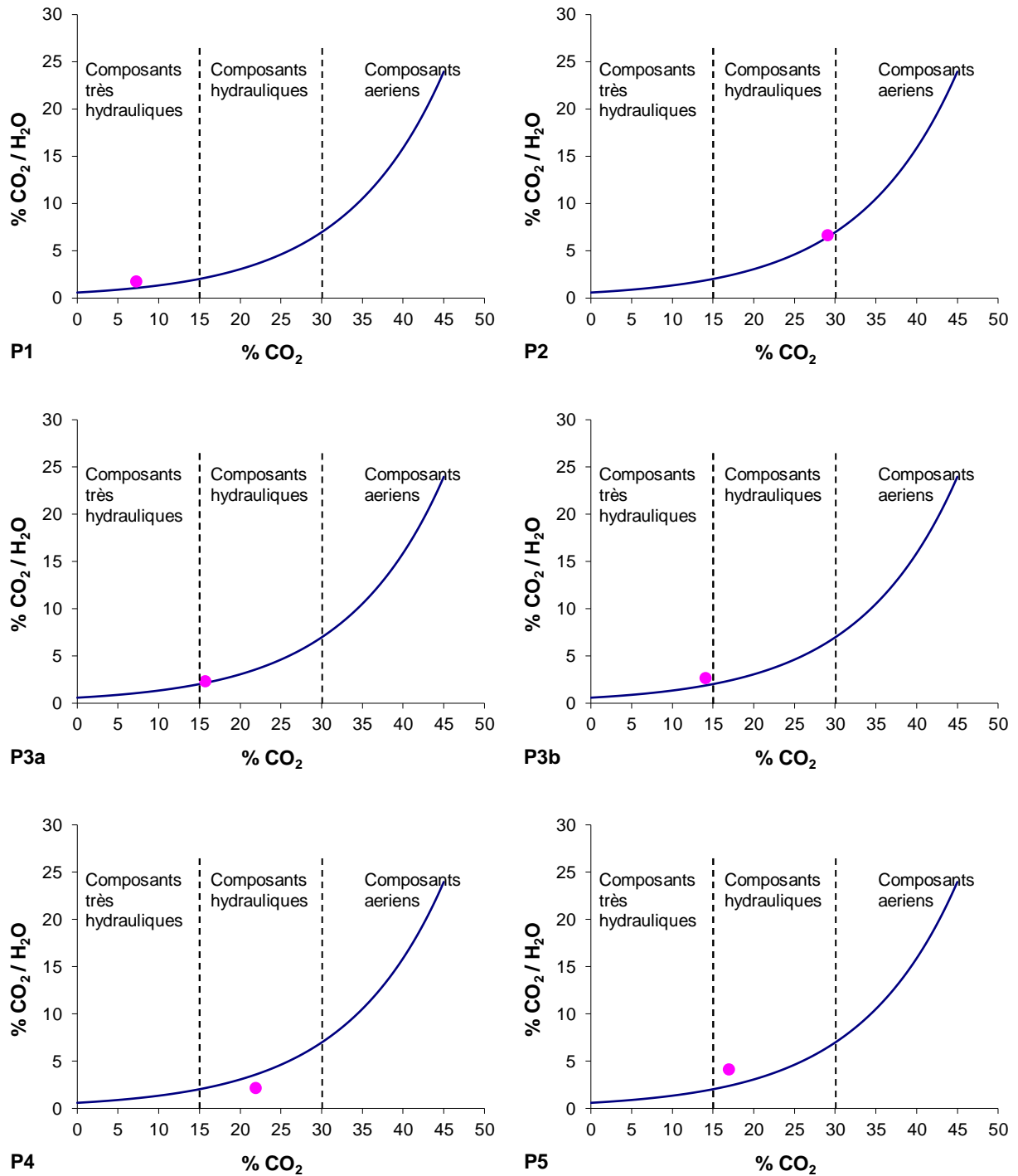


Figure 2.15. Classification des mortiers selon leur hydraulicité

La relation exponentielle du rapport du CO₂ à l'eau structurellement liée (CO₂/H₂O) indique le caractère non-hydraulique, semi-hydraulique, et hydraulique des composants lors de la prise, du durcissement et du vieillissement des mortiers. Ainsi, la classification des mortiers en des niveaux hydrauliques bien distincts, doit être effectuée par rapport aux liants et aux additions pouzzolaniques naturelles ou artificielles, du moment que les granulats sont inertes et ne présentent pas de composants hydrauliques, l'analyse thermique de la fraction totale permet d'avoir un aperçu des différentes matrices de mortier, contrairement aux granulats

actifs qui nécessitent une séparation (Moropoulou *et al.*, 1995 ; Bakolas *et al.*, 1998 ; Moropoulou *et al.*, 2005).

La classification s'est faite pour les cinq (5) échantillons de mortier prélevés, le mortier P3 a été séparé en deux parties bien distinctes (P3a et P3b). Les mortiers figurent dans les trois zones présentées dans les graphes : les mortiers P1, P3a et P3b figurent dans la partie des mortiers fortement hydrauliques. Le mortier P2 contient des composants aériens, et enfin les mortiers P4 et P5 ont des composants hydrauliques.

En comparant les résultats des caractéristiques physico-chimiques obtenus par l'Analyse thermogravimétrique des mortiers à ceux présentés dans la littérature (voir chapitre 1, § 4.5 tableau 1.4) on peut considérer que les mortiers du théâtre sont des mortiers de chaux avec portlandite non altérée (Moropoulou *et al.*, 2005). Ses mortiers sont définis comme étant prélevés sur des vieilles structures qui peuvent datés d'une centaine d'années, et se compose principalement d'hydroxyde de calcium, les parties externes ayant été converties en carbonate en cas d'endommagement. Ces mortiers prennent avec une extrême lenteur lorsqu'ils ne sont pas exposés directement à l'air (mur de grande ou de moyenne épaisseur). De plus, dans les zones à fort pourcentage d'humidité relative, le processus de carbonatation est inhibé et des cristaux de portlandite non altérés peuvent apparaître (Moropoulou *et al.*, 2000).

5. CONCLUSION

Le théâtre de la ville de Skikda connaît des dégradations de plusieurs natures. La visite visuelle du bâtiment a permis d'identifier les principales pathologies, mais aussi de déduire, les principaux facteurs de dégradations, qui à première vue semblent être dues à l'humidité, la pollution atmosphérique et au manque fondamental d'entretien.

Les moisissures, végétations, salpêtres, pourriture du bois, salissures, et rouille profonde des solives métalliques, ont été détectées à de différents endroits de l'édifice.

La détermination des différentes pathologies est une étape importante mais insuffisante pour établir un diagnostic fiable ne souffrant d'aucune incertitude. L'analyse au laboratoire était donc indispensable pour la suite de l'étude, car elle permet de connaître les matériaux d'origine, qui avec l'appui d'un pré-diagnostic visuel préalable, permet de corroborer les résultats.

Les résultats obtenus par les essais physiques, ainsi que la DRX, ATG, et MEB ont révélé la nature des matériaux entrant dans la composition des différents mortiers utilisés dans le cadre de la réalisation de l'ouvrage. Le mortier prélevé du sous-sol (temple romain) contient uniquement de la chaux et du sable, alors que le reste des mortiers, contiennent de l'halite et du gypse qu'on peut observer principalement dans les milieux pollués, urbains, humides et éventuellement près de la mer. Ces résultats confirment les hypothèses émises, et aident à identifier d'une manière plus précise, les facteurs de dégradation.

Selon les résultats obtenus, on peut déduire que les mortiers de restauration à base de ciment sont à éviter dans le cadre des travaux de restauration, car ils favorisent insidieusement, la formation des sels, sachant que la littérature, proscrit totalement l'utilisation du ciment dans

les anciens édifices, et considère comme inacceptable son emploi pour la restauration des édifices du style Baroque.

Un environnement agressif, notamment à proximité de la mer, nécessite des mortiers avec un certain degré d'hydraulicité. Le choix de mortier à base de chaux et d'addition à caractère pouzzolanique, semble être une bonne solution pour la restauration de notre ouvrage. La suite de ce travail va nous montrer si notre choix d'addition est bien justifié dans cette étude.

CHAPITRE III

CARACTÉRISATION DES

MATÉRIAUX ET PROCÉDURES

EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE III

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

Ce chapitre porte sur la caractérisation des matériaux utilisés pour l'élaboration des mortiers de chaux pour la restauration du patrimoine bâti. Les procédures expérimentales suivies pour la caractérisation physique et mécanique des mortiers obtenus sont également présentées.

Sommaire

1. MATÉRIAUX UTILISÉS	66
1.1. La chaux	66
1.2. La poudre de verre	68
1.3. La poudre de brique	69
1.4. Le métakaolin	71
1.5. Le sable.....	73
1.6. Eau de gâchage	74
2. FORMULATION DES MORTIERS	75
3. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	78
3.1. Essais sur mortier frais	78
3.1.1. Essai d'étalement à la table secousse	78
3.1.2. Délais de prises des mortiers de chaux	78
3.2. Essais sur mortier durci.....	79
3.2.1. Essai de traction par flexion.....	79
3.2.2. Essai de compression.....	79
3.2.3. Vitesse ultrasonore et module d'élasticité E	80
3.2.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	81
3.2.5. Porosité accessible à l'eau.....	82
3.2.6. Suivie de la carbonatation.....	83
4. CONCLUSION	84

Chapitre III Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales

PRÉAMBULE

Ce troisième chapitre est consacré à la proposition d'un mortier pour la restauration du théâtre. Pour se faire, on commence dans un premier temps par présenter la caractérisation des différentes propriétés physico-chimiques et minéralogiques des matériaux qui seront utilisées dans cette étude. On s'intéresse ensuite à celles des additions minérales pour mieux appréhender leurs propriétés pouzzolaniques et leurs influences sur le comportement des mortiers d'étude, avant de passer à la formulation et la mise en œuvre des éprouvettes. Pour terminer, les différentes procédures expérimentales adoptées pour cette étude seront présentées.

1. MATÉRIAUX UTILISÉS

1.1 La chaux

La chaux éteinte employée dans cette étude est une chaux aérienne qui provient de l'usine Cevital Minerals d'El Khroub – Constantine (voir fiche technique Annexe D), la seule entreprise qui produit de la chaux éteinte en Algérie. Elle est commercialisée sous forme de poudre fine blanche inodore (voir figure 3.1). Principalement produite pour l'industrie sucrière du groupe CEVITAL, elle répond à la norme NF EN 459-1 (NF EN 459, 2012). Sa densité apparente a été déterminée par le remplissage d'un récipient à volume connu, quant à la densité absolue, elle a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre, selon la norme (NF EN 1936, 2007). La surface spécifique a été mesurée à l'aide de l'appareil de Blaine selon la norme (NF EN 196-6, 2012). Ces méthodes de caractérisation ont été appliquées sur l'ensemble des additions. La composition chimique et les caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Composition chimique et caractéristiques physiques de la chaux utilisée.

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Unité	Valeurs
CaO	73,55	Densité absolue	g/cm ³	2,46
Al ₂ O ₃	-			
Fe ₂ O ₃	-			
SiO ₂	-			
MgO	0,30			
Na ₂ O	-	S.S.B	cm ² /g	6885
K ₂ O	-			
Cl ⁻	0,00			
SO ₃	0,00			
P-A-F (850°C)	-			

D'après les résultats de la détermination de la composition chimique par l'analyse de fluorescence aux rayons X, la chaux étudiée a un indice d'hydraulicité $HI = 0,005$, confirmant ainsi sa nature aérienne (Ecole d'Avignon 2003), avec un pourcentage en impuretés (Silice et Alimune) < 5 (Carrington & Swallow 1996). La figure 3.2 présente la composition de la chaux observée par Microscope Electronique à Balayage. La taille et la forme des particules sont différentes. Les particules hexagonales correspondant à la Portlandite $Ca(OH)_2$ (Papayianni & Stefanidou 2006) sont de taille plus grande, alors que les petites particules sont beaucoup plus nombreuses, avec une forme moins bien définie. Cela peut s'expliquer par une probable calcination incomplète. La composition chimique confirme cette hypothèse par rapport au taux du CaO qui est de 73.55 %.



Figure 3.1. Chaux aérienne éteinte.

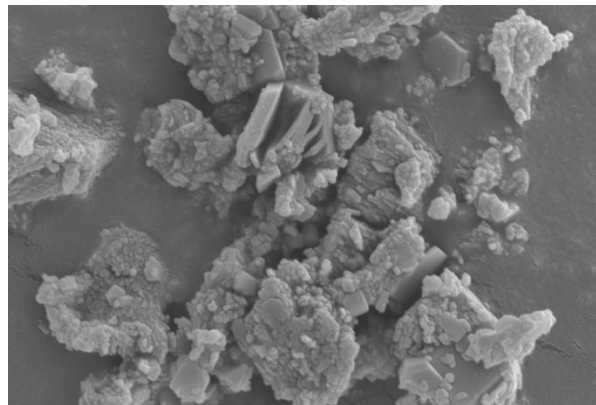


Figure 3.2. Image MEB de la chaux (agrandissement x2 000).

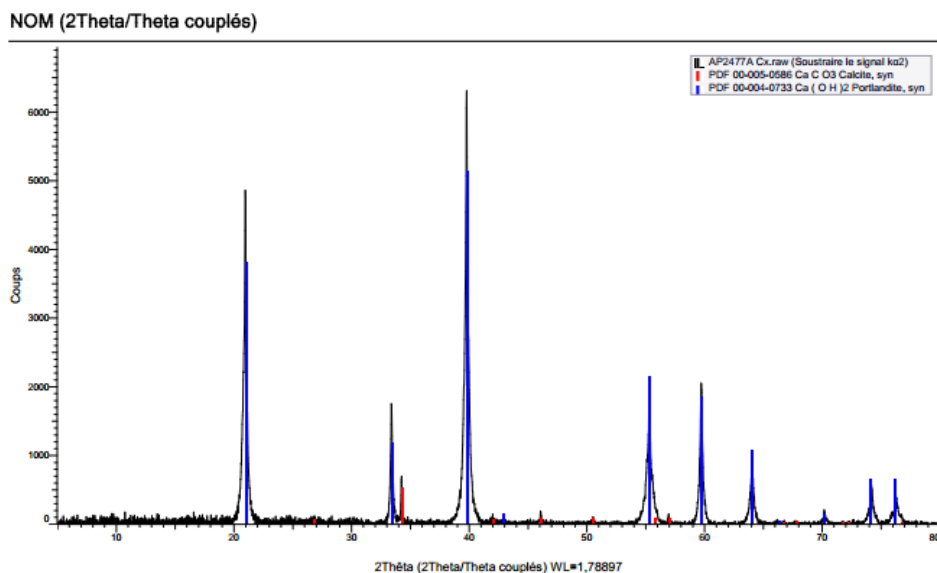


Figure 3.3. Diffractogramme RX de la chaux.

La figure 3.3 présente le diffractogramme de la chaux obtenue par la diffraction des rayons X. On remarque que la chaux est composée principalement de Portlandite $Ca(OH)_2$, ainsi que la présence de la calcite $CaCO_3$ engendrée par une carbonatation de la chaux avec le dioxyde de carbone ambiant (Aalil, 2017).

1.2 La poudre de verre

La poudre de verre utilisée est issue de la récupération des bouteilles en verre dispersées dans la nature (montagne, bord de mer etc.). Elle est obtenue en sélectionnant uniquement les bouteilles de même couleur verte. Celles-ci sont nettoyées afin d'éliminer les différentes impuretés (étiquettes en papier et les traces de sucre qui peuvent provoquer un retard de prise de la pâte), concassées et finement broyées (Figure 3.4). L'utilisation de la poudre de verre dans les mortiers à base de chaux aérienne présente une alternative intéressante sur le côté technique, grâce à ses avantages pouzzolaniques (Khmiri *et al*, 2013 ; Matos & Sousa-Coutinho 2012). Cette valorisation est aussi bénéfique sur le plan environnemental. La composition chimique ainsi que les propriétés physiques de la poudre de verre de cette étude sont présentées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Composition chimique et caractéristiques physiques de la poudre de verre.

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Unité	Valeurs
SiO ₂	66,62	Densité absolue	g/cm ³	2.55
Al ₂ O ₃	2,12			
Fe ₂ O ₃	1,29			
CaO	10,86			
MgO	0,84			
Na ₂ O	14,45			
K ₂ O	0,44	S.S.B	cm ² /g	5661
Cl ⁻	0,00			
SO ₃	0,00			
P-A-F	-			
(850°C)	-			



Figure 3.4. Poudre de verre.

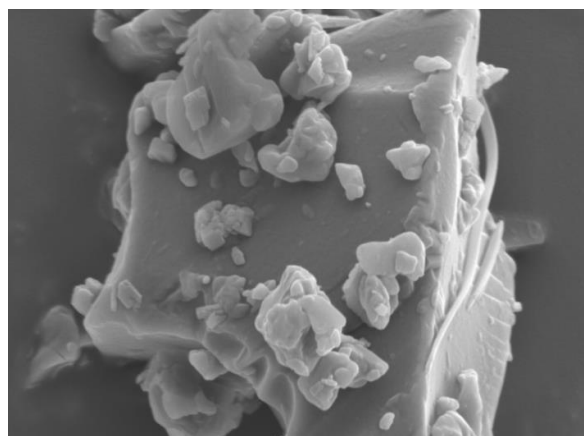


Figure 3.5. Image MEB de la poudre de verre (agrandissement x2 000).

La composition chimique de la poudre de verre montre un taux de silice assez faible. Les observations au MEB présentées dans la figure 3.5 montrent des flocons de particules de formes angulaires et de différentes tailles, cette forme est indiquée dans la littérature (Shi *et al.*, 2004), quant à l'analyse aux rayons X de la poudre de verre présentée sur la figure 3.6, elle révèle un matériau essentiellement vitreux.

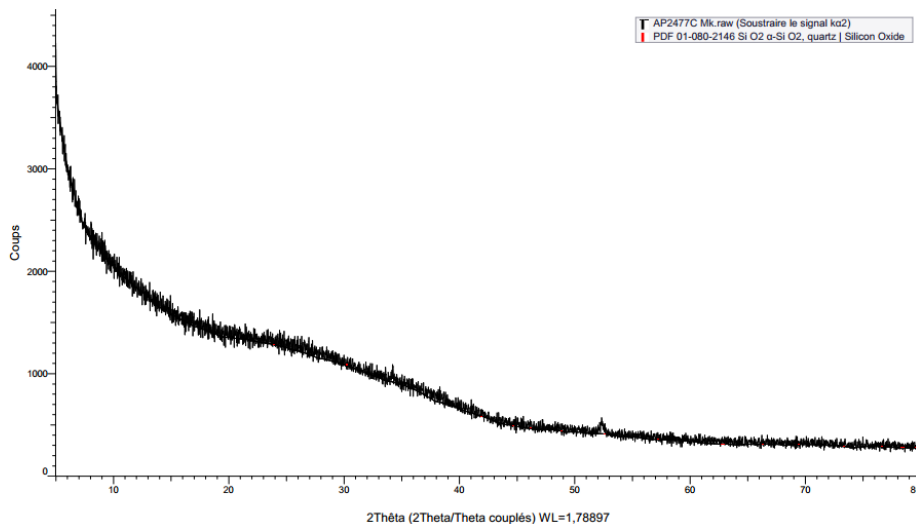


Figure 3.6. Diffractogramme RX de la poudre de verre.

1.3 La poudre de brique

La poudre de brique est obtenue des débris de briques cassées, récupéré du chantier de restauration du théâtre de la ville de Skikda comme il est indiqué sur la figure 3.7. La forme des briques indique qu'elles datent de l'époque coloniale française. Les briques ont été concassées et broyées dans un broyeur à boulets (figure 3.8). Les caractéristiques chimiques et physiques de la poudre de brique sont présentées dans le tableau 3.3.



Figure 3.7. Débris de briques du théâtre régional de Skikda.

D'après l'analyse chimique, la poudre de brique est considérée comme une bonne pouzzolane avec une teneur en $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 70\%$ (Ramezianpour, 2014).

Tableau 3.3. Composition chimique et caractéristiques physiques de la poudre de brique.

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Unité	Valeurs
SiO ₂	55,07	Densité absolue	g/cm ³	2.46
Al ₂ O ₃	25,63			
Fe ₂ O ₃	7,96			
CaO	0,99			
MgO	1,29			
Na ₂ O	1,11			
K ₂ O	4,12	S.S.B	cm ² /g	11418
Cl ⁻	-			
SO ₃	-			
P-A-F(850°C)	-			



Figure 3.8. Poudre de brique.

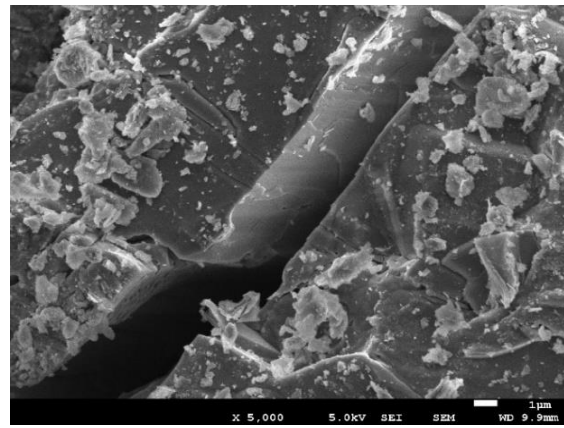


Figure 3.9. Image MEB de la poudre de brique (agrandissement x5000).

La figure 3.9 présente une photo au MEB avec un agrandissement x 5 000, tandis que la figure 3.10 révèle la composition minéralogique de la poudre de brique. Celle-ci est constituée principalement de Quartz, Hematite, Anorthite, et Potassium Aluminum Silicate.

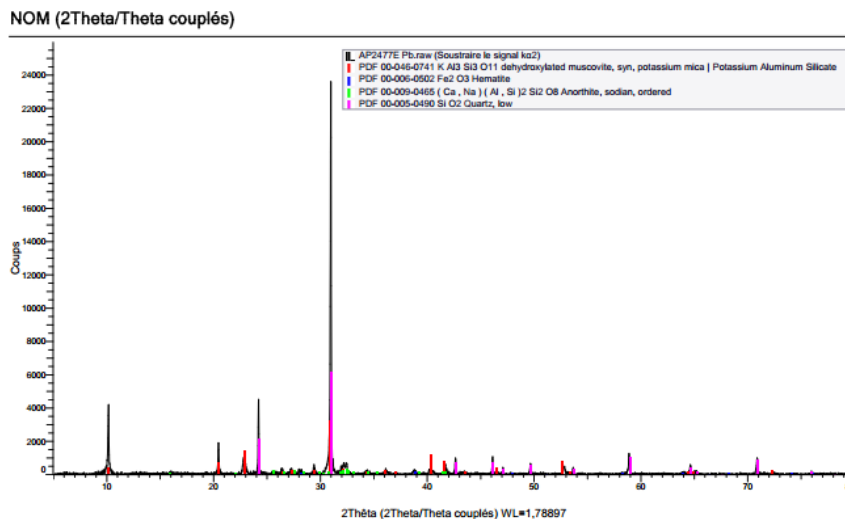


Figure 3.10. Diffractogramme RX de la poudre de brique.

1.4 Le métakaolin

Le métakaolin utilisé dans cette étude est obtenu de la calcination du Kaolin du Djebel Debbagh (Guelma). Le gisement de cette région est composé de trois catégories ou nuances de kaolin selon la concentration des impuretés d'oxydes métalliques. Les trois argiles DD1, DD2 et DD3 diffèrent par leurs couleurs, blanche grisâtes pour les argiles DD1 et DD2, grise pour DD3. Le kaolin DD est un mélange de deux phases: la kaolinite ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) et l'halloysite ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$).

Le kaolin utilisé dans cette étude est le DD3. Il se présente en blocs friables composés de kaolin blanc (DD1) et de kaolin grisâtre (Figure 3.11). Utilisé sous sa forme naturelle, le kaolin ne présente aucun potentiel pouzzolanique. C'est donc le métakaolin, matériau obtenu après calcination du kaolin qui se caractérise par une réaction pouzzolanique, améliorant les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux cimentaires.



Figure 3.11. Kaolin de Djebel Debbagh 3 (DD3)

Afin de tirer profit de la réaction pouzzolanique du métakaolin, le kaolin a été séché à l'étuve avant d'être broyé, puis calciné à une température de 750°C pendant 4 heures dans un four à haute température. Le choix de cette température de calcination a été tiré des travaux de Rabehi (Rabehi, 2013). L'auteur a utilisé le même type de kaolin DD3 et a étudié l'effet de la température de calcination sur l'évolution de la réactivité pouzzolanique. Pour différentes températures de calcination de 650, 700, 750 et 800°C, l'auteur a relevé qu'une température de 750°C offre une meilleure réactivité pouzzolanique.

Après calcination, le métakaolin ainsi obtenu est tamisé sur un tamis de 80 µm pour récupérer uniquement le tamisât (figure 3.12). La composition chimique ainsi que les propriétés physiques du métakaolin de cette étude, la photogrammétrie au MEB, et le diffractogramme aux rayons X, sont présentés dans le tableau 3.4, figures 3.13 et 3.14 respectivement.

Tableau 3.4. Composition chimique et caractéristiques physiques du métakaolin.

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Unité	Valeurs
Al ₂ O ₃	39,52	Densité absolue	g/cm ³	2,57
SiO ₂	42,31			
Fe ₂ O ₃	-			
CaO	0,68			
MnO	1,23			
Na ₂ O	-			
K ₂ O	0,17	S.S.B	cm ² /g	10517
Cl ⁻	0,00			
SO ₃	0,00			
P-A-F (850°C)	26.89			



Figure 3.12. Métakaolin.

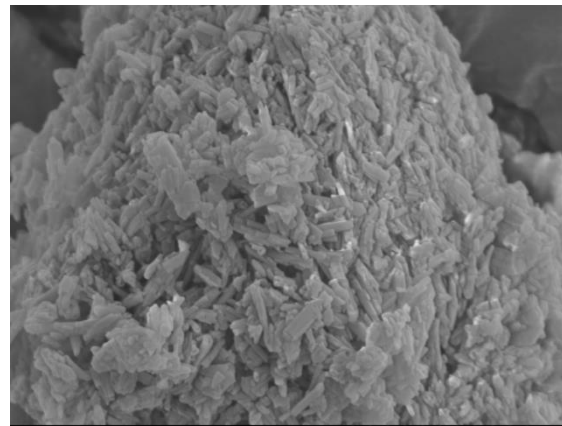


Figure 3.13. Image MEB du métakaolin (agrandissement x2000).

D'après l'analyse chimique, le métakaolin se compose de 39,52 % d'alumine et de 42,31 % de silice, il est considéré comme une bonne pouzzolane. L'imagerie au MEB montre des particules en formes de plaquettes hexagonales, quant au diffractogramme aux rayons X, il révèle que le métakaolin est composé de Kolinite, Quartz, et Calcite.

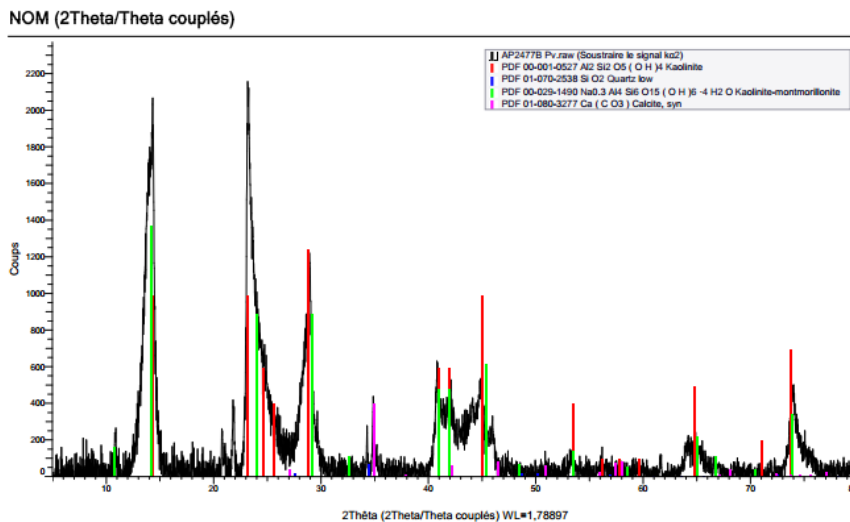


Figure 3.14. Diffractogramme aux rayons X du métakaolin.

La figure 3.15 présente la distribution granulométrique de la chaux et des trois additions (poudre de brique, poudre de verre et du metakaolin), par voie humide.

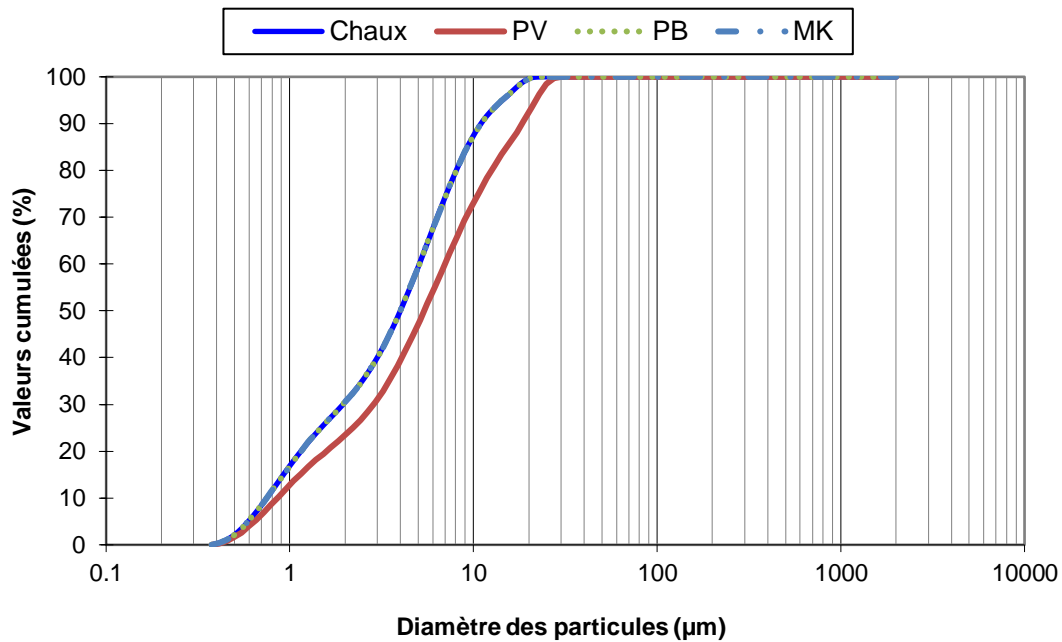


Figure 3.15. Courbe granulométrique de la chaux et des trois additions.

1.5 Le sable

Le sable utilisé (0/2) présenté à la figure 3.16, est un sable roulé qui provient des dunes de la Wilaya de Tébessa. Il s'agit d'un sable siliceux caractérisé par un module de finesse de 2.20.



Figure 3.16. Sable de dunes (0/2).

Les caractéristiques physiques et la composition chimique du sable utilisé sont représentées dans les tableaux 3.5 et 3.6.

Tableau 3.5. Caractéristiques physiques du sable

Caractérisations	Unité	Roulé
Masse volumique apparente	kg/m ³	1550
Masse volumique absolue	kg/m ³	2660
d/D	mm/mm	0/2
Module de finesse	-	2.20
Equivalent de sable	%	67.83
Coefficient d'absorption	%	1.34
Bleu de méthylène ¹	%	1.00

¹ Matériau riche en éléments fins.

Tableau 3.6. Analyse chimique du sable en (%).

SO ₃	SO ₄	CaCO ₃	CL ⁻	Matière organique	PH
0.24	0.29	1.60	0.21	1.04	8.34

La courbe granulométrique du sable utilisé pour cette étude est présentée sur la figure 3.17.

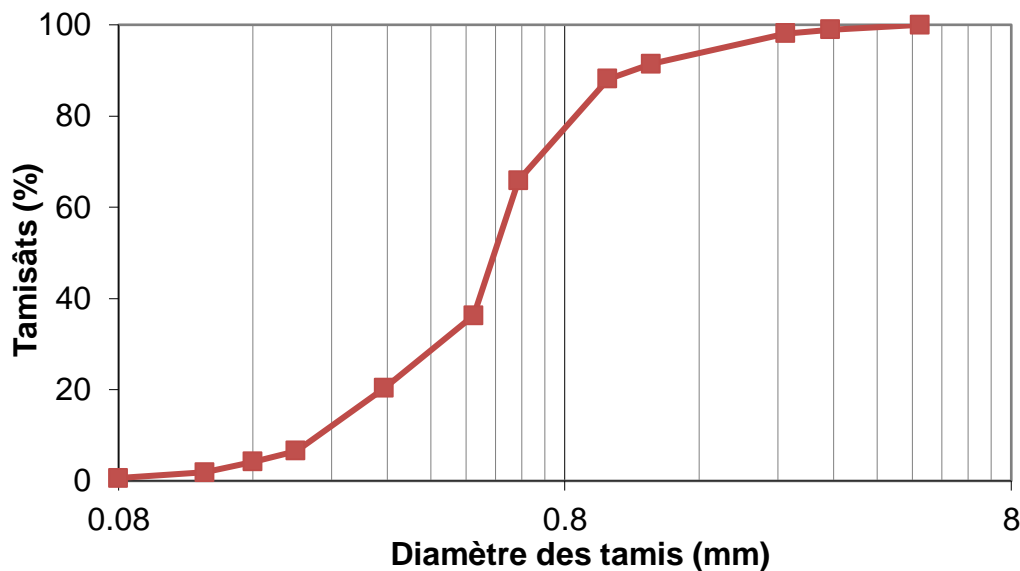


Figure 3.17. Courbes granulométriques du sable (0/2).

1.6 Eau de gâchage

L'eau employée pour le gâchage du mortier provient du réseau de distribution d'eau potable de la commune de Sidi Amar, wilaya d'Annaba.

2. FORMULATION DES MORTIERS

L'approche de formulation choisie dans cette étude est celle proposée par *Vitruve*. La composition qui est d'ordre volumique préconise trois volumes de sables pour un volume de chaux. Ces proportions permettent d'avoir des mortiers à l'épreuve du temps et ont été adoptés dans plusieurs recherches (Moroupoulou *et al*, 2005 ; Fragata & Veiga, 2010 ; Santos *et al*, 2018 ; Pachta *et al*, 2021). L'incorporation de la poudre de verre, la poudre de brique, et du métakaolin s'est faite par substitution volumique de la chaux à des taux de 10, 15, 20, 25 et 30 %. Seize formulations sont ainsi obtenues, comme le montre le tableau 3.7.

Tableau 3.7. Composition des mortiers d'étude.

Mortiers	Constituants	Proportion Vol	Volume (l)	Masse (kg)
Mortier témoin (MT)	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	1 V	1,65	4,05
	-	-	-	0,00
	Eau	2,4 V	3,95	3,95
10% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,9 V	1,48	3,65
	Verre	0,1 V	0,16	0,42
	Eau	2,2 V	3,62	3,62
15% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,85 V	1,40	3,44
	Verre	0,15 V	0,25	0,63
	Eau	2,1 V	3,46	3,46
20% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,80 V	1,32	3,24
	Verre	0,20 V	0,33	0,84
	Eau	2,1 V	3,46	3,46
25% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,75 V	1,23	3,04
	Verre	0,25 V	0,41	1,05
	Eau	2 V	3,29	3,29
30% PV	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,7 V	1,15	2,84
	Verre	0,3 V	0,49	1,26
	Eau	2 V	3,29	3,29
10% PB	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,9 V	1,48	3,64
	Brique	0,1 V	0,16	0,42
	Eau	2.25	3,70	3,70
15% PB	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,85 V	1,40	3,44
	Brique	0,15 V	0,25	0,64

	Eau	2,25 V	3,70	3,70
20% PB	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,80 V	1,32	3,24
	Brique	0,20 V	0,33	0,85
	Eau	2,24 V	3,69	3,69
25% PB	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,75 V	1,23	3,04
	Brique	0,25 V	1,41	1,06
	Eau	2,14 V	3,52	3,52
30% PB	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,7 V	1,15	2,83
	Brique	0,3 V	1,49	1,13
	Eau	2,13 V	3,50	3,50
10% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,9 V	1,48	3,65
	Metakolin	0,1 V	0,16	0,42
	Eau	2,4 V	3,95	3,95
15% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,85 V	1,40	3,44
	Metakolin	0,15 V	0,25	0,63
	Eau	2,35 V	3,87	3,87
20% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,80 V	1,32	3,24
	Metakolin	0,20 V	0,33	0,85
	Eau	2,35 V	3,87	3,87
25% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,75 V	1,23	3,04
	Metakolin	0,25 V	0,41	1,06
	Eau	2,35 V	3,87	3,87
30% MK	Sable	3 V	4,94	13,14
	Chaux	0,7 V	1,15	2,84
	Metakolin	0,3 V	0,49	1,27
	Eau	2,4 V	3,95	3,95

On ce qui concerne le dosage en eau, on a opté pour une maniabilité constante pour tous les mortiers. La consistance a été réalisée sur la table à secousses pour un étalement de $150 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ conformément à la norme (NF EN 459-2, 2010), ce qui correspond à une consistance plastique. La figure 3.18 présente un exemple de détermination du dosage en eau pour le mortier témoin.

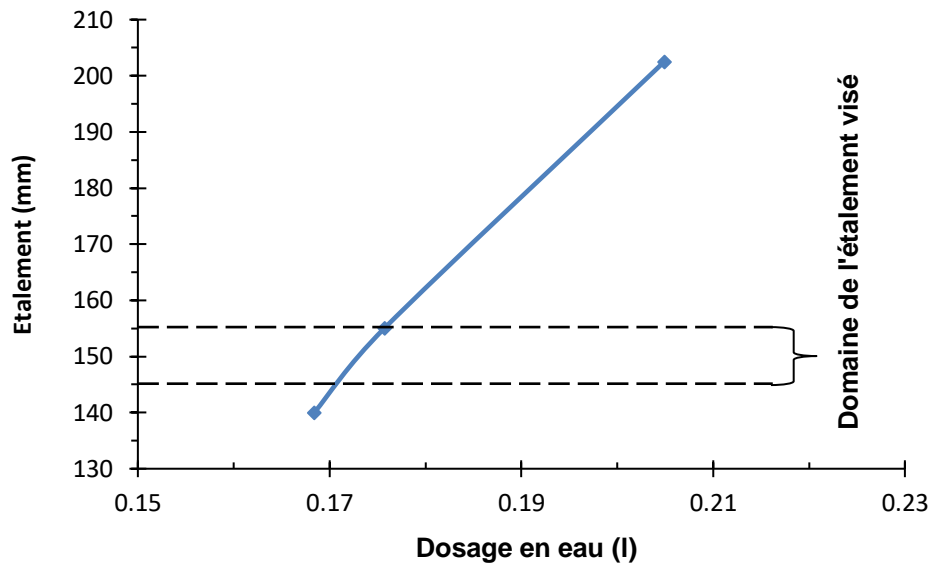


Figure 3.18. Exemple de détermination du dosage en eau du mortier témoin.

Le malaxage des mortiers a été effectué à l'aide d'un malaxeur d'une capacité de cinq litres. La séquence de malaxage est décrite par la norme NBN EN 1015-2 (NBN EN 1015-2, 2007), qui consiste à verser l'ensemble des constituants (Eau, Sable, chaux et éventuellement additions), à malaxer pendant 3 minutes. À la fin du malaxage on obtient un mélange homogène. Après le malaxage, il est procédé à la préparation des moules prismatiques (4x4x16) cm destinés aux différents essais. Les opérations de mise en place des éprouvettes ont été réalisées conformément au mode opératoire décrit par la NBN EN 1015-2 (NBN EN 1015-2, 2007). À la suite du coulage, les moules ont été conservés 72 heures à une température ambiante au laboratoire. Une fois le démoulage effectué, les éprouvettes sont référencées et conservées à l'air libre jusqu'aux échéances des différents essais. La figure 3.19 montre le mode de conservation des éprouvettes en mortiers.



Figure 3.19. Conservation des éprouvettes.

3. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

3.1 Essais sur mortier frais

3.1.1 Essai d'étalement à la table à secousses

Selon la norme NBN EN 1015-3 (NBN EN 1015-3, 2007), cet essai d'étalement est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du mortier à s'étaler par écoulement. L'essai est exécuté sur une table à laquelle un moule tronconique ($D_0 = 100$ mm ; $d_0 = 70$ mm ; $h = 60$ mm) est rempli en deux couches compactées par au moins 10 coups brefs de dame. La surface libre du disque doit être propre et sèche. Au bout de 15s, le moule est soulevé lentement et verticalement. 15 secousses à la table sont imprimées à une fréquence constante d'une secousse par seconde. Ensuite on mesure deux diamètres perpendiculaires d_1 et d_2 (Figure 3.20).

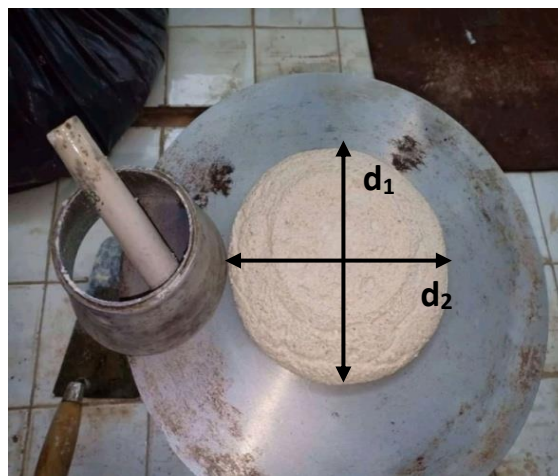


Figure 3.20. Etalement à la table à secousses d'un mortier de chaux.

La moyenne de ces deux diamètres nous renseigne sur la consistance du mortier testé grâce au tableau 3.8.

Tableau 3.8. Plages de consistances des mortiers (NBN EN 1015-3, 2007).

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

3.1.2. Délais de prises des mortiers de chaux

Le temps de prise initial des différentes formulations est déterminé avec l'appareil Vicat conforme à la norme française NF P 15-431 (NF P 15-431, 1994). La méthode consiste à mesurer le temps nécessaire à la pénétration dans le matériau d'un piston muni d'un poids total de 1000 g (Figure 3.21). Le temps de prise initial est défini comme le temps écoulé depuis le contact de l'eau avec le ciment jusqu'au moment où le piston du mélange est à $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

de la plaque de base. Tandis que le temps de fin de prise correspond à celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm de la surface.



Figure 3.21. Détermination des délais de prise avec l'Appareil de Vicat.

3.2. Essais sur mortier durci

3.2.1. Essai de traction par flexion

Dans ces essais de traction par flexion trois points sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm selon la norme NF EN 196-1 (NF EN 196-1, 2006). Ces essais ont été réalisés sur une machine universelle produite par Zwick/Roell de type Z020. Il s'agit d'une machine d'essai électromécanique d'une capacité de 20 kN en traction-compression, dotée d'une traverse de 66 cm de large, mobile entre deux colonnes. Son pilotage se fait par le logiciel TestExpert qui permet à la fois de consigner les paramètres d'essais, d'acquérir et de traiter les données (Figure 3.22). Les essais de traction par flexion ont été réalisés à une vitesse de traverse de 0.01 mm/min jusqu'à rupture de l'échantillon. Les mortiers d'étude ont été testés à court terme (14, 28, 58, et 90 jours) et à long terme (120, 180, 565, et 900 jours). Les résistances à la flexion représentent la moyenne de trois éprouvettes.

3.2.2. Essai de compression

La résistance à la compression des mortiers est mesurée conformément à la norme EN 196-1 (NF EN 196-1, 2006) sur les demi-prismes obtenus après rupture en flexion. Les essais ont été réalisés sur la même machine que celle de la flexion avec la même vitesse de traverse (figure 3.23). Les mortiers d'étude ont été testés à court terme (14, 28, 56, et 90 jours) et à long terme (120, 180, 565, et 900 jours). Les résistances à la compression représentent la moyenne de six éprouvettes.



Figure 3.22. Essai de traction par flexion 3 points.



Figure 3.23. Essai de compression.

3.2.3 Vitesse ultrasonore et module d'élasticité E

Les méthodes d'essai non destructives sont très appréciées dans le domaine de la conservation du patrimoine architecturale et culturel bâti. L'essai de vitesse ultrasonique fait partie des essais non destructifs qui ont pour but, dans le domaine du génie civil, de vérifier la qualité des matériaux comme le béton, ou le diagnostic des ouvrages, mais il permet aussi de déterminer les propriétés mécaniques et physiques, plus précisément le module de Young, grâce à la vitesse ultrasonore longitudinale.

Le dispositif de mesure est un générateur d'ultrasons de la marque MATEST (figure 3.23). L'appareil est connecté à deux transducteurs à ondes dont un émetteur et un récepteur. Les deux transducteurs sont couplés d'une façon alignée sur deux surfaces parallèles de l'échantillon. L'appareil mesure le temps de transit de l'impulsion en μs (microseconde) comme il est montré sur la figure 3.24. Nous avons utilisée, la relation entre la vitesse d'impulsion longitudinale, les constantes élastiques et la masse volumique pour déterminer le module d'élasticité dynamique suivant la relation (3.1).

$$E_d = V^2 \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (3.1)$$

Où : E_d est le module d'élasticité dynamique (Pa),

ρ est la masse volumique apparente,

V est la vitesse ultrasonore (m/s),

ν est le coefficient de Poisson, avec une valeur usuelle pour les mortiers à base de chaux prise de la littérature (0.25) (Boothby *et al.*, 1999, Apoustopoulou *et al.*, 2021).

L'essai a été effectué sur l'ensemble des formulations à une échéance de 1200 jours.



Figure 3.24. Etalonnage de l'appareil.



Figure 3.25. Mesure de la vitesse ultrasonique d'une éprouvette.

3.2.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau capillaire caractérise le coefficient qui traduit le mouvement de l'eau dans les matériaux poreux à travers les pores ou capillaires. Le transfert d'agents agressifs à travers ces capillaires peut affecter les performances de ces matériaux.

Dans ce travail, les essais d'absorption d'eau par capillarité (la recommandation de l'AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 97)) ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm préalablement séchées dans une étuve à 60°C jusqu'à masse constante. Elles ont été placées sur des supports adéquats (non absorbants) dans un bac à eau muni d'un système d'alimentation automatique en eau, afin de respecter un niveau partiel d'immersion constant de 5 mm (Figure 3.26). Les éprouvettes d'essai ont été par ailleurs couvertes d'un film en aluminium pour assurer une remontée d'eau unidirectionnelle et pour empêcher l'échange hydrique avec le milieu ambiant.



Figure 3.26. Essai d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient d'absorption capillaire est donné en $\text{kg/m}^2 \text{ min.}^{1/2}$, il est défini par la relation (3.2).

$$Ca_t = \frac{M_x - M_0}{A} t^{1/2} \quad (3.2)$$

Avec :

- M_x la masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg) ;
- M_0 la masse initiale de l'éprouvette (kg) ;
- A la section de l'éprouvette (m^2).

La sorptivité est définie par la vitesse d'absorption par remontée capillaire, elle est obtenue par une régression linéaire de l'ensemble des mesures qui se trouvent dans un domaine d'évolution linéaire du coefficient d'absorption C_{a_i} , généralement, entre 1 et 8 heures. R.Philip (John R.Philip, 1957) a introduit le terme sorptivité et l'a défini comme une mesure de la capacité du milieu à absorber ou désorber le liquide par capillarité. Selon Hall (Hal *et al.*, 1986) la sorptivité exprime la tendance d'un matériau à absorber et à transmettre de l'eau et d'autres liquides par capillarité.

La sorptivité est donnée par l'équation 3.3, tirée des travaux de (Bessa-Badreddine, 2004).

$$S = \frac{C_{a8} - C_{a1}}{\sqrt{8} - \sqrt{1}} \quad (3.3)$$

Avec :

- S est la sorptivité ($kg/m^2.h^{1/2}$) ;
- C_{a8} et C_{a1} : sont respectivement le coefficient d'absorption à 8 et 1 heures.

L'essai est réalisé au jeune âge à 56 jours, et à long terme à 565 jours.

3.2.5. Porosité accessible à l'eau

La détermination de la porosité des mortiers a été effectuée par la méthode de pesée hydrostatique, sur trois échantillons pour chaque formulation. La procédure de l'essai est basée sur la méthode (UNE 83980). Les échantillons ont été séchés dans une étuve à une température de 60° C jusqu'à l'obtention d'une masse constante qui représente le poids sec. Pour le poids saturé, les spécimens sont placés dans un récipient avec de l'eau, et bouilli jusqu'à masse constante (3 heures pour le présent cas). Au final, le poids hydrostatique est obtenu grâce à une balance spéciale (figure 3.27).

On utilise la formule (3.4) pour calculer la porosité :

$$P = \frac{\text{poids saturé} - \text{poids sec}}{\text{poids hydrostatique}} \times 100 \quad (3.4)$$



Figure 3.27. Mesure du poids hydrostatique.

3.2.6. Suivre de la carbonatation

Le durcissement des mortiers de chaux aérienne se fait par carbonatation, cette étape intervient lorsque le mortier a été mis en œuvre et que la chaux est exposée au contact de l'air. L'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) contenu dans la chaux va réagir avec le gaz carbonique (CO_2) pour former du carbonate de calcium (CaCO_3). Néanmoins, cette étape est lente et peut durer des années, voire des siècles. Du fait de la carbonatation, le pH du mortier tombe de 12,5 à l'état frais, à environ 7 à 8 après durcissement complet. Il serait donc possible de suivre l'évolution de la carbonatation des mortiers de chaux par des mesures de l'épaisseur de mortier carbonaté prélevé sur les demi-prismes obtenus après rupture en flexion.

Pour cela, les surfaces des demi-prismes sont pulvérisées par une solution de phénolphthaléine. Celle-ci vire au rouge violacé au contact de matériaux dont le pH est supérieur à 9,2 et demeure incolore pour les faibles valeurs de pH, c'est-à-dire pour les zones carbonatées (Figure 3.28).

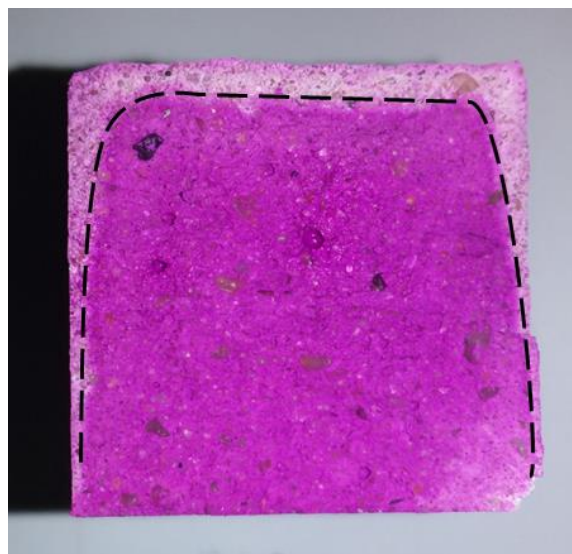


Figure 3.28. Photographie d'un échantillon de mortier de chaux à base de 30 % de poudre de verre à 56 jours de maturation.

Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du béton et le front de coloration, en dehors de zones particulières telles que les coins et les interfaces pâtes granulats. Le suivi de la carbonatation a été réalisé en parallèle avec les essais mécaniques.

4. CONCLUSION

De manière générale, les mortiers utilisés pour les interventions de restauration du patrimoine architecturale doivent être compatibles et durables. Afin de proposer une formulation adaptée à la restauration du théâtre de la ville de Skikda, il était nécessaire de procéder à une caractérisation physico-chimique et minéralogique des matières premières utilisées dans cette étude. Bien évidemment l'accent a été mis sur les trois additions utilisées et leurs propriétés pouzzolaniques, visant la valorisation de la poudre de verre, la poudre de brique qui sont considérés comme déchets, en tenant compte du fait que la chaux utilisée est une chaux purement aérienne.

Afin d'évaluer l'influence de la nature et du taux de pourcentage des additions sur les mortiers d'étude, les seize formulations obtenues de la substitution de la poudre de verre, de la poudre de brique, et du métakaolin à différents pourcentages, ont été à leur tour caractérisées. En premier lieu la caractérisation réalisée à l'état frais en étudiant la consistance, la masse volumique apparente, et le délai de prise. Ces paramètres sont d'une grande importance pour la mise en œuvre future des mortiers. En deuxième lieu, il a été procédé aux essais à l'état durcis, en déterminant les propriétés mécaniques (résistance à la traction-compression, module d'élasticité), propriétés physiques (porosité accessible à l'eau), propriétés hydriques (absorption par capillarité), et l'évolution de la carbonatation qui présente un paramètre essentiel, sachant que la chaux durcis par le processus de carbonatation.

Tous ces essais vont contribuer à mieux comprendre l'effet pouzzolanique des différentes additions utilisées, pour arriver ensuite au choix d'un mortier le mieux adapté du côté mécanique et physique, pour la restauration du théâtre de la ville de Skikda.

CHAPITRE IV
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

L'objectif de ce quatrième et dernier chapitre est de présenter l'influence des additions sur les caractéristiques des mortiers à base de chaux, ainsi que d'évaluer leur compatibilité avec le support de l'ouvrage étudié.

Sommaire

1. RÉSULTATS DES MORTIERS A L'ÉTAT FRAIS	87
1.1. Effet des additions sur la consistance.....	87
1.2. Effet des additions sur les délais de prise.....	89
2. RÉSULTATS DES MORTIERS A L'ÉTAT DURCI	91
2.1. Résistance à la traction par flexion.....	91
2.2. Résistance à la compression.....	93
2.3. Module d'élasticité dynamique.....	95
2.4. Porosité accessible à l'eau.....	97
2.5. Absorption par capillarité.....	99
2.6. Suivre de la carbonatation.....	102
3. CONCLUSION	104

Chapitre IV Résultats et discussions

PRÉAMBULE

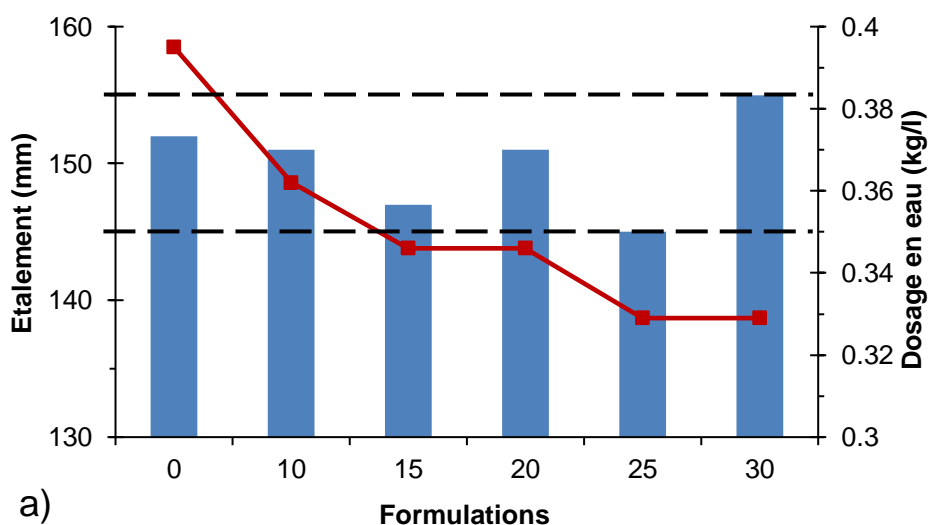
Comme il a été constaté dans le deuxième chapitre, le théâtre régional de la ville de Skikda souffre de diverses pathologies engendrées par différents facteurs. Le choix d'un mortier de restauration est donc devenu essentiel pour le maintien de sa durabilité. Ce chapitre est consacré aux résultats des différents essais de caractérisations présentés dans le chapitre trois. Il traitera en outre de l'influence des trois additions proposées : poudre de verre, poudre de brique et métakaolin sur les propriétés des mortiers élaborés à l'état frais et durcis. Par ailleurs, on s'intéresse également à l'influence des cinq taux de substitution proposés qui sont de l'ordre de 10, 15, 20, 25, et 30% pour chacune des additions. Au final, l'interprétation des différents résultats obtenus fournira des éléments précieux pour choisir la formulation la plus compatible, la mieux adaptée et appropriée à la restauration de l'édifice objet de ce travail.

1. RÉSULTATS DES MORTIERS A L'ÉTAT FRAIS

1.1 Effet des additions sur la consistance

Le choix d'une consistance fixe pour les différents mélanges a pour but de faciliter la comparaison entre les mortiers obtenus. La valeur de l'étalement à la table secousse choisie est de l'ordre de $150 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Cette valeur est souvent mentionnée dans la bibliographie (Cardoso *et al*, 20013 ; Pavlik & Uzakova, 2016 ; Santos *et al*, 2018). En conséquence, le dosage en eau sera variable, et se sont les essais qui vont nous fournir la quantité d'eau nécessaire pour atteindre cet étalement.

Les valeurs de consistance sont présentées dans la figure 4.1 sous forme d'histogramme avec les deux limites inférieure et supérieure de la consistance visée. La courbe en rouge représente le dosage en eau en kg/l, des différentes formulations.



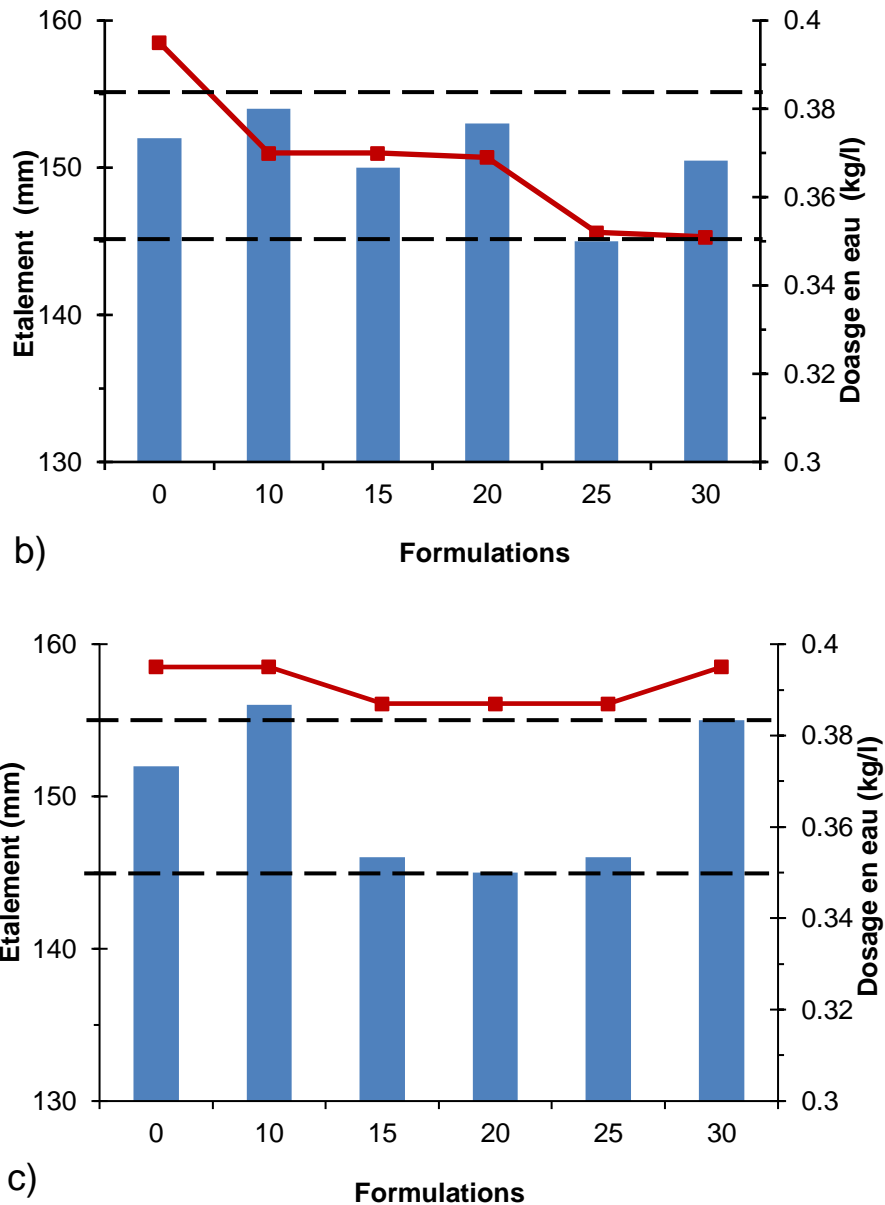


Figure 4.1. Effet de la substitution de la chaux sur la demande en eau des mortiers : a- Poudre de verre, b- poudre de brique et c- Métakaolin.

D'après la figure 4.1, il est évident que la demande en eau exprimée par le rapport Eau/Liant (E/L) évolue selon la nature et le taux de substitution. En effet, il est constaté que la substitution de la chaux aérienne par les trois additions a réduit le dosage en eau nécessaire à l'obtention d'une consistance de $150 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. On observe aussi que la quantité d'eau requise diminue avec l'augmentation du taux de substitution pour toutes les formulations à l'exception des mortiers (MK10) et (MK30).

La demande en eau pour les mortiers à base de poudre de verre et de poudre de brique est inférieure à celle du mortier de référence (MT) et aux mortiers à base de métakaolin. Cela peut s'expliquer par l'effet de remplissage. Les fines particules des déchets recyclés de brique ou de verre ont pour effet de remplir les vides entre les plus grands grains de sable, diminuant ainsi, la quantité d'eau nécessaire pour la même consistance (Idir, 2009 ; Oliveira *et al.*,

2013). Ce comportement est déjà mentionné dans la bibliographie par (Silva *et al.*, 2009 ; Oliveira *et al.*, 2013) .

La plus faible quantité d'eau pour les seize (16) formulations élaborées est constatée pour le mortier (MPV30). En effet La substitution volumique de la chaux par 30 % de poudre de verre a réduit le dosage en eau d'une façon appréciable de 16,7 %. Ce qui permet de conclure que la poudre de verre joue un rôle de fluidifiant. Ce phénomène a été constaté par Hudson (Hudson, 1999) et confirmé par Idir (Idir, 2009) qui a rapporté à son tour, qu'un dosage de 10 à 30 % en poudre de verre procure un effet fluidifiant. Ce comportement peut être aussi expliqué par le fait que les particules de poudre de verre sont plus grosses comparées à celles de la chaux (Ontiveros-Ortega *et al.*, 2018), en ce sens que la teneur en granulats fins (sable), ainsi que leur composition et leur forme arrondie font partie des facteurs qui peuvent influencer la consistance des mortiers (Bulut, 2010).

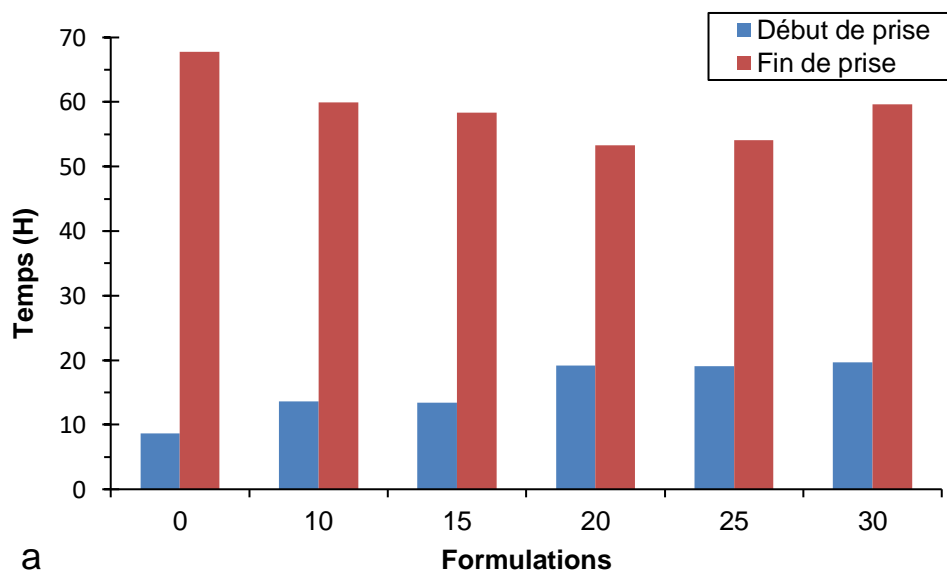
En ce qui concerne le métakaolin, on constate que la quantité d'eau nécessaire pour le maintien de la même consistance est similaire à celle du mortier témoin (MT). Ce comportement est déjà constaté par Faria (Faria&Martinez, 2013) qui dans leurs travaux ont mentionné que la demande en eau du métakaolin est aussi semblable à celle de la chaux.

Par ailleurs, on note une faible réduction du dosage en eau à partir de 15 % de substitution, estimée à 2 %. Monteiro et al (Monteiro *et al.*, 2021) ont eux aussi, trouvé dans leurs études que la substitution de la chaux par un taux de 10 à 20% de métakaolin possède une faible influence sur la consistance des mortiers.

1.2. Effet des additions sur les délais de prise

Un des plus grand désavantage des mortiers à base de chaux aérienne est leur prise très lente. La substitution de la chaux par les trois pouzzolanes artificielles proposées a pour but d'améliorer justement cette propriété, qui souvent handicape les mortiers de chaux.

L'estimation de l'apport de la poudre de verre, de la poudre de brique, et du métakaolin avec les cinq taux de substitution proposées, a permis d'obtenir les résultats présentés dans la figure 4.2 qui à leur tour, ont été comparés à ceux de la formulation de base (MT).



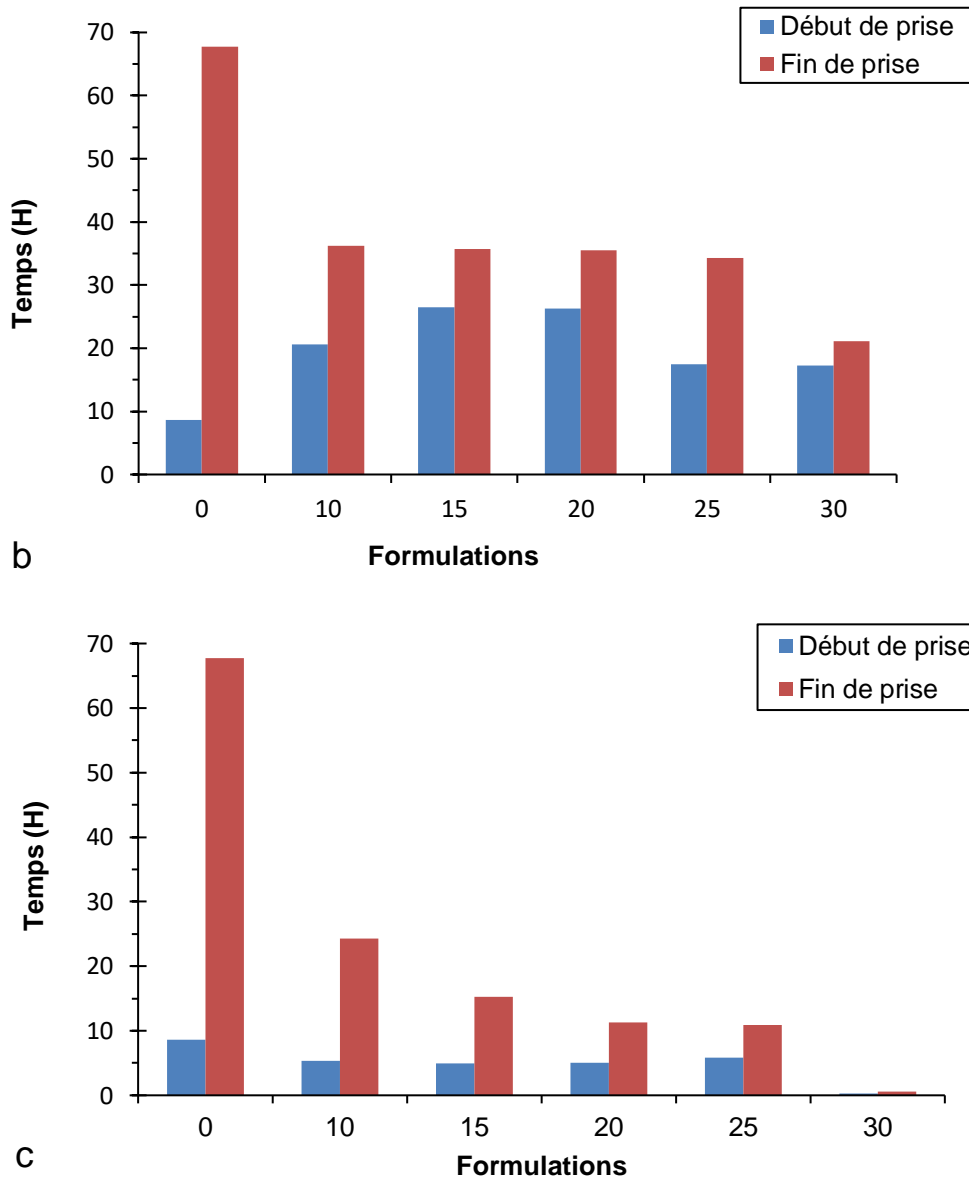


Figure 4.2. Effet de la substitution de la chaux sur les délais de prise : a- Poudre de verre, b- poudre de brique et c- Métakaolin.

D'après la figure 4.2, il est clair que les trois additions ont une influence significative sur le délai de prise. Sur la figure 4.2-a, on constate que la substitution de la chaux par de la poudre de verre ne réduit pas le début de prise du mortier témoin (MT), au contraire on assiste à une augmentation des temps de début de prise avec l'augmentation du taux de substitution de la chaux. À titre d'exemple, une substitution de la chaux par 15 % de poudre de verre augmente le début de prise du mortier de 55 %, tandis qu'une substitution à 30 % de poudre de verre augmente le début de prise de 127 %. Jusqu'à un taux de substitution de 20 % en poudre de verre, la fin de prise décroît, mais au-delà de ce taux, on assiste à une augmentation de la fin de prise, cependant, la fin de prise du mortier à base de 30 % de poudre de verre est inférieure à celle du mortier témoin.

En ce qui concerne la poudre de brique, elle a eu un comportement similaire à celui de la poudre de verre. Néanmoins la réduction de temps de prise est plus significative est

proportionnelle au taux de substitution. En effet, plus la quantité de déchets augmente, plus la quantité d'eau contenue dans les pores de ces derniers est grande, retardant ainsi, la prise de la chaux. Des résultats similaires ont été observés dans des travaux antérieurs (Ayat, 2015), et qui a été interprété par la rapidité de la diffusivité du CO_2 dans l'eau, alors qu'elle reste dix fois plus faible dans l'air (décalcification) (Sanchez *et al.*, 2005 ; Cemy *et al.*, 2006 ; Labiadh *et al.*, 2007).

La substitution de la chaux par du métakaolin réduit significativement les délais de prise des mortiers, l'ensemble des substitutions présente des débuts et des fins de prises inférieurs au mortier témoin. Un taux de 30 % de substitution en métakaolin réduit respectivement le début et la fin de prise de 96 % et 99 %. Ces résultats viennent confirmer l'activité pouzzolanique du métakaolin qui contient un taux important d' Al_2O_3 (39,52 %) formant des aluminates de calcium, qui favorise le durcissement plus rapide des mortiers (Oates, 1998 ; Lawrence, 2006).

Globalement on peut conclure des résultats obtenus, que les trois substitutions utilisés ont eu une influence positive sur le délai de prise des mortiers. En effet, la chaux aérienne a comme majeur handicap sa lenteur de prise dans les chantiers. La poudre de verre, la poudre de brique et le metakaolin ont confirmés leur propriété pouzzolanique avec la réduction des temps de fin de prise.

2. RÉSULTATS DES MORTIERS A L'ÉTAT DURCI

2.1 Résistance à la traction par flexion

Les résistances à la flexion sont présentées respectivement sur les figures 4.3, 4.4 et 4.5 pour l'ensemble des mortiers. Les résultats à court et long terme sont présentés séparément pour chaque figure.

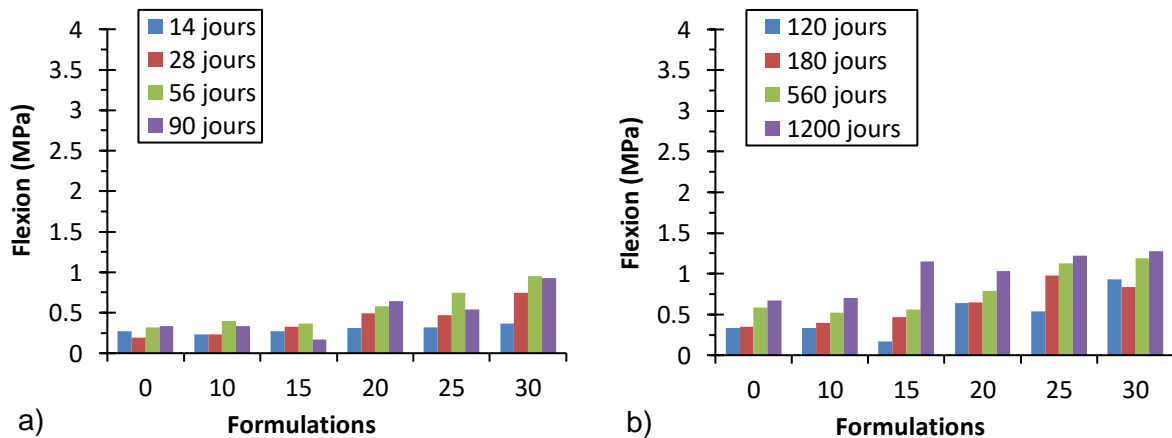


Figure 4.3. Résistance des mortiers avec poudre de verre: a) court terme, b) long terme.

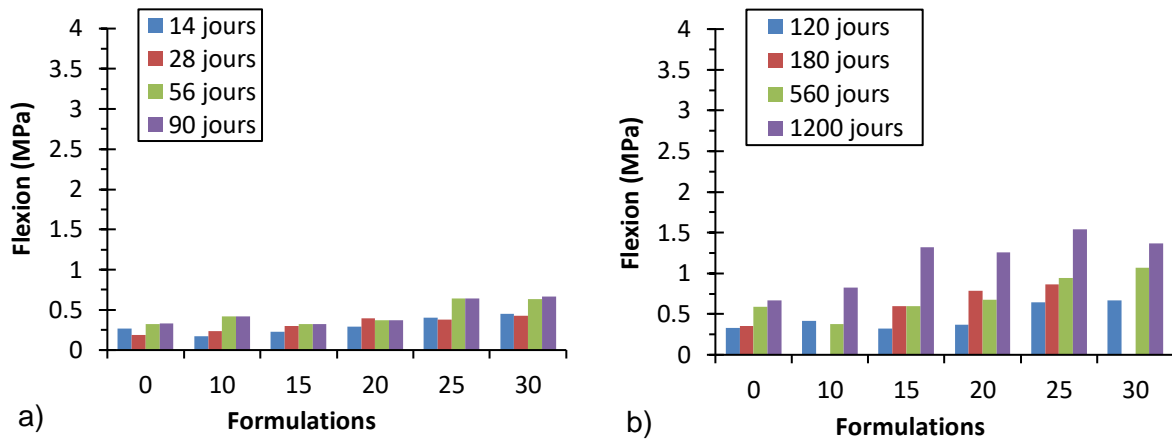


Figure 4.4. Résistance des mortiers avec poudre de brique: a) court terme, b) long terme.

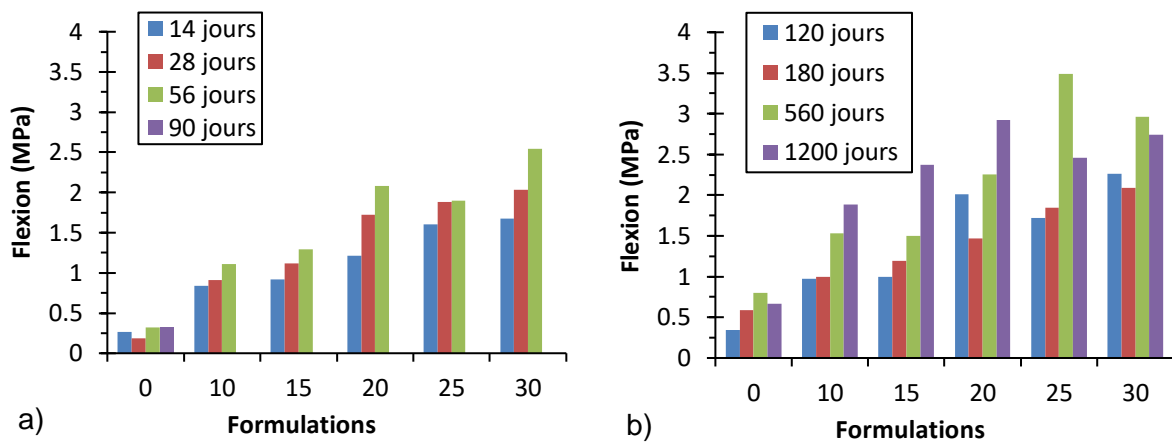


Figure 4.5. Résistance des mortiers avec métakaolin: a) court terme, b) long terme.

Les trois figures ci-dessus montrent que la substitution de la chaux par de la poudre de verre, de la poudre de brique, ou du métakaolin améliore clairement les performances mécaniques du mortier. En effet, les trois substitutions ont données des valeurs plus élevées que celles du mortier témoin (MT). Cette augmentation évolue en fonction du temps, mais aussi en fonction du taux de substitution. Ces résultats peuvent être liés à la réaction pouzzolanique et résultent de la combinaison des matériaux pouzzolaniques et du $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Dans un environnement humide, cette combinaison produit des matériaux avec de bonnes qualités de liaisons hydrauliques (Moroupoulou *et al.*, 2004). L'effet de remplissage ainsi que la faible teneur en eau peuvent aussi expliquer l'augmentation des résistances mécaniques : les fines particules des déchets comblent les vides entre les particules de sable, augmentant la compacité des mortiers, et par conséquent, il en résulte des résistances plus élevées (Aliabdo *et al.*, 2016).

Pour ce qui est de la poudre de verre, on remarque sur la figure 4.3 que les mortiers (MPV10) et (MVP15) donnent des valeurs inférieures à celle du mortier témoin (MT) que ce soit à court terme (figure 4.3-a) ou à long terme (figure 4.3-b). On peut donc conclure que la substitution de la chaux par de la poudre de verre en termes de résistance à la flexion n'est significative qu'à partir de 20%.

La résistance à la flexion des mortiers à base de poudre de brique a aussi augmenté comme il est indiqué sur la figure 4.4. Aalil et Nevratilova (Aalil, 2019 ; Nevratilova *et al.*, 2016) ont trouvé des résultats similaires dans leurs travaux de recherche, et ont confirmé la réaction pouzzolanique de la poudre de verre avec la chaux. Cependant, une diminution de résistance a été noté pour cinq mortiers entre 56 et 90 jours. Un comportement similaire a été observé dans des recherches antérieures de (Aalil, 2019 ; Idir, 2009). Ce phénomène peut trouver une explication par la micro fissuration interne, résultante d'une contrainte de traction lors de l'essai de flexion.

Comme nous pouvons également le constater sur la figure 4.5, tous les mortiers avec addition de métakaolin, ont enregistré les plus grandes valeurs dans l'ensemble des seize (16) formulations. Cette augmentation proportionnelle au taux de substitution vient confirmer la forte réactivité pouzzolanique entre le métakaolin et la chaux qui favorise le développement des résistances.

Les bonnes résistances à la flexion induisent une meilleure résistance à la fissuration, néanmoins à long terme (figure 4.5-b), on remarque une baisse de résistance entre trois et six mois, Monteiro et al (Monteiro *et al.*, 2021), Gameiro et al. (Gameiro *et al.*, 2014) et Andrejkovičová et al (Andrejkovičová *et al.*, 2013) ont eux aussi enregistré des baisses de résistance à long terme pour des mortiers de chaux avec des taux de substitution de métakaolin variant entre 20% et 30%. Cette baisse est peut-être due aux microfissurations induites par le retrait des mortiers, ou encore à l'augmentation du rapport eau/liant (E/L) (Monteiro *et al.*, 2021).

2.2 Résistance à la compression

Les essais de compressions sont réalisés sur les demi-prismes obtenus des essais de flexion. Les figures 4.6, 4.7 et 4.8 représentent les résultats de la compression pour les seize mélanges à court et long terme. Chaque valeur représente la moyenne de six valeurs de compression.

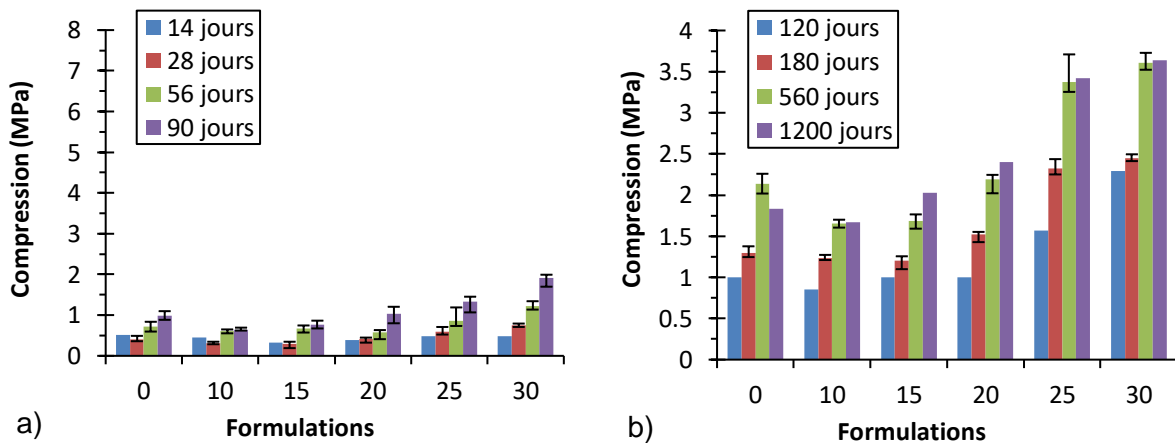


Figure 4.6. Résistance à la compression des mortiers avec la poudre de verre : a) court terme, b) long terme.

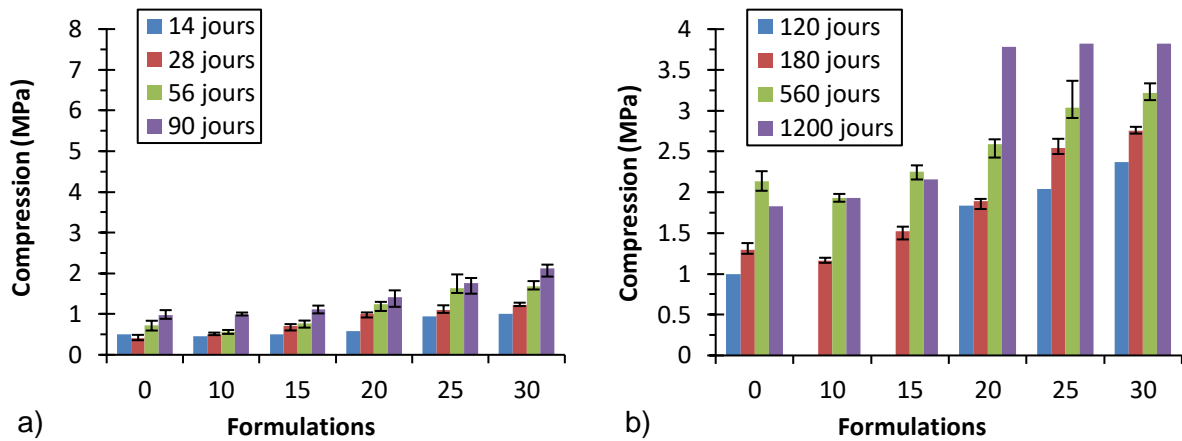


Figure 4.7. Résistance à la compression des mortiers avec la poudre de brique: a) court terme, b) long terme.

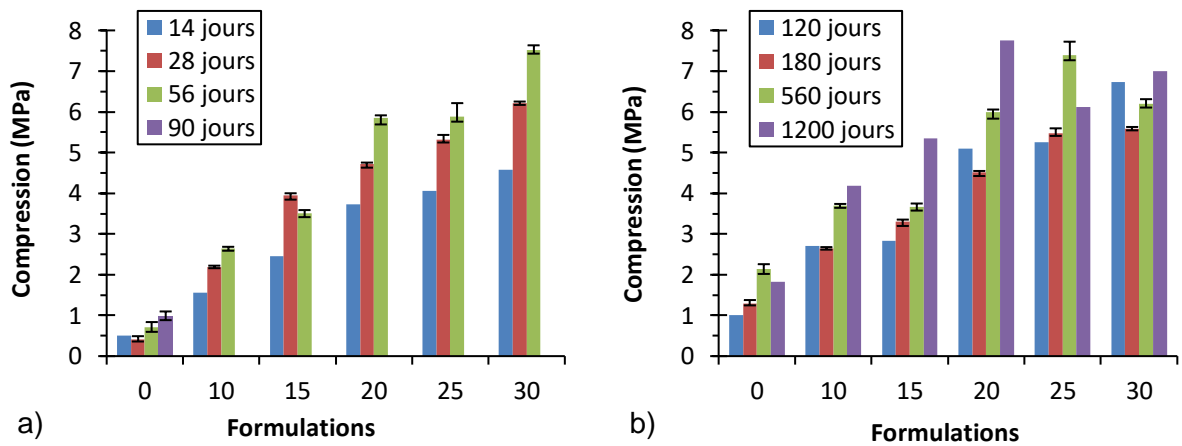


Figure 4.8. Résistance à la compression des mortiers avec métakaolin: a) court terme, b) long terme.

Les résultats obtenus suivent ceux observés en flexion. L'augmentation des résistances est claire pour les trois types d'additions. Comme pour les résistances à la flexion, la poudre de verre, la poudre de brique et le métakaolin ont une activité pouzzolanique qui contribue à la formation des C-S-H, et au développement de la capacité hydraulique. La réaction de la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) avec la silice (SiO_2) et l'aluminate (Al_2O_3) donne des silicates de calcium et aluminates de calcium. (Moroupoulou *et al.*, 2003 ; Henriques, 2005 ; Oliveira *et al.*, 2013). Ces arguments peuvent expliquer l'augmentation de la résistance mécanique des mortiers, en ce sens que cette augmentation est également liée à la nature de la réaction chimique de la chaux avec la pouzzolane.

Quant aux mortiers témoins (MT), les mortiers à base de chaux aérienne durcissent suivant deux étapes : la première se caractérise par une perte d'eau et la deuxième suivant le processus de carbonatation qui se développe avec le temps (Lanas *et al.*, 2005). Au delà de 565 jours les résistances enregistrent une baisse, des résultats similaires ont été trouvés par (Karaveziroglou-Weber & Papayianni, 1993, Garijo *et al.*, 2020), qui ont constaté que les résistances des mortiers à base de chaux sans ajout céramique augmentent avec le temps mais commence à diminuer après un an, (Manita & Triantafyllou) ont eux aussi vérifié que les résistances à la compressions peuvent varier entre augmentation, stabilisation ou baisse , et

ont attribué ce comportement principalement à la quantité de portlandite (Ca(OH)_2) non carbonatée.

Concernant le métakaolin, les résultats présentés sur la figure 4.8 sont semblables à ceux trouvés par plusieurs chercheurs (Gameiro *et al.*, 2014 ; Andrejkovicova *et al.*, 2013 ; Laureiro *et al.*, 2020 ; Faria & Martins, 2013). Généralement, il a été prouvé que le métakaolin augmente les résistances mécaniques proportionnellement à l'augmentation du taux de substitution. Cette augmentation est liée à la réaction pouzzolanique entre la chaux (Ca(OH)_2), la silice (SiO_2) et l'aluminate (Al_2O_3) (Velosa *et al.*, 2009). Les résistances commencent à diminuer entre trois et douze mois. Ce comportement semblable à celui de la flexion est aussi remarqué par d'autres auteurs (Chiaverini, 2004 ; Velosa *et al.*, 2013 ; Aggelakopoulou *et al.*, 2011). En effet les mortiers à base de chaux avec différentes additions pouzzolaniques peuvent montrer des variations dans leurs comportement mécaniques (baisse ou stabilisation). Les microfissures provoquées par le retrait peuvent également jouer un rôle dans cette diminution des résistances (Velosa *et al.*, 2009). Néanmoins, on remarque qu'au delà de 180 jours les résistances ont repris en gain. Cette augmentation peut être liée au durcissement des mortiers par carbonatation.

Les mortiers avec le taux de substitution de 30% pour les deux additions : poudre de verre et poudre de brique ont donné les plus grandes résistances avec des valeurs de 3.64 MPa et 3.82 MPa respectivement et pour la même échéance qui est de 1200 jours. Quant au métakaolin, toujours pour la même échéance de 1200 jours, c'est le mortier (MK20) qui a enregistré la plus grande résistance avec une valeur de 7.75 MPa. Le fait que le métakaolin a donné les meilleures résistances peut s'expliquer par les taux de la silice (SiO_2) et l'aluminate (Al_2O_3) qui sont supérieurs de ceux présents dans la poudre de verre et les déchets de brique (voir chapitre 3, tableaux 3.2, 3.3 et 3.4).

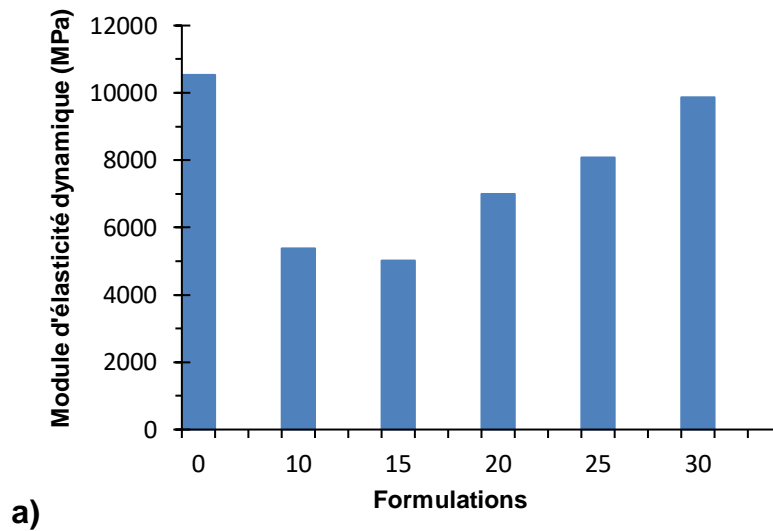
L'augmentation des résistances mécaniques produites par l'effet des additions est un point positif non négligeable pour notre étude. Néanmoins, il est important que les résistances ne dépassent pas celle du support d'origine sur lequel, les mortiers doivent être appliqués. Globalement, les valeurs obtenues pour chaque addition remplissent les recommandations générales pour les bâtiments anciens (Veiga, 2017).

2.3 Module d'élasticité dynamique

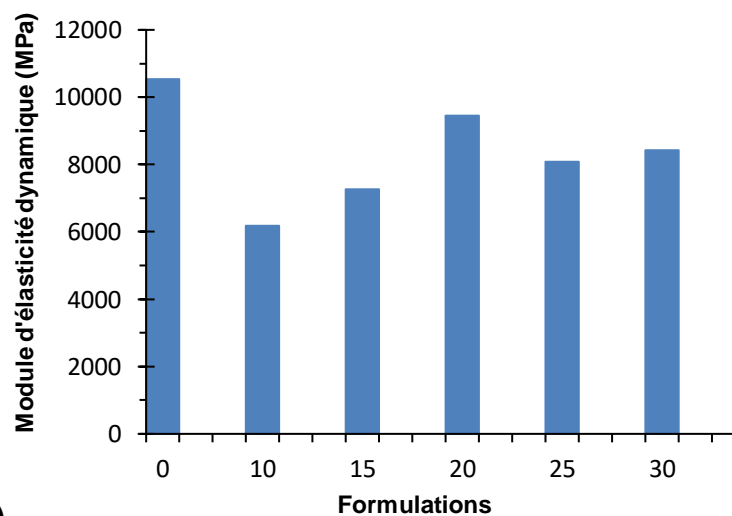
La figure 4.9 rapporte les résultats du module d'élasticité dynamique par la mesure de la vitesse ultrasonique pour les seize formulations de mortier. D'après la figure, il est clair que les valeurs obtenues varient selon la variation des formulations, et on peut constater que les mortiers avec les grandes résistances présentes les plus grandes valeurs de module d'élasticité, ceci est bien lié à la structure du réseau poreux des mortiers, car un système plus compact conduit à une résistance à la compression plus élevée, mais à un matériau moins ductile (Apostolopoulou *et al.*, 2021). Concernant le mortier témoin (MT), il a présenté la valeur la plus faible du module d'élasticité dynamique, mais qui correspond à celle mentionnée dans la littérature (Veiga, 2017 ; Veiga *et al.*, 2010 ; Aggelakopoulou *et al.*, 2019 ; Marques *et al.*, 2020). En effet, l'une des principales propriétés qui caractérise les mortiers de chaux est leur faible rigidité (Lanas & Alvarez 2003).

La substitution de la chaux par la poudre de verre, la poudre de brique et le metakaolin a augmenté le module de Young de 3719 MPa à des valeurs qui atteignent 7686,3 MPa, 6732,5 MPa et 8363,5 MPa respectivement. Ses valeurs correspondent à ceux des mortiers à base de chaux hydraulique naturelle. On peut dire que l'augmentation du module d'élasticité dynamique corrèle avec l'augmentation des résistances mécaniques.

Globalement le module d'élasticité dynamique obtenu pour toutes les formulations est faible (< 12000 MPa), ce qui peut permettre l'absorption des éventuelles microdéformations et vibrations par le mortier et non le support d'origine garantissant ainsi une longévité des matériaux structuraux (Aggelakopoulou *et al.*, 2022). En effet, lorsque le mortier ne peut pas faire face aux déformations, des contraintes internes apparaissent dans le revêtement, ce qui peut entraîner des fissurations, et c'est pour minimiser ce problème que la connaissance du module d'élasticité dynamique E est très importante lors de la conception des mortiers de restauration (Marques *et al.*, 2020).



a)



b)

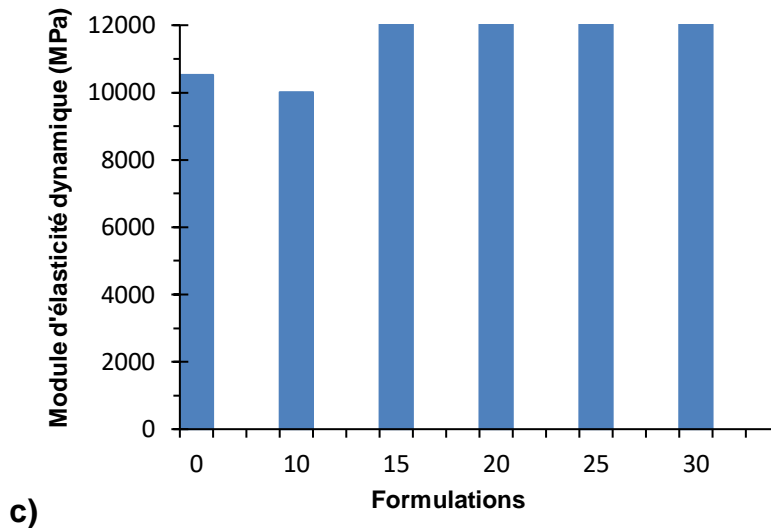
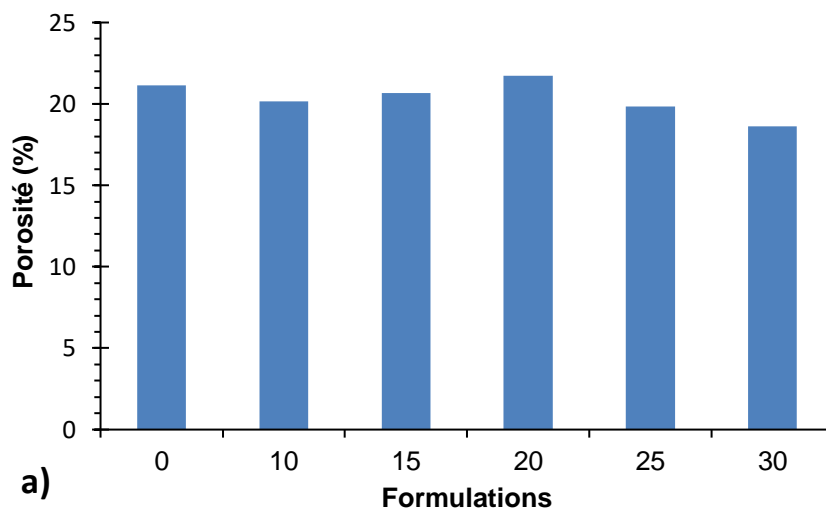


Figure 4.9. Module d'élasticité E des mortiers : a-poudre de verre, b-poudre de brique, c-métakaolin.

2.4 Porosité accessible à l'eau

La porosité est une caractéristique très importante des mortiers à base de chaux, elle peut être un facteur déterminant en ce qui concerne leur comportement et leur résistance mécanique. Cette porosité dépend de plusieurs facteurs différents, notamment dans les mortiers de chaux-puzzolane où le durcissement se produit par deux mécanismes qui sont la réaction pouzzolanique et la carbonatation (Hencen *et al.*, 2008).



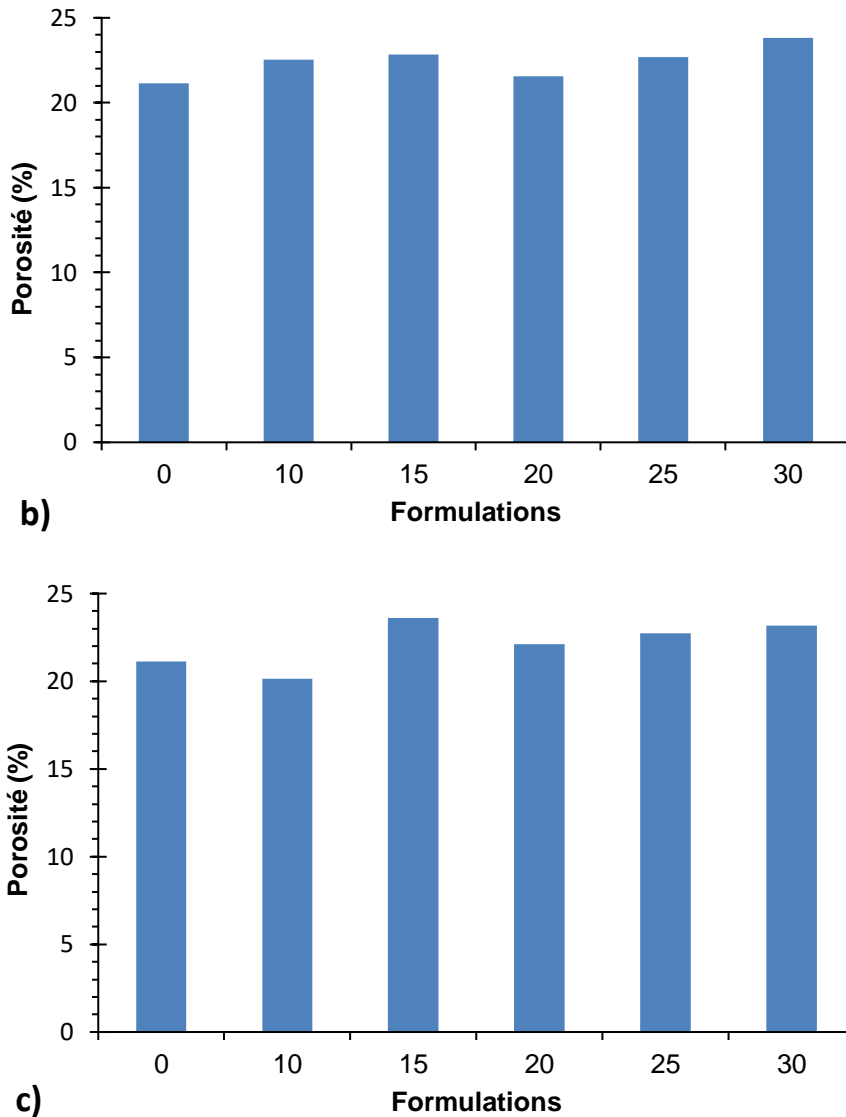


Figure 4.10. Porosité accessible à l'eau : a-poudre de verre, b-poudre de brique, c-métakaolin.

Comme on le constate sur la figure 4.10, les trois additions ont conduit à des comportements différents. En effet, comparé au mortier témoin (MT), la poudre de verre a légèrement diminué le taux de porosité, contrairement à la poudre de brique et du métakaolin qui ont eu un impact inverse sur la porosité des mortiers. Le mortier avec 30% de poudre de verre (MPV30) qui a atteint en termes de résistance mécanique une bonne valeur, représente le mortier avec la porosité la plus faible.

Par rapport au mortier témoin (MT), la porosité du mortier (MPV30) passe de 21,14% à 18,62%. La réduction de la porosité résulte du processus de carbonatation où la calcite formée par transformation de la portlandite a rempli les pores (Moroupoulou *et al.*, 2003).

Quant à la poudre de brique, l'augmentation de la porosité a déjà été observé par Moroupoulou (Moroupoulou *et al.*, 2003). Ce comportement peut être lié au rapport eau/liant (E/L), où de légères différences dans la quantité d'eau nécessaire pour une maniabilité prédéfinie peuvent entraîner de grands changements de porosité (Hensen *et al.*, 2008).

On remarque aussi que la substitution de la chaux par le métakaolin augmente sensiblement le taux de porosité des mortiers par rapport à celle du mortier témoin. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Loreiro (Loreiro *et al.*, 2020) et Moteiro (Monteiro *et al.*, 2021). La présence du métakaolin génère une nouvelle famille de pores qui augmente de volume avec l'augmentation du taux de métakaolin (Arizzi & Clutrone, 2012), et comme l'ont mentionné (Lanas *et al.*, 2004), sur la contradiction de ses résultats car en général, moins un échantillon est poreux, plus les valeurs de résistance sont élevées. Dans les mortiers à base de chaux, un certain degré de porosité peut être favorable en raison du fait qu'une augmentation de la porosité permet une carbonatation plus rapide et plus complète et la transformation portlandite entraîne une augmentation de la résistance.

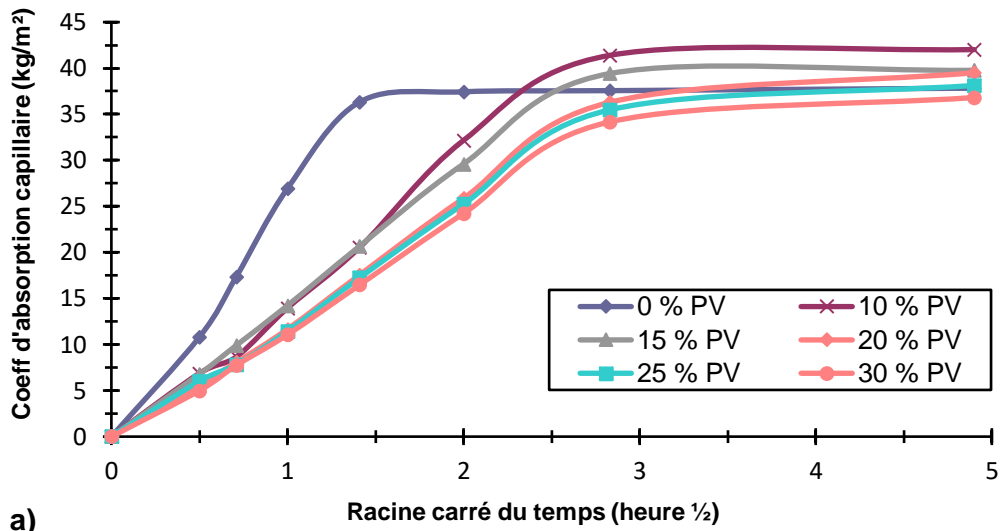
Néanmoins les taux de porosité ouverte rencontrés dans la bibliographie sont de l'ordre de 24-39 % (Veiga, 2017 ; Vejmelková *et al.* 2012 ; Aalil, 2017) pour les mortiers à base de chaux avec ou sans additions pouzzolaniques.

La différence entre les résultats mentionnés dans la bibliographie et ceux obtenus dans la présente étude expérimentale peut s'expliquer par l'échéance des essais. En effet les valeurs mentionnées dans la littérature sont généralement mesurées à court terme, alors que dans notre cas, la porosité a été mesurée à 560 jours, les pores se sont remplis par la transformation de la portlandite en calcite par le processus de carbonatation (Apostolopoulou *et al.*, 2021), l'augmentation de la résistance mécanique confirme cette hypothèse.

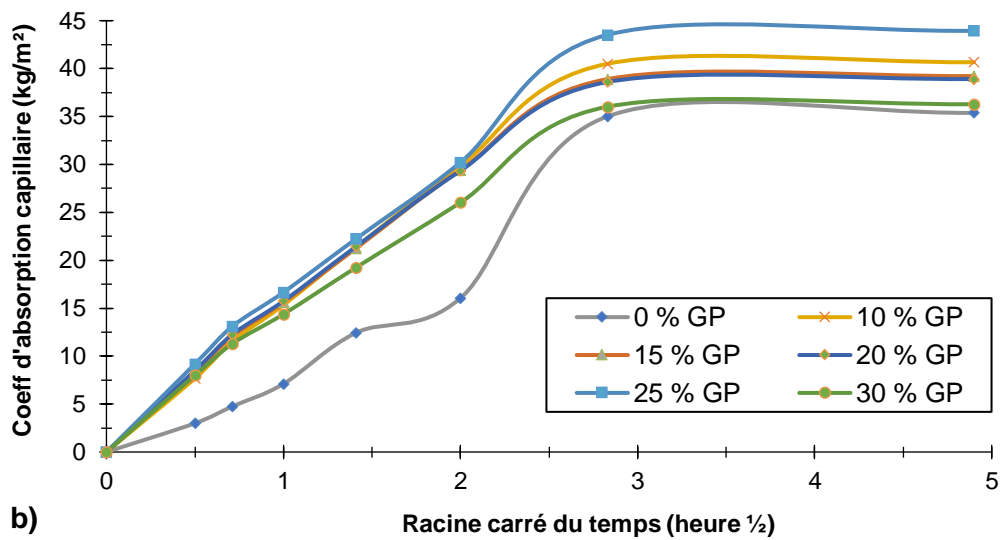
2.5 Absorption par capillarité

Les résultats de l'absorption d'eau par capillarité en fonction de la racine carrée du temps pour l'ensemble des mortiers à court et à long terme (56 et 565 jours) sont présentés dans les figures 4.11, 4.12 et 4.13, respectivement pour les mortiers avec poudre de verre, les mortiers avec poudre de brique et les mortiers avec métakaolin.

De façon générale, l'absorption capillaire de l'eau présente deux comportements : le premier est la vitesse initiale d'absorption de l'eau que l'on mesure par le coefficient capillaire, le deuxième sont les quantités totales d'eau absorbée mesurées par les valeurs asymptotiques (Moroupoulou *et al.*, 2005). On constate que les courbes d'absorption sont composées de deux parties, une partie linéaire qui correspond à l'absorption capillaire des mortiers dans le temps et une deuxième partie qui correspond à une stabilisation des coefficients d'absorption dans le temps. Ce palier peut s'expliquer non pas à cause d'une saturation de l'échantillon mais en raison de l'équilibre atteint entre la force de capillarité (ascendante) et celle de la gravitation (descendante).

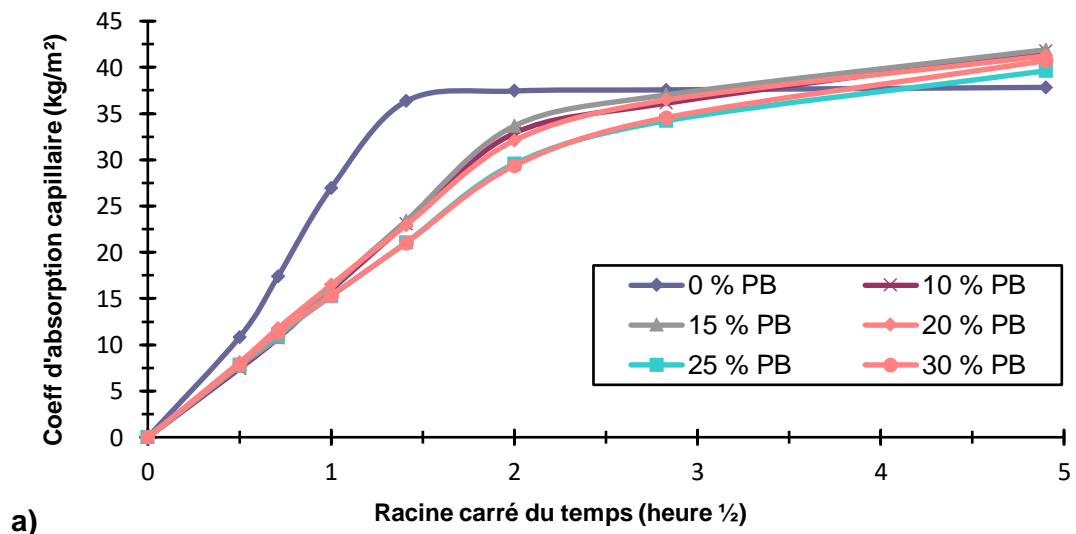


a)



b)

Figure 4.11. Effet de la substitution de la chaux sur l'absorption d'eau capillaire des mortiers avec poudre de verre a- 56 jours et b- 565 jours.



a)

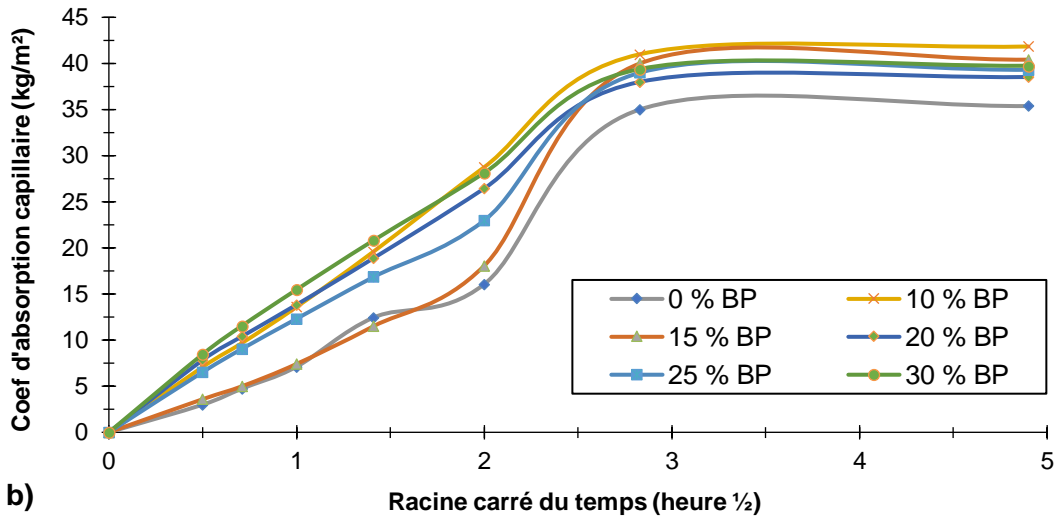
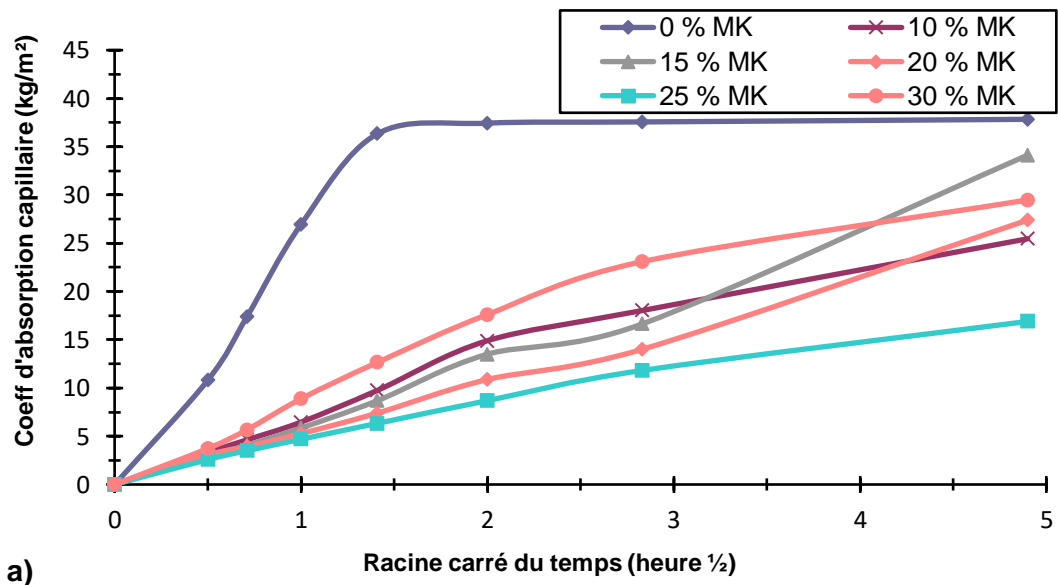


Figure 4.12. Effet de la substitution de la chaux sur l'absorption d'eau capillaire des mortiers avec poudre de brique : a- 56 jours et b- 565 jours.

D'après les trois figures (4.11, 4.12 et 4.13), chacune des poudres de verre, de brique et de métakaolin, ont eu pour effet de réduire l'absorption capillaire. Cette diminution s'explique par l'effet de remplissage du vide par les additions utilisées. Les vaisseaux capillaires se sont amincis et ont eu pour effet de changer la distribution porale et par là même, la réduction du flux d'eau dans les mortiers (Jesus *et al.*, 2019 ; Arizzi & Cultron 2012 ; Oliveira *et al.*, 213). On peut également noter que la réduction de la quantité d'eau nécessaire à la préparation des mortiers avec des additions, peut diminuer le coefficient de capillarité (Arandigoyen *et al.*, 2005 ; Aalil, 2017).



a)

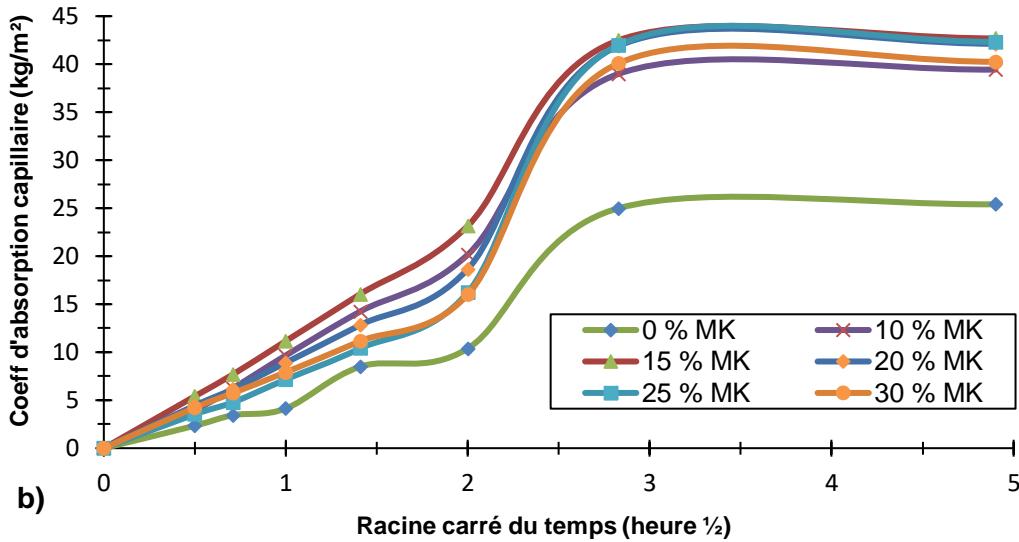


Figure 4.13. Effet de la substitution de la chaux sur l'absorption d'eau capillaire des mortiers avec du Métakaolin : a- 56 jours et b- 565 jours.

Les mortiers à base de métakaolin présentent les plus faibles coefficients de capillarité. Plus le coefficient d'absorption est faible et mieux c'est pour les mortiers de restauration. En effet, cela permet la diminution de l'infiltration de l'eau qui reste le principal facteur de dégradation dans les anciens bâtiments, et en l'occurrence dans ce cas d'étude.

A long terme, une légère diminution de l'absorption a été observée pour les seize formulations proposées. Comparé à tous les mortiers avec additions, le mortier témoin (MT) présente le coefficient capillaire le plus faible après 180 jours. Ce comportement a déjà été constaté par Moroupoulou (Moroupoulou *et al*, 2005). La diminution de l'absorption par capillarité à long terme peut être liée à la diminution des vides par le processus de carbonatation de la chaux.

2.6 Suivre de la carbonatation

Les résultats de la carbonatation à la phénophtaléine à plusieurs échéances qui sont présentés dans la figure 4.14 (exemple d'un mélange tel que présenté en Annexe pour la totalité des mortiers).

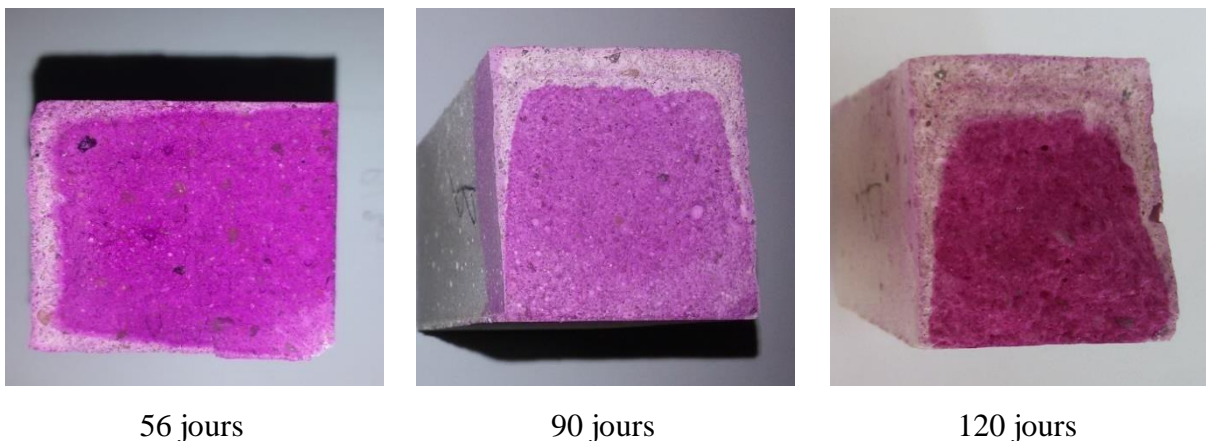


Figure 4.14. Evolution de la carbonatation du mortier (MPV30) à différentes échéances.

Le suivi a montré un faible niveau de carbonatation durant les premières semaines pour les (16) seize formulations de mortiers. Les épaisseurs carbonatées relevées sur les échantillons sont de l'ordre de quelques millimètres, cela s'explique par le processus de carbonatation qui ne démarre qu'après la période de prise, impliquant le séchage et le retrait du mélange de mortier frais. Cette période permet la formation d'espace ouvert qui va aider au déroulement de la réaction de carbonatation de la surface du matériau vers l'intérieur en cinq (5) étapes (Silva *et al.*, 2021 ; Van Balen & Van Gemert, 1994 ; Cizer *et al.*, 2012) : premièrement la diffusion du gaz CO_2 à travers les pores ouverts, ensuite la dissolution du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans l'eau interstitielle libérant des ions de Ca^{2+} et OH^- , l'étape suivante consiste en l'absorption et dissolution du CO_2 dans l'eau interstitielle pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3), suivi de la dissociation en ions de bicarbonate (HCO_3^-) et carbonate (CO_3^{2-}), et enfin la réaction entre les ions Ca^{2+} et (CO_3^{2-}) formant du CaCO_3 . De toutes ses étapes la troisième est celle qui contrôle la vitesse de la réaction de carbonatation globale et de ce fait, cette étape est considérée comme la plus lente (Cizer, 2016).

Toujours sur la figure 4.14, on observe le développement de ce qu'on appelle « des anneaux de Liesegang ». Le développement des anneaux de Liesegang dans les mortiers de chaux carbonatés commence par la dissolution du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et la diffusion du CO_2 (Lawrence, 2006). La carbonatation ne progresse pas de façon linéaire, le CaCO_3 se concentre plus à la surface, à certaines distances que d'autre donnant ainsi lieu à la formation des anneaux de Liesegang (Lawrence, 2006 ; Rodriguez-Navarro *et al.*, 2002 ; Rodriguez, 2020). Les anneaux observés sont de formes et motifs différents pour chaque type d'addition, ce qui est relativement courant. Généralement les anneaux observés sont sous formes de cercles, bandes, sphères, voir mêmes en spirales (Muller *et al.*, 1982). Les parties carbonatées s'élargissent proportionnellement au taux de substitution.

La figure 4.15 ci-après, présente les mortiers avec les trois additions pour le même taux de substitution de 30%, en plus du mortier témoin. Le front de carbonatation du mortier (MBD30) est le plus développé à 180 jours par rapport aux mortiers (MR), (MPV30) et (MK30). Cette différence s'explique par le fait que ce mortier a la plus grande porosité. L'évolution du front de carbonatation est liée à la diffusion, attribuée au système poreux (Bulut, 2010).

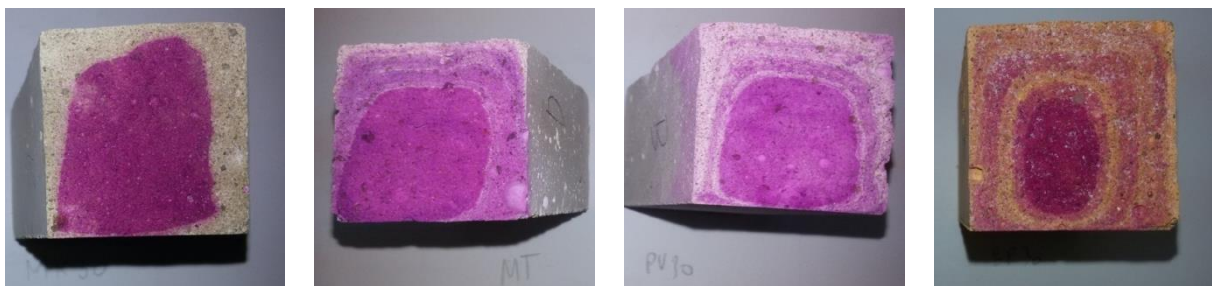


Figure 4.15. Front de carbonatation des mortiers (MT), (MPV30), (MPB30) et (MK30).

Si on relie la carbonatation, la porosité ouverte, et la résistance mécanique, on peut conclure que le processus de durcissement des mortiers avec de la poudre de verre (MPV) se produit par des réactions pouzzolaniques, alors que le processus de durcissement des mortiers avec de

la poudre de brique (MPB) et les mortiers avec du métakaolin (MK) se produit avec une carbonatation combinée aux réactions pouzzolaniques.

3. CONCLUSION

Le but principal de ce chapitre est de proposer, une recette de mortier appropriée à la restauration des murs du théâtre régional de Skikda. Sachant que la seule chaux éteinte locale disponible localement est la chaux aérienne, raison pour laquelle, nous avons opté pour l'incorporation d'additions pouzzolaniques sous différents taux de substitution.

La poudre de verre, la poudre de brique et le métakaolin ont été substitués à la chaux aérienne, afin d'évaluer leur influence et le potentiel pouzzolanique sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers élaborés. En plus leur utilisation dans le domaine de la construction vise aussi sa valorisation dans les mortiers de réhabilitation du vieux bâti, et dans la restauration du patrimoine architecturale en général.

A partir des résultats de cette campagne expérimentale présentée dans ce chapitre, les conclusions suivantes ont pu être tirées:

- La poudre de verre et la poudre de brique ont réduit la quantité d'eau nécessaire pour une bonne maniabilité, quant au métakaolin, il a une demande en eau identique à celle de la chaux.
- L'influence des trois additions sur le temps de prise est positive, même si au début de prise on n'a pas enregistré d'amélioration, le temps de fin de prise s'est vu réduire notamment pour les mortiers au métakaolin.
- En termes de résistance mécanique (flexion et compression), les trois additions ont amélioré les performances mécaniques tout au long des différentes échéances. Les trois additions ont un double effet : grâce à leurs fines particules ils ont un effet de remplissage combiné à la réaction pouzzolanique avec la chaux produisant des C-S-H. Les résistances ont augmenté proportionnellement avec les taux de substitution. Les meilleures résistances ont été enregistrées à 560 jours par le mortier (MK25), suivi du mortier (MPV30) et (MPB30).
- Concernant la porosité ouverte, la poudre de brique et le métakaolin ont augmenté la porosité des mélanges, alors que la poudre de verre a réduit le taux de porosité. Les mortiers (MPV) sont plus compacts que le reste des mortiers, mais globalement cette différence n'est pas très significative.
- L'effet des additions sur l'absorption par capillarité est bénéfique pour les trois additions ou elle s'est vu réduire pour tous les mélanges par rapport au mortier témoin. Cette réduction est observée à 56 jours. Cependant, à 565 jours, le mortier témoin enregistre le plus faible coefficient de capillarité, ce qui le classe comme le mortier le moins absorbant.
- Le processus de carbonatation est plus important pour les mortiers à base de poudre de brique, mais on ne peut pas relier entièrement la carbonatation aux résistances mécaniques.
- L'influence des poudres de verre, de brique, et de métakaolin sur les mortiers à base de chaux aérienne est bénéfique pour les propriétés mécaniques et physiques,

cependant une étude de durabilité est nécessaire pour aboutir à une recette adaptée aux travaux de restaurations et de réhabilitations du vieux bâti.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce travail est de proposer des mortiers à base de chaux locale et d'additions pouzzolaniques facilement disponibles dans la nature, pour être utilisés dans le cadre de la restauration du patrimoine bâti ancien. En plus de remplir les critères de résistance mécanique et des propriétés physiques des mortiers, la substitution de la chaux aérienne par la poudre de verre, la poudre de brique, et le métakaolin présente une bonne alternative environnementale, de par l'intégration du recyclage des bouteilles de verres et des déchets de briques pour les travaux de restauration du patrimoine bâti.

L'élaboration des mortiers d'étude s'est appuyée sur un cas d'étude : le théâtre régional de Skikda et cela, dans le but d'assurer la compatibilité qui représente le critère le plus important des mortiers de restauration des édifices historiques.

Une connaissance de la nature du tissu d'origine s'est avéré être nécessaire et c'est dans ce sens, que nous avons orientés nos recherches, pour créer un fonds documentaire exhaustif effectuée par :

- Des recherches de différentes sources documentaires et collecte de données concernant les techniques et matériaux de constructions, ainsi que les éventuelles opérations antérieures entreprises,
- Note descriptive du théâtre,
- Diagnostic et constatations des différentes pathologies, dont souffre l'édifice,
- Analyses d'échantillons au laboratoire pour la détermination de la nature des constituants des mortiers d'origine, ainsi que les facteurs de leurs dégradations.

Des dégradations (moisissures, végétations, salpêtres, pourriture du bois et salissures) de diverses natures ont été détectées lors de la visite du théâtre. Les principales causes soupçonnées étaient l'humidité et la pollution atmosphérique. Afin de confirmer ses hypothèses, des analyses sur cinq (5) échantillons prélevés de l'édifice in-situ ont été analysés au laboratoire. Les résultats obtenus ont révélé que le mortier prélevé du sous-sol (temple romain) est un mortier de chaux qui se compose uniquement de chaux et de sable, alors que le reste des mortiers, qui en plus de la chaux, contiennent de l'halite et du gypse qu'on peut observer principalement dans les milieux pollués, urbains, humides et éventuellement près de la mer.

Seize (16) formulations ont été proposées, le premier mélange composé uniquement de chaux aérienne et de sable était pris comme mortier témoin, pour comparer l'effet de la substitution de la chaux par les trois (3) pouzzolanes artificielles choisis dans cette étude. La poudre de verre, poudre de brique et métakaolin ont été substitué à la chaux à 10, 15, 20, 25 et 30%. Après leur caractérisation, leurs influences sur les propriétés mécaniques et physiques des

mortiers furent évaluées, à travers différents essais et procédures expérimentales présentées en détails dans le troisième chapitre.

Les résultats obtenus de l'étude comparative des mortiers sont résumés comme suit :

- Le mortier témoin à base de chaux aérienne a enregistré le plus long temps de prise, et les plus faibles résistances mécaniques tout au long des essais, cependant et malgré ses faibles valeurs, ce mortier témoin remplit les recommandations établies pour les mortiers destinés à la restauration du patrimoine ainsi que la réhabilitation du vieux bâti. La chaux éteinte locale peut être utilisée pour les travaux de restauration du patrimoine bâti,
- La quantité d'eau nécessaire à une bonne maniabilité (étalement de 150 cm à la table à secousses) s'est vu réduite pour les mortiers à base de poudre de verre et poudre de brique, alors que le métakaolin présente la même demande d'eau que la chaux,
- Les trois additions ont clairement amélioré les résistances mécaniques des mortiers élaborés en flexion et compression. Cette augmentation des résistances est proportionnelle à l'augmentation du taux de substitution pour la poudre de brique et la poudre de verre qui ont enregistré les résistances les plus élevées pour les mortiers (MPV30) et (MPB30). Quant au métakaolin, il a donné les meilleures résistances avec des valeurs qui atteignent 3.49 MPA pour la flexion et 7.39 MPA pour la compression, confirmant ainsi que le métakaolin obtenue de la calcination du Kaolin DD3 présente une haute réactivité pouzzolanique,
- Le module d'élasticité dynamique E obtenu pour toutes les formulations convient aux travaux de restauration des bâtiments anciens, garantissant la souplesse des mortiers et la capacité à absorber les différentes déformations et variations subit par le support d'origine.
- Concernant les propriétés hydriques appréciées par l'absorption capillaire, les additions ont réduit le coefficient d'absorption par rapport au mortier témoin, néanmoins cette influence n'est plus significative à long terme où le mortier témoin devient le mortier le moins absorbant,
- La porosité ouverte est légèrement réduite pour les mortiers avec poudre de verre, et élevée pour les mortiers avec poudre de brique. Les mortiers avec métakaolin gardent pratiquement la même porosité que le mortier témoin.

Les mortiers obtenus ont été caractérisés à long terme pour évaluer leur longévité mécanique et physique, la caractérisation des mortiers du support d'origine a été décisive pour la justification du choix des matériaux. De surcroit, il est nécessaire d'étudier la durabilité des mortiers élaborés par rapport aux propriétés physico-chimiques et thermiques. Les points les plus importants seront présentés dans la partie de perspective ci-dessous.

Perspectives

Il serait intéressant d'envisager les perspectives suivantes afin de compléter d'une manière significative cette étude :

- Affiner l'étude des propriétés hydriques avec l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau, sachant que la plupart des édifices historiques souffrent des dégradations due à l'humidité,
- Evaluer la durabilité des mortiers par d'éventuels essais d'attaque des sels, cycle séchage-mouillage, et résistance au gel-dégel,
- Appliquer les mortiers sur des supports différents et évaluer l'adhésion par des essais d'arrachement,
- Utiliser le Microscope Electronique à Balayage pour évaluer le système poreux.

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

Références bibliographiques

A

Aalil, I. (2017). *Contribution à l'étude du patrimoine bâti. Méthodes de diagnostic des pathologies des structures et moyens de restauration: Etude de cas. Site archéologique Volubilis au Maroc* (Doctoral dissertation, Orléans).

Aalil, I., Badreddine, D., Beck, K., Brunetaud, X., Cherkaoui, K., Chaaba, A., & Al-Mukhtar, M. (2019). Valorization of crushed bricks in lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 226, 555-563.

Adam, J. P. (2005). *La construction romaine: matériaux et techniques (p. 9)*. Editions A. et J. Picard.

AFPC-AFREM. (1997). Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », Toulouse.

Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2011). Properties of lime–metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*, 53(1), 15-19.

Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2019). Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. *Co*

Aggelakopoulou, E., Ksinopoulou, E., & Eleftheriou, V. (2022). Evaluation of mortar mix designs for the conservation of the Acropolis monuments. *Journal of Cultural Heritage*, 55, 300-308. *nstruction and Building Materials*, 225, 633-641.

Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Aboshama, A. Y. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866-877.

Ali-Boucetta, T. (2014). *contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat de l'Université Badji Mokhtar-Annaba).

Ali-Boucetta, T., Behim, M., Cassagnabere, F., Mouret, M., Ayat, A., & Laifa, W. (2021). Durability of self-compacting concrete containing waste bottle glass and granulated slag. *Construction and Building Materials*, 270, 121133.

Al-Omari, A., Beck, K., Brunetaud, X., & Al-Mukhtar, M. (2015). Weathering of limestone on Al-Ziggurat walls in the ancient Al-Nimrud city (Iraq). *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 609-620.

Andrejkovičová, S., Velosa, A. L., & Rocha, F. (2013). Air lime–metakaolin–sepiolite

mortars for earth based walls. *Construction and Building Materials*, 44, 133-141.

Andrejkovičová, S., Velosa, A. L., Ferraz, E., & Rocha, F. (2014). Influence of clay minerals addition on mechanical properties of air lime–metakaolin mortars. *Construction and Building Materials*, 65, 132-139.

Arandigoyen, M., Bernal, J. P., López, M. B., & Alvarez, J. I. (2005). Lime-pastes with different kneading water: pore structure and capillary porosity. *Applied Surface Science*, 252(5), 1449-1459.

Apostolopoulou, M., Aggelakopoulou, E., Siouta, L., Bakolas, A., Douvika, M., Asteris, P. G., & Moropoulou, A. (2017). A methodological approach for the selection of compatible and performable restoration mortars in seismic hazard areas. *Construction and Building Materials*, 155, 1-14.

Apostolopoulou, M., Bakolas, A., & Kotsainas, M. (2021). Mechanical and physical performance of natural hydraulic lime mortars. *Construction and Building Materials*, 290, 123272.

Arizzi, A., & Cultrone, G. (2012). Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: A mineralogical, textural and physical-mechanical study. *Construction and Building Materials*, 31, 135-143.

Arizzi, A., Viles, H., & Cultrone, G. (2012). Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings. *Construction and Building Materials*, 28(1), 807-818.

Ayat, A. (2015). Contribution à l'élaboration et la caractérisation d'un Eco-mortier d'enduit à base de chaux et déchets de briques pour la réhabilitation du vieux bâti

B

Badreddine-Bessa, A. (2004). *Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers* (Doctoral dissertation, Cergy-Pontoise).

Bakolas, A., Aggelakopoulou, E., Moropoulou, A., & Anagnostopoulou, S. (2006). Evaluation of pozzolanic activity and physicommechanical characteristics in metakaolin-lime pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 84(1), 157-163.

Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A., & Zendri, E. (1998). Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis. *Thermochimica Acta*, 321(1-2), 151-160.

Balen, K. V., Bicer Simsir, B., Binda, L., Bläuer, C., Elsen, J., Groot, C., ... & Waldum, A. (2016). Repair Mortars for Historic Masonry-State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC 203-RHM.

Beck, K., & Al-Mukhtar, M. (2010). Weathering effects in an urban environment: a case study of tuffeau, a French porous limestone. *Geological Society, London, Special*

Publications,331(1), 103-111.

Bertrand, L. (1903). *Histoire de philippeville 1838-1093, imprimerie administrative et commerciale moderne*, 18 rue Théophile Réguis, 18, France.

Binda, L., Saisi, A., & Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building materials*, 14(4), 199-233.

Borges, C., Silva, A. S., & Veiga, R. (2010). Ancient mortars under action of marine environment: a physico-chemical characterization. In *2nd Conference of Historic Mortars-HCM*(pp. 29-41).

Borsoi, G., Tavares, M., Veiga, R., & Silva, A. S. (2012). Microstructural characterization of consolidant products for historical renders: an innovative nanostructured lime dispersion and a more traditional ethyl silicate limewater solution. *Microscopy and Microanalysis*, 18(5), 1181-1189.

Boothby, T. E., & Rosson, B. T. (1999). Elasto-plastic Hardening and Shakedown of Masonry Arch Joints. *Meccanica*, 34, 71-84.

Bourezg, M. (2000). *Etude géologique et minière de quelques roches industrielles. Cas d'applications dans le Nord-est Algérien* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat en sciences Géologiques, option géologie minière, Algérie).

Brandi, C. (2021). *Théorie de la restauration*. Éditions Allia.

Brimblecombe, P. (2000). Air pollution and architecture: Past, present and future. *Journal of Architectural Conservation*,6(2), 30-46.

Bulut, Ü. (2010). Use of perlite as a pozzolanic addition in lime mortars. *Gazi university journal of science*, 23(3), 305-313.

Bureau Veritas. (2012). *La technique du bâtiment existant*. Editions Le Moniteur.

C

Callebaut, K., & Van Balen, K. (2000). Dry-slaked lime: an alternative binder for restoration mortars. In *1st International workshop on Urban Heritage and Building Maintenance VII-Maintenance and strengthening of materials and structures: Plaster* (pp. 65-72). Zurich.

Callebaut, K., Elsen, J., Van Balen, K., & Viaene, W. (2001). Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium): Natural hydraulic lime or cement?. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 397-403.

Cardell, C., Delalieux, F., Roumpopoulos, K., Moropoulou, A., Auger, F., & Van Grieken, R. (2003). Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France. *Construction and building materials*, 17(3), 165-179.

Cardoso, D., Gameiro, A., Santos-Silva, A., Faria, P., Vieira, R., Veiga, R., & Velosa, A. (2013). Influence of curing conditions in lime-metakaolin blended mortars—A mineralogical and mechanical study. In *HMC2013—Historic Mortars Conference*(p. CD). Historic Mortars

Conference.

Carrington, D., & Swallow, P. (1996). Limes and lime mortars—part two. *Journal of Architectural Conservation*, 2(1), 7-22.

Casadio, F., Chiari, G., & Simon, S. (2005). Evaluation of binder/aggregate ratios in archaeological lime mortars with carbonate aggregate: a comparative assessment of chemical, mechanical and microscopic approaches. *Archaeometry*, 47(4), 671-689.

Černý, R., Kunca, A., Tydlitát, V., Drchalová, J., & Rovnaníková, P. (2006). Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. *Construction and Building Materials*, 20(10), 849-857.

Charola, A. E., Pühringer, J., & Steiger, M. (2007). Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials. *Environmental geology*, 52(2), 339-352.

Chiaverini, J. (2004). Metakaolin–lime mortars: a replica of Genoese ‘porcellana’ as a mortar for restoration. In *Proceedings of the second Swiss Geoscience Meeting, Lausanne*.

Cizer, Ö. (2016). Thematic Keynote Lime mortars in heritage: Fundamental insights into carbonation reaction and its biocatalization. In *Structural analysis of historical constructions: anamnesis, diagnosis, therapy, controls* (pp. 67-74). CRC Press.

Cizer, Ö., Rodriguez-Navarro, C., Ruiz-Agudo, E., Elsen, J., Van Gemert, D., & Van Balen, K. (2012). Phase and morphology evolution of calcium carbonate precipitated by carbonation of hydrated lime. *Journal of Materials Science*, 47(16), 6151-6165.

Claude, J. (1990). *La chaux: ses utilisations*. Ed. Nathan Communication.

Coutelas, A (2005). *Le mortier de chaux*. Éditions errance, Paris.

Coutinho, M. L., Miller, A. Z., & Macedo, M. F. (2015). Biological colonization and biodeterioration of architectural ceramic materials: An overview. *Journal of Cultural Heritage*, 16(5), 759-777.

EN, N. (1936). Natural Stone Test Methods Determination of Real Density and Apparent Density, and of Total and Open Porosity. 2008. *Ankara: TSE*.

D

Doehne, E. (2002). Salt weathering: a selective review. *Geological society, London, special publications*, 205(1), 51-64.

Do Rosário Veiga, M., Fragata, A., Velosa, A. L., Magalhães, A. C., & Margalha, G. (2010). Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 4(2), 177-195.

E

Ecole d'Avignon. (2003). *Techniques et pratique de la chaux*. Editions Eyrolles.

Edwards, D. D., Allen, G. C., Ball, R. J., & El-Turki, A. (2007). Pozzolan properties of

glass fines in lime mortars. *Advances in Applied Ceramics*, 106(6), 309-313.

EN933-1. (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.

F

Faria, P., & Martins, A. (2013). Influence of air lime type and curing conditions on lime and lime-metakaolin mortars. In *Durability of Building Materials and Components* (pp. 105-126). Springer, Berlin, Heidelberg.

Faria, P., Henriques, F., & Rato, V. (2008). Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 9(3), 338-346.

Fragata, A., & Veiga, R. (2010). Air lime mortars: the influence of calcareous aggregate and filler addition. In *Materials Science Forum* (Vol. 636, pp. 1280-1285). Trans Tech Publications Ltd.

G

Gameiro, A., Silva, A. S., Faria, P., Grilo, J., Branco, T., Veiga, R., & Velosa, A. (2014). Physical and chemical assessment of lime–metakaolin mortars: Influence of binder: aggregate ratio. *Cement and Concrete Composites*, 45, 264-271.

Garijo, L., Zhang, X., Ruiz, G., & Ortega, J. J. (2020). Age effect on the mechanical properties of natural hydraulic and aerial lime mortars. *Construction and Building Materials*, 236, 117573.

Gazulla, M. F., Sánchez, E., González, J. M., Portillo, M. C., & Orduna, M. (2011). Relationship between certain ceramic roofing tile characteristics and biodeterioration. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(15), 2753-2761.

Giebeler, G., Fisch, R., Krause, H., & Musso, F. (2012). *Rénover le bâti*. PPUR Presses polytechniques.

Gonçalves, T. C. D. (2007). *Salt crystallization in plastered or rendered walls* (Doctoral dissertation, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal)).

Groot, C. J. W. P., Ashall, G. J., Hughes, J. J., & Bartos, P. J. (2007). Characterisation of old mortars with respect to their repair: A state of the art. *RILEM REPORT*, 28, 1.

GROS, Pierre. (1996). L'architecture romaine: du début du III^e siècle av. J.-C. à la fin du Haut-Empire.

H

Hall, C., & Tse, T. K. M. (1986). Water movement in porous building materials—VII. The sorptivity of mortars. *Building and environment*, 21(2), 113-118.

Hansen, E. F., Rodríguez-Navarro, C., & Balen, K. (2008). Lime putties and mortars. *Studies in conservation*, 53(1), 9-23.

Henriques, F. M. (2005). Challenges and perspectives of replacement mortars in architectural conservation. In *International workshop. Repair mortars for historic masonry*, Rilem technical Committee, TU Delft (pp. 26-28).

Hermo, B. S., Lamas, B. P., Brea, T. R., & Pardo, L. P. (2010). Gypsum-induced decay in granite monuments in Northwestern Spain. *Materiales de Construcción*, 60(297), 97-110.

Holmes, S., & Wingate, M. (1997). Building with lime. *A practical introduction*.

Hudson, B. (1999). Modification to the fine aggregate angularity test. In *Proceedings, seventh annual international center for aggregates research symposium, Austin, TX*.

Hughes, J. J., & Callebaut, K. (2002). In-situ visual analysis and practical sampling of historic mortars. *Materials and structures*, 35(2), 70-75.

Hughes, J. J., & Válek, J. (2003). *Mortars in historic buildings: a review of the conservation, technical and scientific literature*. Historic Scotland.

I

ICOMOS, (1964). *Charte Internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites*, Venise.

J

Janvier-Badosa, S., Beck, K., Brunetaud, X., & Al-Mukhtar, M. (2013). Historical study of Chambord Castle: basis for establishing the monument health record. *International Journal of Architectural Heritage*, 7(3), 247-260.

Jesus, S., Maia, C., Farinha, C. B., de Brito, J., & Veiga, R. (2019). Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 229, 116844.

Joffroy, P. (1999). *La réhabilitation des bâtiments: conserver, améliorer, restructurer les logements et les équipements*.

K

Khmiri, A., Chaabouni, M., & Samet, B. (2013). Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and building materials*, 44, 74-80.

Kloppmann, W., Bromblet, P., Vallet, J. M., Vergès-Belmin, V., Rolland, O., Guerrot, C., & Gosselin, C. (2011). Building materials as intrinsic sources of sulphate: A hidden face of salt weathering of historical monuments investigated through multi-isotope tracing (B, O, S). *Science of the total environment*, 409(9), 1658-1669.

L

Lanas, J., & Alvarez-Galindo, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and concrete research*, 33(11), 1867-1876.

Lanas, J., Arandigoyen, M., Alvarez, J. I., Bernal, J. P., & Bello, M. A. (2004). Mechanical behavior of masonry repair mortars: aerial and hydraulic lime-based mixtures. *Proc. 10th Int. Congr. Deterior. Conserv. Stone*.

Lawrence, R. M. H. (2006). A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars.

Lefèvre, R. A., & Ausset, P. (2002). Atmospheric pollution and building materials: stone and glass. *Geological Society, London, Special Publications*, 205(1), 329

Loureiro, A. M. S., da Paz, S. P. A., do Rosário Veiga, M., & Angélica, R. S. (2020). Investigation of historical mortars from Belém do Pará, Northern Brazil. *Construction and Building Materials*, 233, 117284.

Lubelli, B., van Hees, R. P., & Nijland, T. G. (2014). Salt crystallization damage: how realistic are existing ageing tests. In *Proceedings of the international conference on ageing of materials and structures, Delft* (pp. 103-111).

M

M.R. Labiadh, M. benOuedou, R. El Mensi. (2007). *Propriétés physico-mécaniques de mortiers d'enduit de restauration à base de chaux aérienne et pouzzolanes artificielles*. 5^{eme} congrès arabe des sciences des matériaux ACMS V. Gabès, Tunisie.

Manita, P., & Triantafillou, T. C. (2011). Influence of the design materials on the mechanical and physical properties of repair mortars of historic buildings. *Materials and structures*, 44, 1671-1685.

Marinowitz, C., Neuwald-Burg, C., & Pfeifer, M. (2012). Historic documents in understanding and evaluation of historic lime mortars. In *Historic Mortars* (pp. 15-24). Springer, Dordrecht.

Marques, A. I., Morais, J., Morais, P., do Rosário Veiga, M., Santos, C., Candeias, P., & Ferreira, J. G. (2020). Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses. *Construction and Building Materials*, 232, 117216.

Marques, S. F., Ribeiro, R. A., Silva, L. M., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A. (2006). Study of rehabilitation mortars: Construction of a knowledge correlation matrix. *Cement and concrete research*, 36(10), 1894-1902.

Martinez-Ramirez, S., & Thompson, G. E. (1999). Degradation of lime-pozzolan mortar exposed to dry deposition of SO₂ pollutant gas: Influence of curing temperature. *Materials and Structures*, 32(5), 377-382.

Martinez-Ramirez, S., Puertas, F., Blanco-Varela, M. T., & Thompson, G. E. (1997). Studies on degradation of lime mortars in atmospheric simulation chambers. *Cement and Concrete Research*, 27(5), 777-784.

Matias, G., Faria, P., & Torres, I. (2014). Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. *Construction and Building Materials*, 73, 125-136.

Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2012). Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and building materials*, 36, 205-215.

- Merckx, B. (2013).** *Étude et modélisation des transferts hydriques et thermiques au sein des matériaux inorganiques poreux: application aux matériaux du patrimoine bâti ancien, exemple de l'Hypogée des Dunes à Poitiers et de la crypte de l'abbatiale de Saint-Savin-sur-Gartempe* (Doctoral dissertation, Université de Poitiers).
- Middendorf, B., Hughes, J. J., Callebaut, K., Baronio, G., & Papayianni, I. (2005).** Investigative methods for the characterisation of historic mortars—part 1: mineralogical characterisation. *Materials and Structures*, 38(8), 761-769.
- Monteiro, J., Silva, V., & Faria, P. (2021).** Effect of Type of Curing and Metakaolin Replacement on Air Lime Mortars for the Durability of Masonries. *Infrastructures*, 6(10), 143.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., & Anagnostopoulou, S. (2005).** Composite materials in ancient structures. *Cement and concrete composites*, 27(2), 295-300.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., & Bisbikou, K. (1995).** Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques. *thermochimica acta*, 269, 779-795.
- Moropoulou, A., Cakmak, A. S., Biscontin, G., Bakolas, A., & Zendri, E. (2002).** Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Construction and building materials*, 16(8), 543-552.
- Moropoulou, A., Cakmak, A., Labropoulos, K. C., Van Grieken, R., & Torfs, K. (2004).** Accelerated microstructural evolution of a calcium-silicate-hydrate (CSH) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 1-6.
- Moropoulou, A., Polikreti, K., Bakolas, A., & Michailidis, P. (2003).** Correlation of physicochemical and mechanical properties of historical mortars and classification by multivariate statistics. *Cement and concrete research*, 33(6), 891-898.
- Moropoulou, A., Polikreti, K., Ruf, V., & Deodatis, G. (2003).** San Francisco Monastery, Quito, Equador: characterisation of building materials, damage assessment and conservation considerations. *Journal of Cultural Heritage*, 4(2), 101-108.
- Müller, S. C., Kai, S., & Ross, J. (1982).** Curiosities in periodic precipitation patterns. *Science*, 216(4546), 635-637.
- Müller, U., Miccoli, L., & Fontana, P. (2016).** Development of a lime based grout for cracks repair in earthen constructions. *Construction and Building Materials*, 110, 323-332.

N

- Navrátilová, E., & Rovnaníková, P. (2016).** Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building Materials*, 120, 530-539.
- NBN EN 1015-2. (2007).** Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 2 :

échantillonnage global des mortiers et préparation des mortiers pour essai

NBN EN 1015-3. (2007). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses)

Nežerka, V., Němeček, J., Slížková, Z., & Tesárek, P. (2015). Investigation of crushed brick-matrix interface in lime-based ancient mortar by microscopy and nanoindentation. *Cement and Concrete Composites*, 55, 122-128.

Nežerka, V., Slížková, Z., Tesárek, P., Plachý, T., Frankeová, D., & Petráňová, V. (2014). Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust. *Cement and concrete research*, 64, 17-29.

NF EN 15898. (2011). Conservation des biens culturels - Principaux termes généraux et définitions correspondantes.

NF EN 1936. (2007). Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouverte et totale.

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

NF EN 196-6. (2012). Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse

NF EN 459-1. (2012). Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité.

NF EN 459-2. (2010). Chaux de construction - Partie 2 : méthodes d'essai

NF P 15-431. (1994). Liants hydrauliques - Technique des essais - Détermination du temps de prise sur mortier normal.

Ngoma, A. M. (2009). *Characterisation and consolidation of historical lime mortars in cultural heritage buildings and associated structures in East Africa* (Doctoral dissertation, KTH).

O

Oates, J. A. (2008). *Lime and limestone: chemistry and technology, production and uses*. John Wiley & Sons.

Oliveira, R., De Brito, J., & Veiga, R. (2013). Incorporation of fine glass aggregates in renderings. *Construction and Building Materials*, 44, 329-341.

Ontiveros-Ortega, E., Rodríguez-García, R., González-Serrano, A., & Molina, L. (2018). Evolution of mechanical properties in aerial lime mortars of traditional manufacturing, the relationship between putty and powder lime. *Construction and Building Materials*, 191, 575-589.

P

Pachta, V., Konopisi, S., & Stefanidou, M. (2021). The influence of brick dust and crushed brick on the properties of lime-based mortars exposed at elevated temperatures. *Construction*

and *Building Materials*, 296, 123743.

Pachta, V., Tsardaka, E. C., & Stefanidou, M. (2021). The role of flame retardants in cement mortars exposed at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 273, 122029.

Papageorgiou, A., Tzouvalas, G., & Tsimas, S. (2005). Use of inorganic setting retarders in cement industry. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 183-189.

Papayianni, I., & Karaveziroglou, M. (1993). Aggregate gradation of ancient mortars. Relationship to strength and porosity. In *Conservation of stone and other materials: proceedings of the international RILEM/UNESCO congress held at the UNESCO headquarters, Paris, June 29-July 1, 1993* (pp. 493-500).

Papayianni, I., & Stefanidou, M. (2006). Strength–porosity relationships in lime–pozzolan mortars. *Construction and Building Materials*, 20(9), 700-705.

Papayianni, I., Pachta, V., & Stefanidou, M. (2013). Analysis of ancient mortars and design of compatible repair mortars: The case study of Odeion of the archaeological site of Dion. *Construction and Building Materials*, 40, 84-92.

Papayianni, I., Válek, J., Alvarez, J., Bokan Bosiljkov, V., Faria, P., Ferrara, L., ... & Stukovnik, P. (2019). Testing properties governing the durability of lime-based repair mortars. In *International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019) Durability, Monitoring and Repair of Structures* (Vol. 128, pp. 135-139). RILEM Publications SARL.

Pavlík, V., & Užáková, M. (2016). Effect of curing conditions on the properties of lime, lime–metakaolin and lime–zeolite mortars. *Construction and Building Materials*, 102, 14-25.

Philip, J. R. (1957). The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil science*, 84(3), 257

Podoba, R., Kaljuvee, T., Štubňa, I., Podobník, L., & Bačík, P. (2014). Research on historical bricks from a Baroque Church. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 118(2), 591-595.

Prikryl, R., SVOBODOVÁ, J., Zák, K., & Hradil, D. (2004). Anthropogenic origin of salt crusts on sandstone sculptures of Prague's Charles Bridge (Czech Republic) Evidence of mineralogy and stable isotope geochemistry. *European Journal of Mineralogy*, 16(4), 609-618.

R

Idir, R. (2011). Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. *SHERBROOKE*.

Rabehi, B. (2013). *Evaluation des propriétés réfractaires et cimentaires du kaolin de Djebel Debbagh* (Doctoral dissertation, Université de Boumerdès-M'hamed Bougara).

Ramezani pour, A. A. (2014). *Cement Replacement Materials*, Springer

Geochemistry/Mineralogy, vol. 10, p. 978-3.

Ransom, W. H. (2002). *Building failures: diagnosis and avoidance*. Routledge.

Riegl, A. (2003). Le culte moderne des monuments. *Le culte moderne des monuments*, 1-124.

Rodrigues, J. D. (2020). Practical evidence and experimental demonstration of the Liesegang phenomenon in the carbonation process of lime mortars in exposed masonries. *Journal of Cultural Heritage*, 45, 169-179.

Rodriguez-Navarro, C., Cazalla, O., Elert, K., & Sebastian, E. (2002). Liesegang pattern development in carbonating traditional lime mortars. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 458(2025), 2261-2273.

S

Sánchez-Moral, S., Luque, L., Canaveras, J. C., Soler, V., Garcia-Guinea, J., & Aparicio, A. (2005). Lime–pozzolana mortars in Roman catacombs: composition, structures and restoration. *Cement and concrete Research*, 35(8), 1555-1565.

Sand, W., & Bock, E. (1991). Biodeterioration of mineral materials by microorganisms—biogenic sulfuric and nitric acid corrosion of concrete and natural stone. *Geomicrobiology Journal*, 9(2-3), 129-138.

Santos, A. R., do Rosário Veiga, M., Silva, A. S., de Brito, J., & Álvarez, J. I. (2018). Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates. *Construction and Building materials*, 187, 907-922.

Scannell, S., Lawrence, M., & Walker, P. (2014). Impact of aggregate type on air lime mortar properties. *Energy Procedia*, 62, 81

Schueremans, L., Cizer, Ö., Janssens, E., Serré, G., & Van Balen, K. (2011). Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice. *Construction and building materials*, 25(12), 4338-4350.

Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., & Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 987-993.

Siddique, R., & Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43(3-4), 392-400.

Silva, B. A., Pinto, A. F., Gomes, A., & Candeias, A. (2021). Effects of natural and accelerated carbonation on the properties of lime-based materials. *Journal of CO2 Utilization*, 49, 101552.

Silva, J., De Brito, J. M. C. L., & Veiga, R. (2010). Recycled red-clay ceramic construction and demolition waste for mortars production. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(3), 236-244.

Silva, J., De Brito, J., & Veiga, R. (2009). Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*, 23(1), 556-564.

Stefanidou, M., & Papayianni, I. (2005). The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 27(9-10), 914-919.

T

Thiemann, L., Gerzer, S., & Kilian, R. (2010). Vitruvius and antique techniques of plaster work and painting. In *2nd Conference on Historic Mortars-HMC 2010 and RILEM TC 203-RHM final workshop* (pp. 754-760). RILEM Publications SARL.

Tidblad, J., Kucera, V., & Hamilton, R. (2009). *The effects of air pollution on cultural heritage* (Vol. 6, pp. 10-12). J. Watt (Ed.). Berlin, Germany:: Springer.

Torres, I., Matias, G., & Faria, P. (2020). Natural hydraulic lime mortars-The effect of ceramic residues on physical and mechanical behaviour. *Journal of Building Engineering*, 32, 101747.

U

UNE 83980. Durabilité de béton. Méthode d'essai. Détermination l'absorption d'eau, de la densité de l'eau, la porosité accessible à l'eau dans le béton.

V

Válek, J., & Veiga, R. (2005). Characterisation of mechanical properties of historic mortars—testing of irregular samples. *WIT Transactions on The Built Environment*, 83.

Van Balen, K., & Van Gemert, D. (1994). Modelling lime mortar carbonation. *Materials and structures*, 27(7), 393-398.

Van Balen, K., van Bommel, B., van Hunen, M., van Rhijn, J., van Rooden, M., & Fontes Salinas, C. (2015). *Le Livre de la chaux* (Vol. 16). Institut du Patrimoine wallon; Namur, Belgique.

Vavričuk, A., Bokan-Bosiljkov, V., & Kramar, S. (2018). The influence of metakaolin on the properties of natural hydraulic lime-based grouts for historic masonry repair. *Construction and Building Materials*, 172, 706-716.

Veiga, M. R., Aguiar, J., Silva, A. S., & Carvalho, F. (2001). Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings. In *Proceedings of the 3rd International Seminar Historical Constructions* (pp. 353-362). Guimarães, Portugal: University of Minho.

Veiga, R. (2017). Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review. *Construction and Building Materials*, 157, 132-140.

Vejmelková, E., Keppert, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P., & Černý, R. (2012). Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime–metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building materials*, 31, 22-28.

Vitruve, ML. (1999). *Les dix livres d'architecture corrigés et traduits en 1684 par Claude Perrault.* Edition Pierre Mardaga.

W

Willard, H. H., Merritt Jr, L. L., Dean, J. A., & Settle Jr, F. A. (1988). Instrumental methods of analysis.

Winkler, E. M. (1987). Weathering and weathering rates of natural stone. *Environmental Geology and Water Sciences*,9(2), 85-92.

Z

Zaouia, N., ELwartiti, M., & Baghdad, B. (2005). Superficial alteration and soluble salts in the calcarenite weathering. Case study of Almohade monuments in Rabat: Morocco. *Environmental Geology*, 48(6), 742-747.

ANNEXES

Annexe – A : Attestation des archives nationales d’outre-mer**ATTESTATION**

Direction générale
des patrimoines
Service interministériel
des archives de France

Archives nationales d'outre-mer

Affaire suivie par
Le Secrétariat
anom.aix@culture.gouv.fr

Référence :
ANOM 2018 / 444

29, chemin du Moulin de Testas
13090 Aix-en-Provence

Téléphone 04 42 93 38 50
Télécopie 04 42 93 38 89

Le directeur des Archives nationales d’outre-mer atteste que

Madame Amira AYAT
Doctorante
Université 20 août 1955
Skikda - Algérie

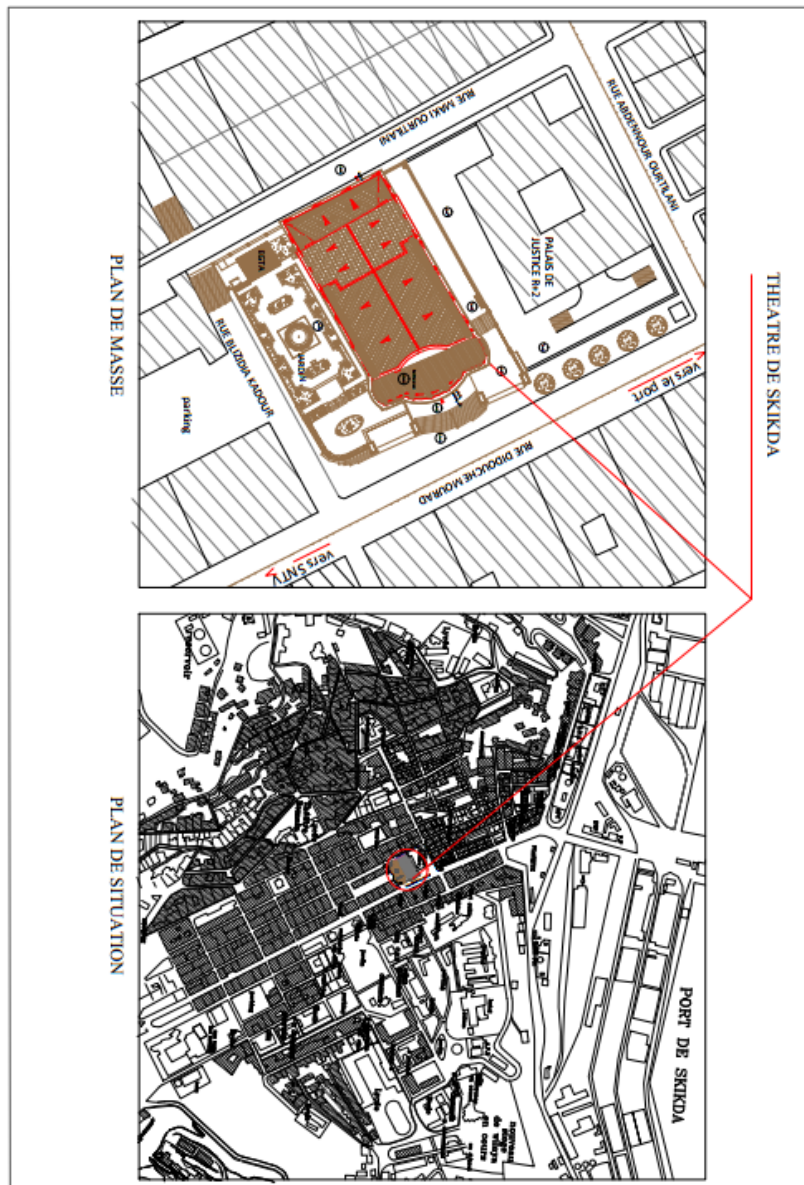
a été présente dans la salle de lecture des Archives le 23 janvier 2018 afin de consulter des dossiers sur l’Algérie nécessaires à son travail.

Fait à Aix-en-Provence, le 23 janvier 2018
Pour servir et valoir ce que de droit

Le directeur
des Archives nationales d’outre-mer

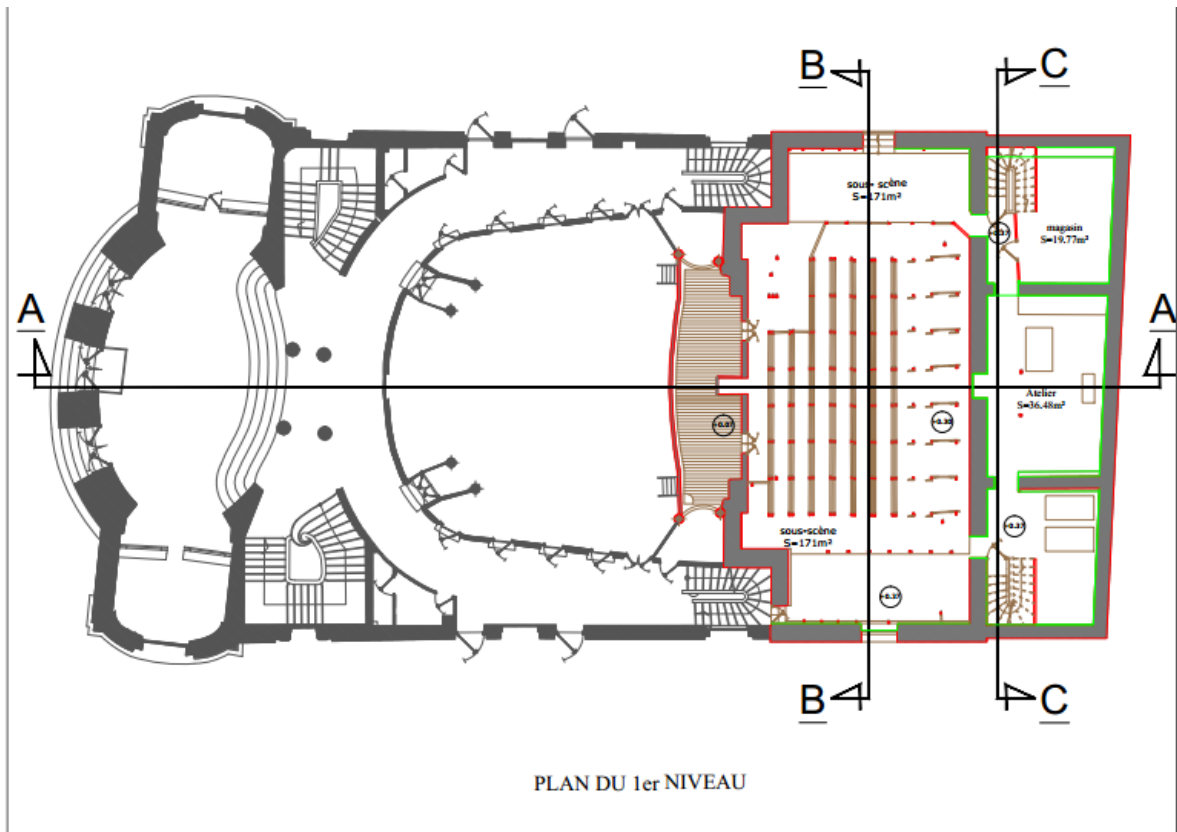
Benoît VAN REETH

Annexe – B : Plans et coupes du théâtre (source CTC)

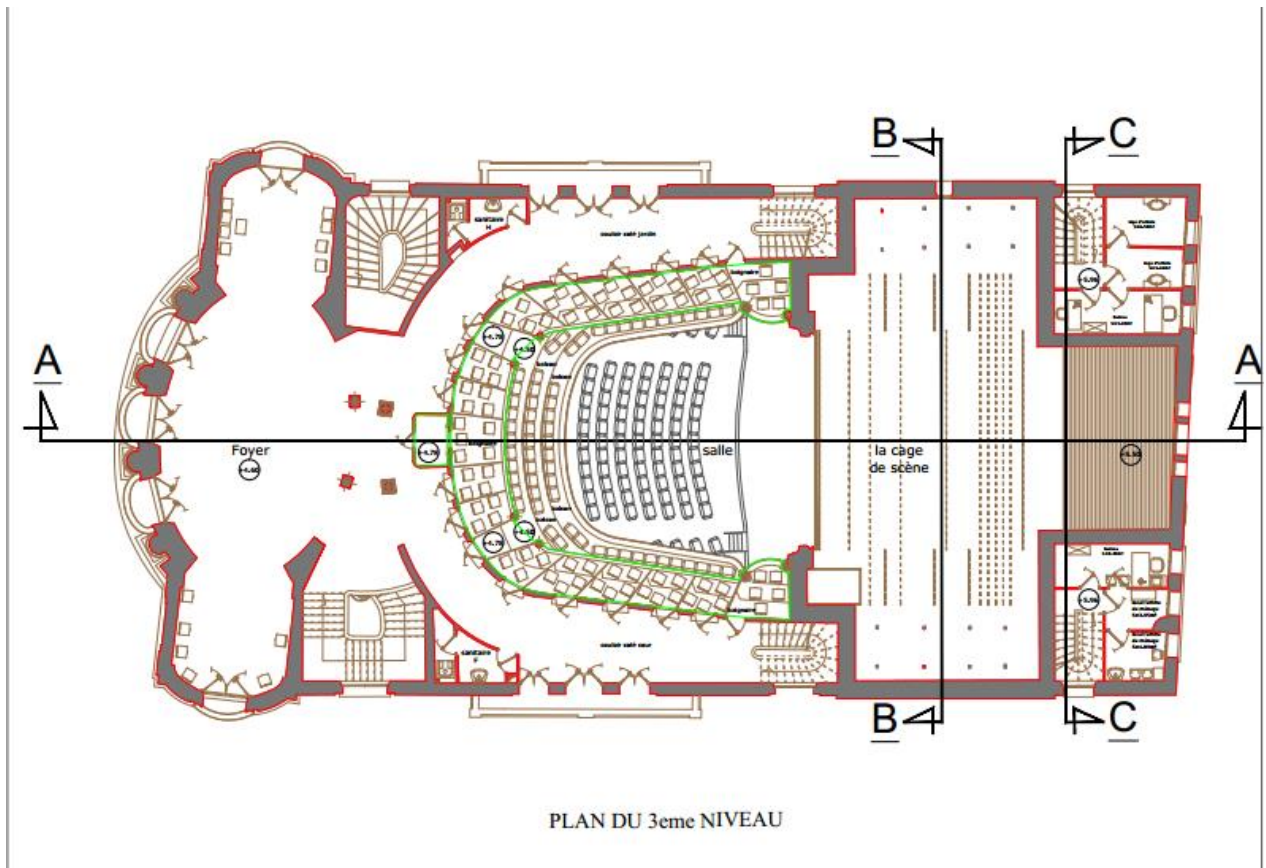
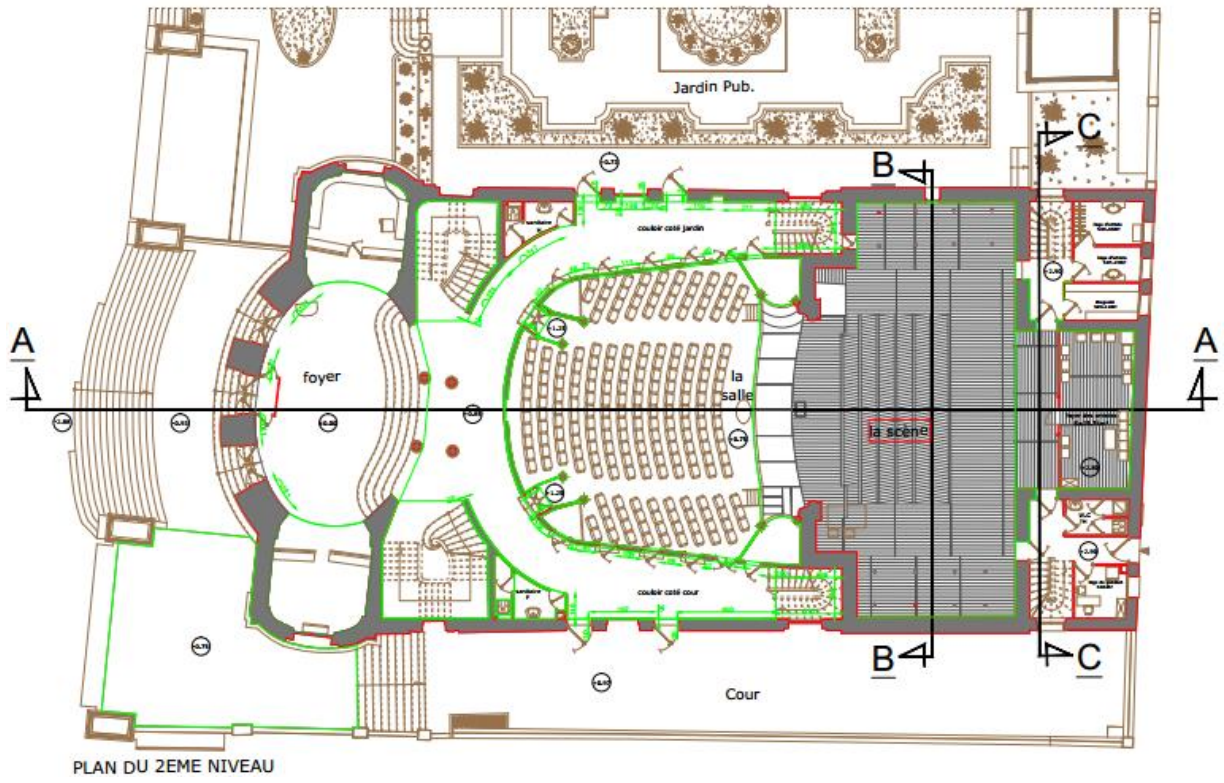


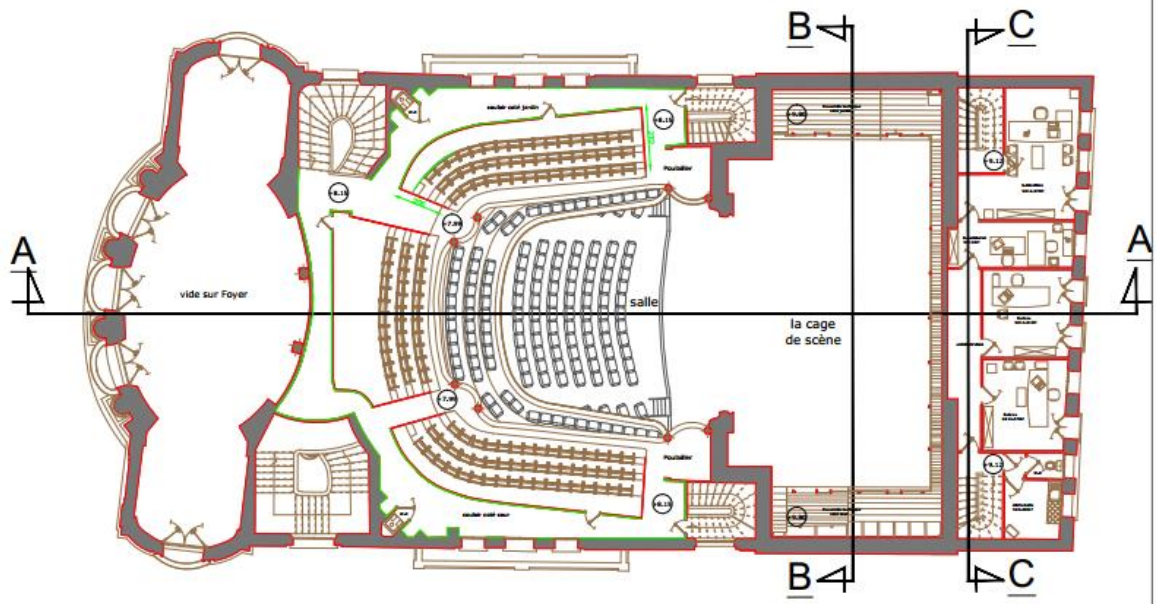


VUE EN PLAN

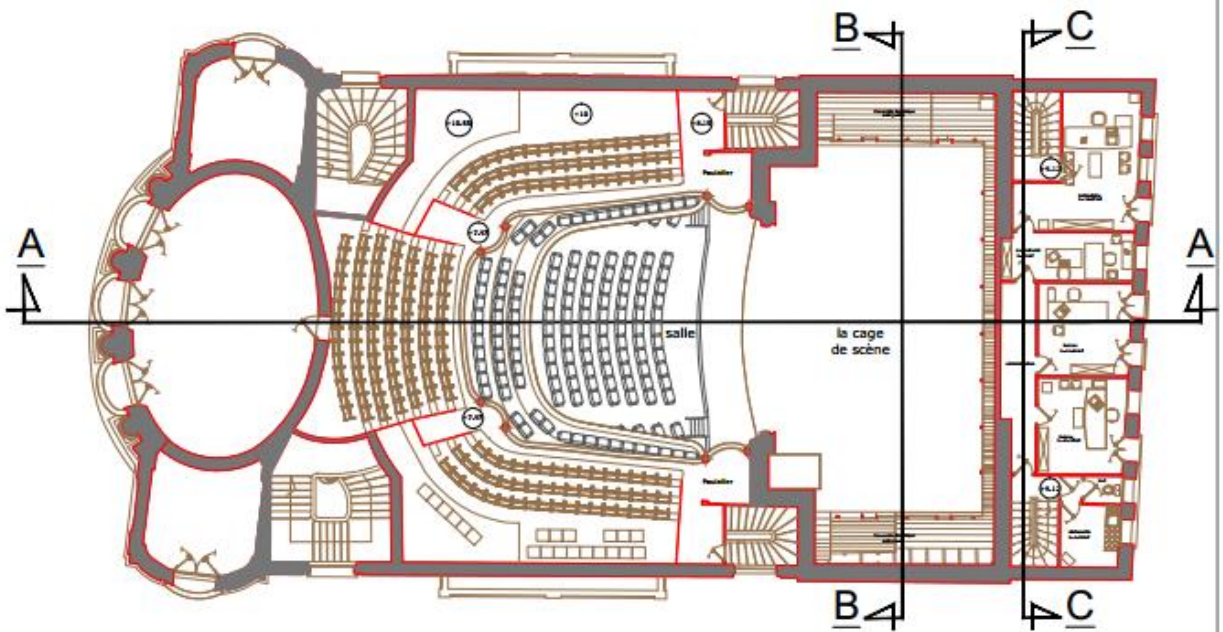


PLAN DU 1er NIVEAU

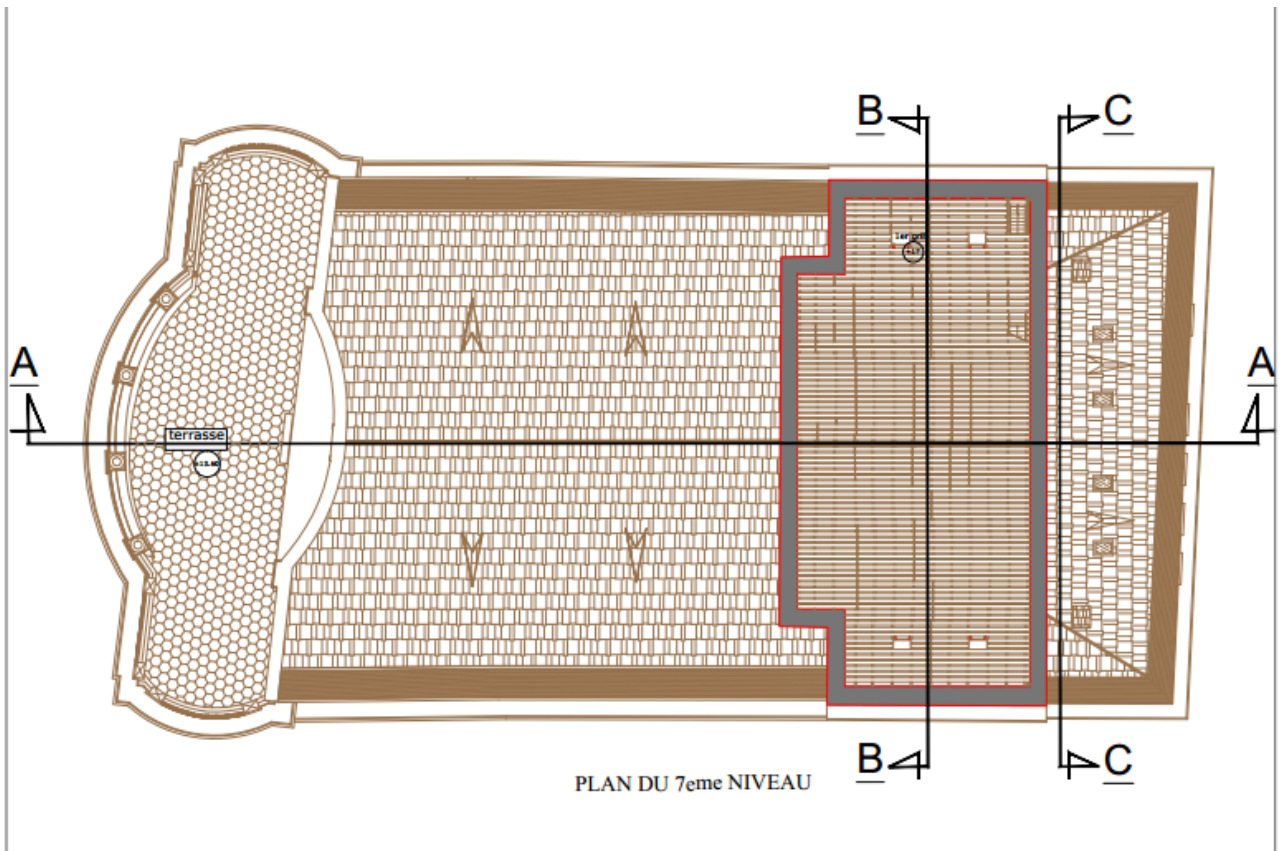
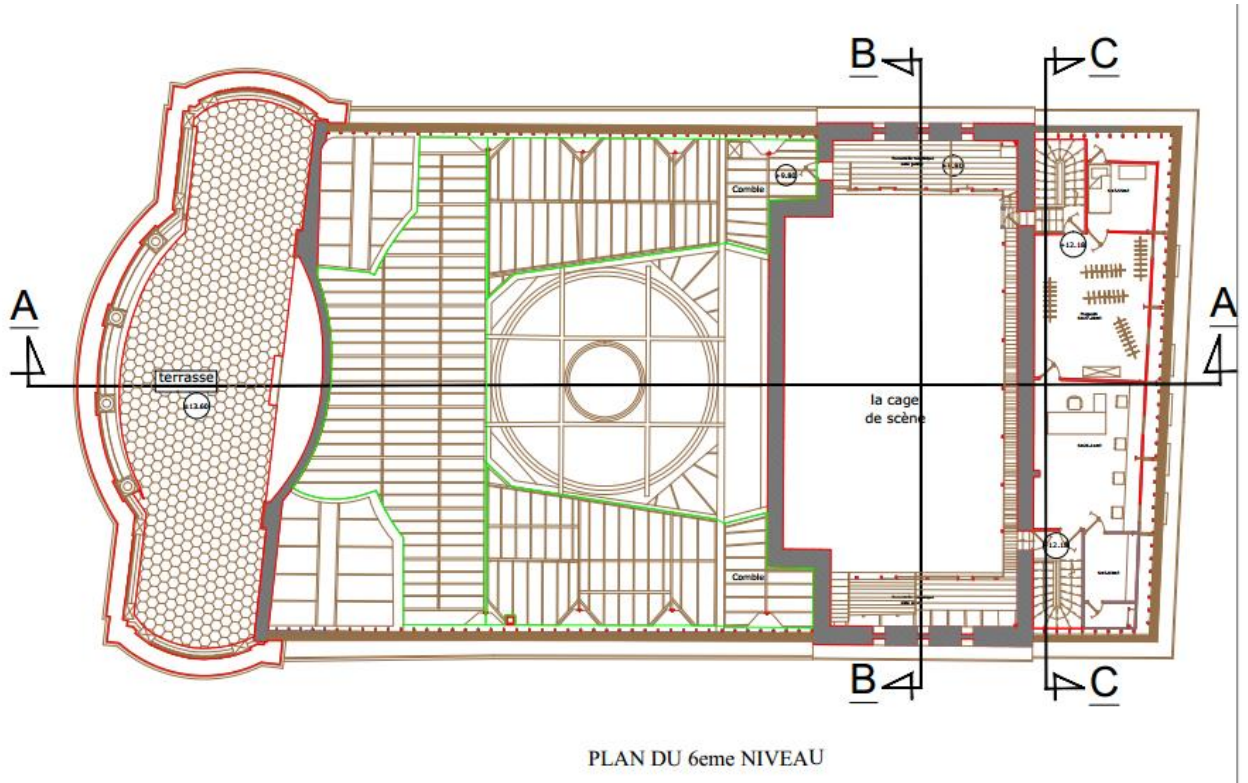


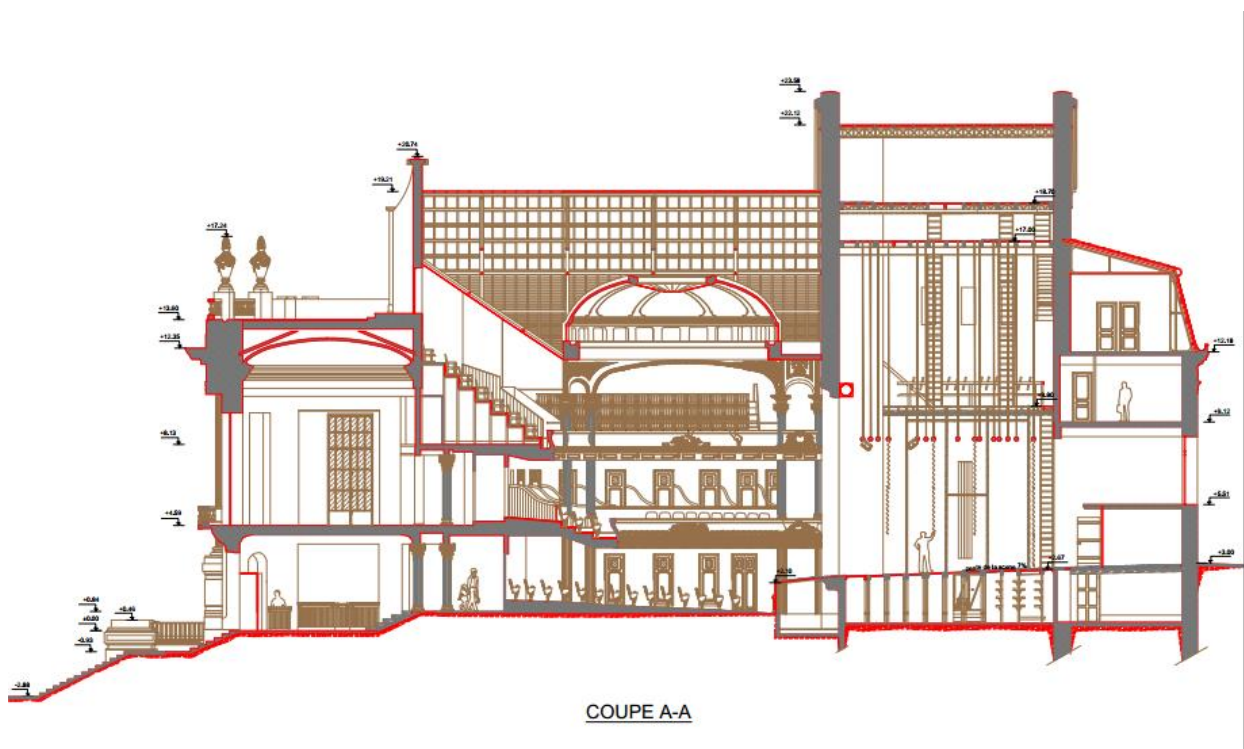
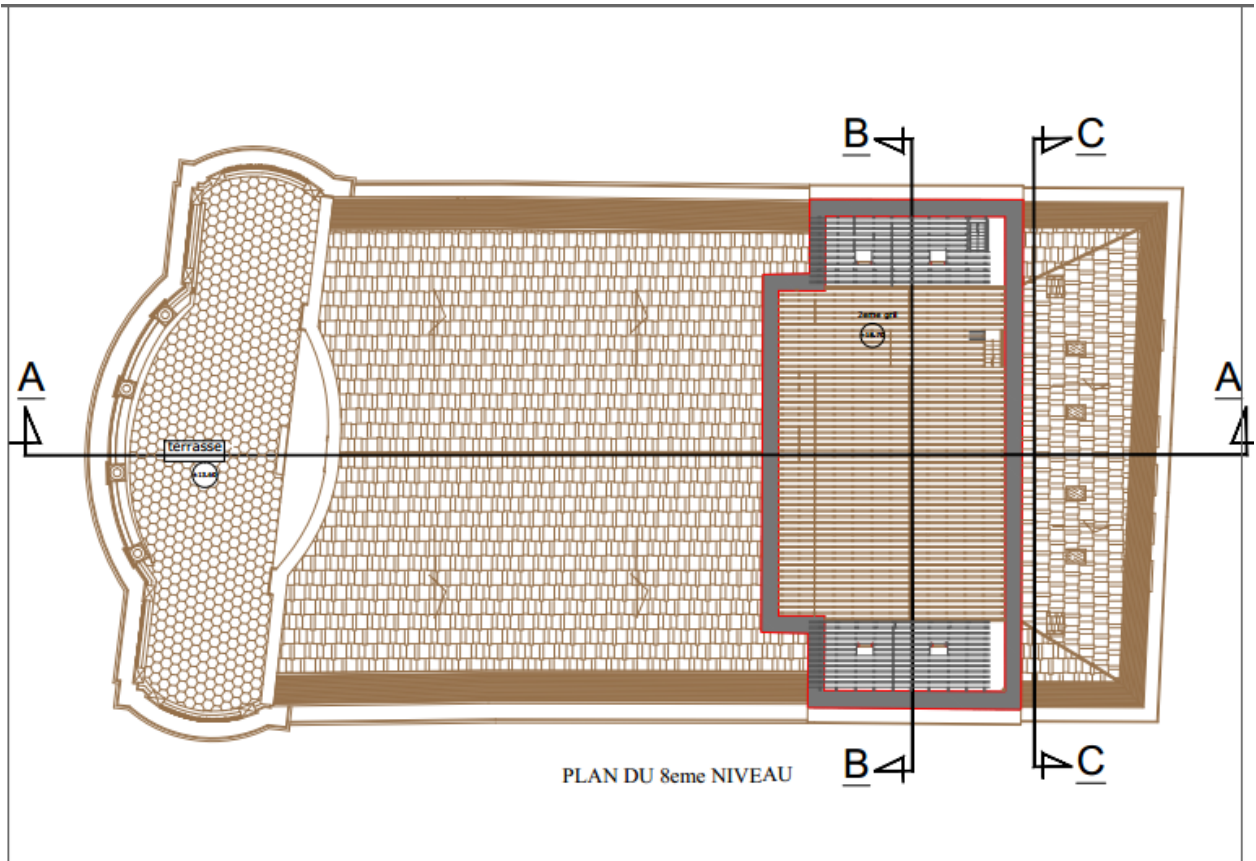


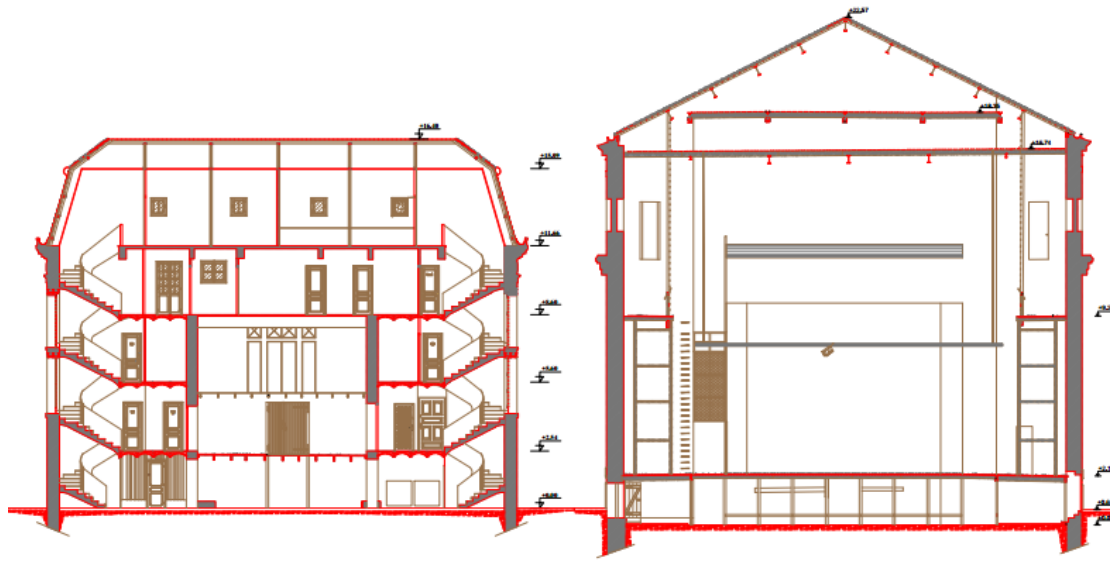
PLAN DU 4eme NIVEAU



PLAN DU 5eme NIVEAU

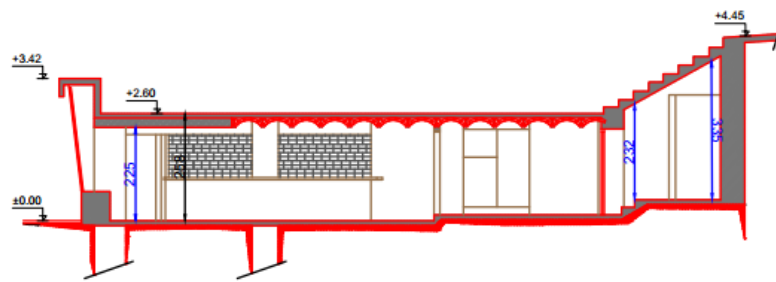




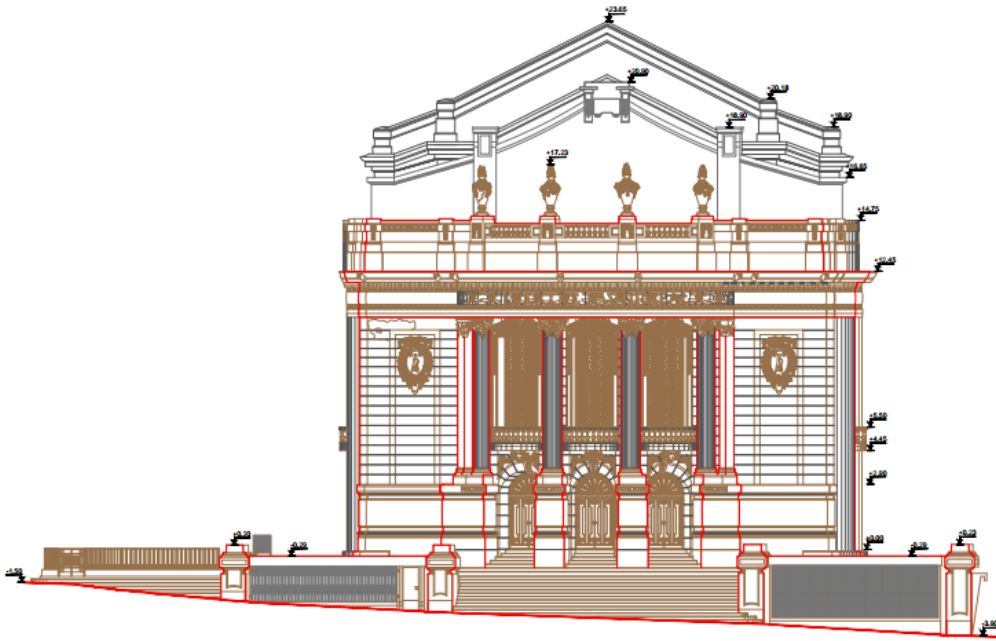


COUPE C-C

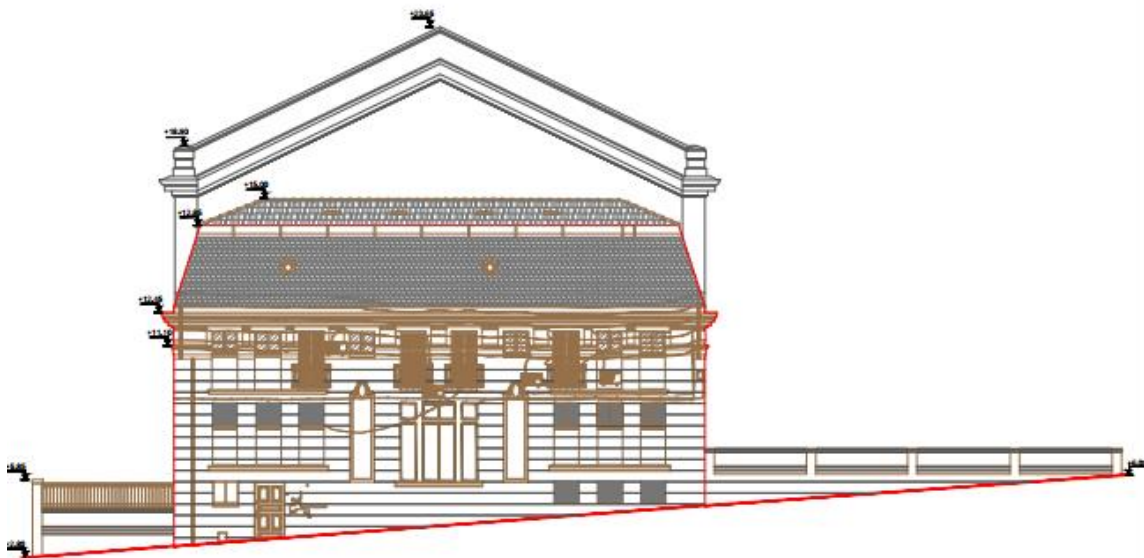
COUPE B-B



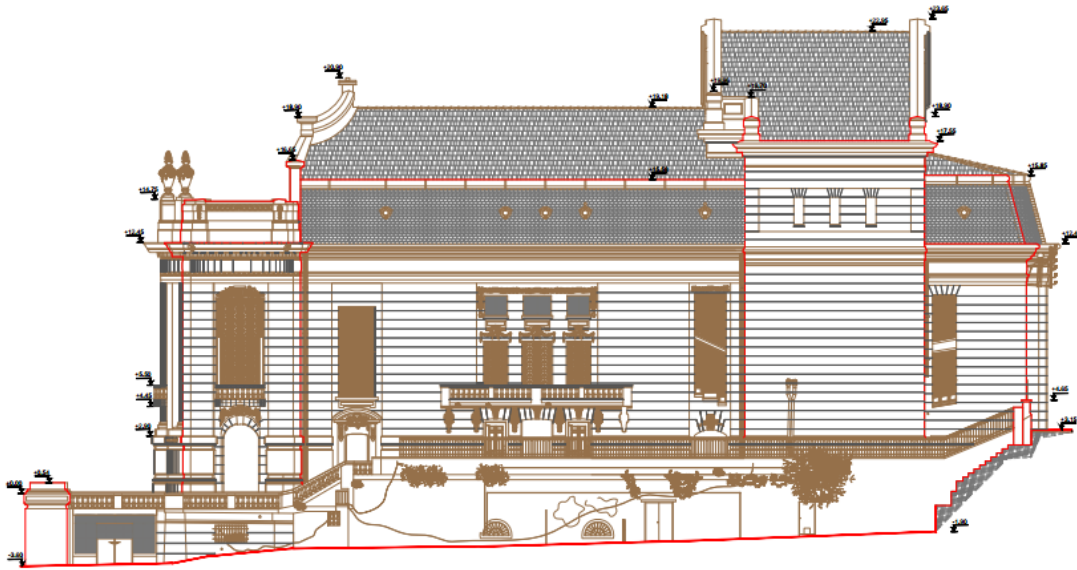
COUPE DD



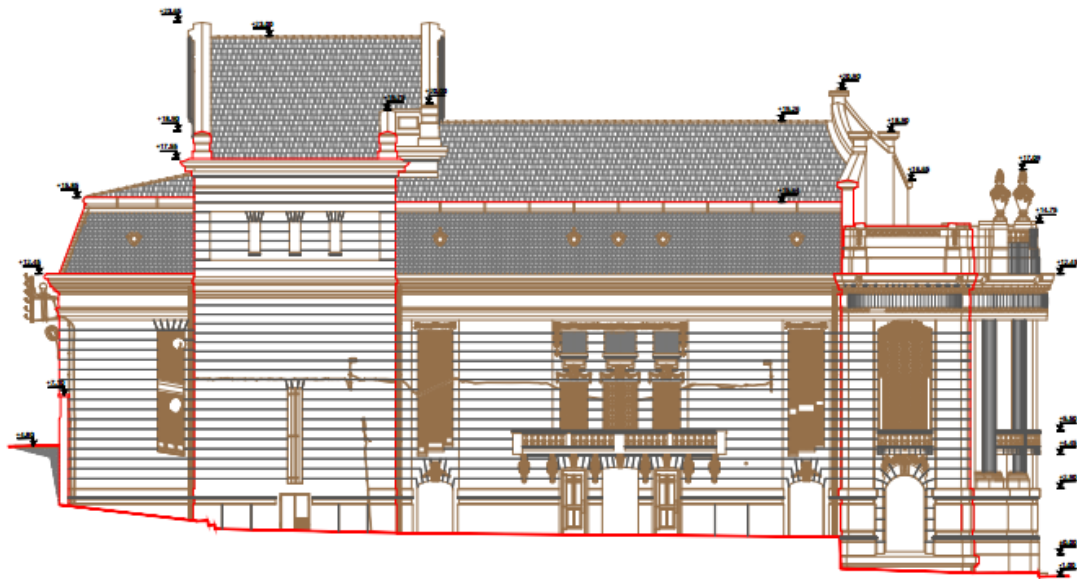
FAÇADE PRINCIPALE



FAÇADE POSTERIEURE



FAÇADE LATÉRALE COTE COUR



FAÇADE LATÉRALE COTE JARDIN

Annexe – C : Dissolution des fractions granulométrique dans l'HCL des mortiers

Tableau 1. Dissolution des fractions granulométrique dans l'HCL du mortier P 4

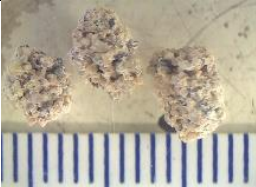
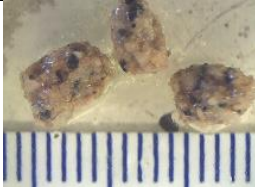
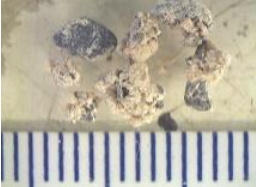
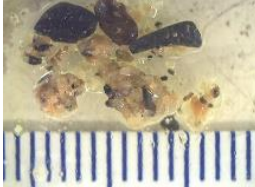
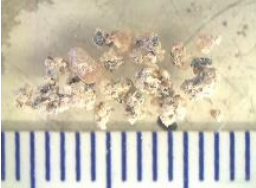
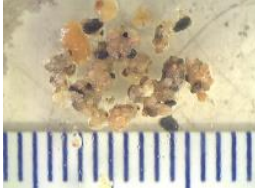

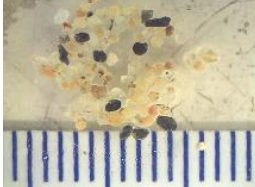
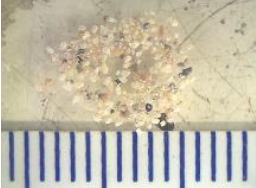
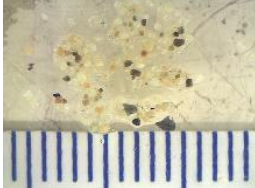
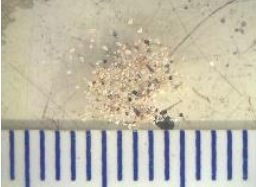

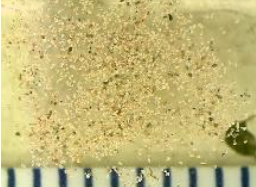
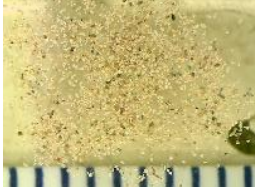


Refus Tamis	Avant HCL	Après Hcl
4 mm		
2 mm		
1 mm		
0,5 mm		
0,250 mm		
0,125 mm		
0,063 mm		
Base		

Tableau 2. Dissolution des fractions granulométrique dans l'HCL du mortier P 2

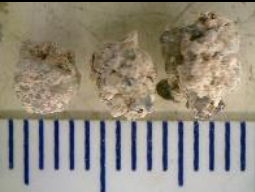

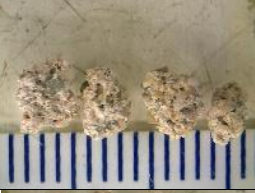

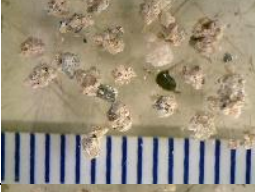

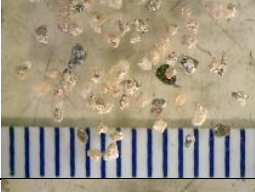

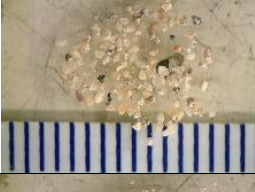
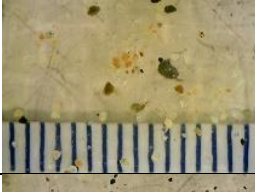
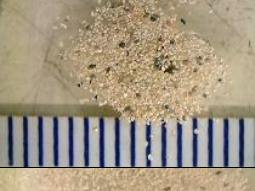




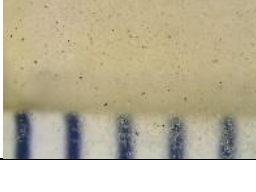


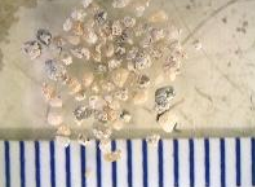

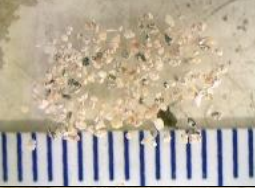
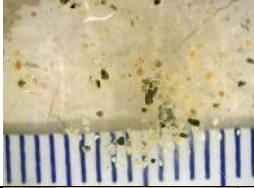

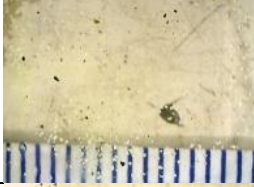
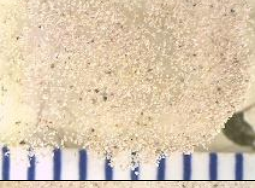
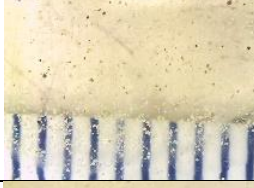


Refus Tamis	Avant HCL	Après HCL
4 mm		
2 mm		
1 mm		
0,5 mm		
0,250 mm		
0,125 mm		
0,063 mm		
Base		

Tableau 3. Dissolution des fractions granulométrique dans l'HCL du mortier P5

Refus Tamis	Avant HCL	Après HCL
4 mm		
0,5 mm		
0,250 mm		
0,125 mm		
0,063 mm		
Base		

Annexe – D : Fiche technique de la chaux

FICHE TECHNIQUE



CHAUX ETEINTE (El Khroub)

Unité de production

Daira: El Khroub

Wilaya: Constantine

Produits

Chaux Eteinte

Fleur de Chaux

Chaux Hydratée

Capacité de production

Four à Chaux d'une capacité 126T/j

Caractéristiques physiques

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

Caractéristiques chimiques

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



Nom Chimique

Hydroxyde de calcium Ca(OH)₂

N° C.A.S: 1305-62-0

EINECS: 215-137-3

Méthode de production

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

Applications

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



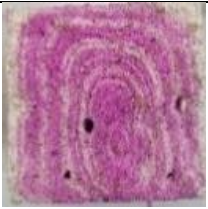









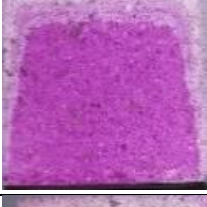
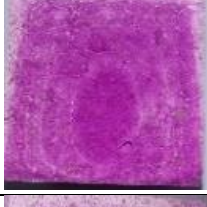
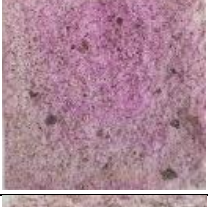

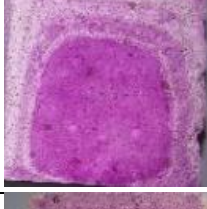



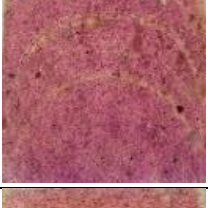



Condition de stockage











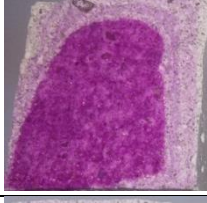

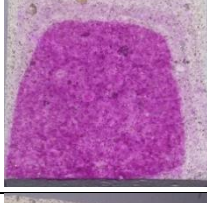



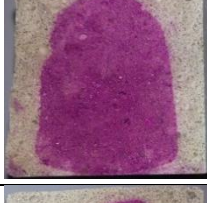


Conserver au sec
 Isoler à l'abri de l'humidité
 Séparer des acides

Livraison

Big bag
 Sac 25kg
 Vrac (cocotte)

Annexe – E : Carbonatation des mortiers dans le temps

Mortiers	Jours		
	90	180	560
MR			
MGP10			
MGP15			
MGP20			
MGP25			
MGP30			
MBD10			
MBD15			

MBD20			
MBD25			
MBD30			
MK10			N.D
MK15			N.D
MK20			N.D
MK25			N.D
MK30			N.D