

N° Ordre...../FT/UMBB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

Faculté de technologie

Département de Génie des procédés



THESE

Présenté par :

BELAIDI Mourad

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT** sciences :

Filière : Sciences et génie des matériaux.

Option : Physico-chimie des matériaux.

THEME

**Elaboration et caractérisation d'un mortier de chaux pour la
restauration des anciens bâtis (Cas de la piscine romaine de
Guelma)**

Devant le jury composé de :

Mr : BENMOUNAH	Abdelbaki	Professeur	UMBB	Président.
Mr : HAMIANE	Messaoud	Professeur	UMBB	Directeur.
Mr : DRICI	Salim	Professeur	U-Alger 2	Examineur.
Mr : BOUAKAZ	Aissaoui	MCA	U-Djelfa	Examineur.

Année Universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

Je remercie le dieu le tout puissant,

Je remercie les membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer notre travail.

J'adresse ma plus vive gratitude à mon directeur de thèse, le professeur **Messaoud Hamiane**, pour m'avoir intégré dans son équipe de recherche et m'avoir permis d'entamer cette thèse et de la mener à terme dans les meilleures conditions. Son soutien aussi bien scientifique que moral m'a été d'une aide considérable.

Je tiens également à remercier tout le personnel du laboratoire CDL de Lafarge algérie, spécialement mon ami et frère Redhouane.

Un grand merci à madame Malika responsable de laboratoire de céramique de l'université de Boumerdes pour son aide précieuse pendant ce travail.

Un grand merci à Mustapha responsable de laboratoire de béton a l'université de Boumerdes pour m'avoir accueilli et aider dans mes analyse au laboratoire.

Je remercie mes amis, à commencer par Brahim Hami, Mehena Oualit, M' hand mahdad, Hakim Hamid, Kamel Bouzetine, qui ont toujours été là pour me soutenir moralement et émotionnellement pour la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier tout le personnel du laboratoire central de l'ENGOA de Réghaia, pour leurs aides précieuses pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

*À ma très, très, très chère mère qui m'a tant donnée.
Que Dieu l'accueille dans son vaste Paradis.*

*À mon cher père, que Dieu l'accueil dans son vaste
Paradis.*

*À ma très chère femme.
À ma princesse et mon trésor Ania.
À mon petit fils Nassim.*

À mes chers frères et mes chères sœurs.

Résumé :

L'objet de ce travail est l'élaboration d'un mortier de restauration de nature hydrofuge, compatible avec les matériaux de construction de l'ancien bâti.

La piscine romaine de Guelma est dans un état de dégradation très avancé. Les principales fractures responsables de cet état de conservation sont le temps, l'abandon du site et les interventions inappropriées.

Les moyens matériels des laboratoires « ENJOA » du Réghaia, Lafarge du Rouïba, le CETEM de boumerdes le laboratoire de céramique du FT/UMBB, ont été utilisés pour l'élaboration des mortiers et leurs caractéristiques minéralogiques (DRX), chimiques (FluoX) physiques (porosité, absorption, absorption par capillarité) et mécaniques (compression et flexion).

Le mortier de la piscine romaine est composé de chaux de nature dolomitique, du sable et des ajouts des briques ou des terres calcinées ; ce qui lui confère un caractère hydrofuge.

Les caractéristiques minéralogiques, chimiques et physiques des mortiers de la piscine ; ainsi que les références théoriques ; nous ont permis d'établir une formulation témoin pour la confection des mortiers.

Différentes compositions ont été développées et caractérisées au niveau de ces laboratoires .La formulation témoin (liant : granulats) est de (1 :3). Les mortiers ont été préparés avec la substitution des quantités de chaque ajout (pouzzolane, métakolin, ciment naturel et brique pillée (avec différentes granulométries) de (10, 20, 30,40 et 50%) des masses de chaux aériennes utilisées. A cette composition des ajouts d'adjuvants de 2% (Medaflo) et 50 (ml) d'huile d'olive. Une caractérisation physico-mécanique des échantillons de mortiers élaborés a été réalisée après 14 et 28 jours de vieillissement. Les résultats ont relevés que la substitution des différents ajouts de la masse de chaux influe sur la variation des résistances mécaniques et de l'absorption d'eau des mortiers. Ceci montre que l'ajout de la brique pillée confère un caractère hydrofuge aux mortiers et améliore leurs caractéristiques mécaniques. L'huile d'olive diminue la teneur en absorption d'eau et en porosité des mortiers et améliore leur caractère hydrofuge.

Les meilleures caractéristiques des mortiers formulés ,aptes à être utilisées pour la restauration de la piscine de Guelma sont : L'échantillon (MBH1), mortier avec substitution de la brique et ajout de 50 (ml) d'huile d'olive, le (MP10) avec 40% de pouzzolane et 2 % de médaflow, le (MBP9) avec (30%) de la brique pillée et 50% de pouzzolane et 2 % de médaflow et la (MM1) avec 50% de métakaolin et 2 % de médaflow.

Mots clés : Piscine romaine, mortiers hydrofuges, formulation, ajout minérales, caractéristiques physiques et mécaniques.

Abstract:

The object of this work is the development of a water-repellent restoration mortar, compatible with the construction materials of the old building.

The Roman swimming pool of Guelma is in a very advanced state of degradation. The main factors responsible for this state of conservation are time, abandonment of the site and inappropriate interventions.

The means material resources of laboratories "ENJOA" of Réghaia, Lafarge of Rouïba, the CETEM of Boumerdes the ceramic laboratory of the FT/UMBB, were used for the elaboration of the mortars and their mineralogical (DRX), chemical (FluoX) physical (porosity, absorption, absorption by capillary action) and mechanical (compressive and flexural strength) characterizations.

The mortar of the Roman pool is composed of dolomitic lime, sand and additions of bricks or calcined earth; which gives it a water-repellent character.

The mineralogical, chemical and physical characteristics of the swimming pool mortars; as well as theoretical references; we made it possible to establish a control formulation for making mortars.

Different compositions have been developed and characterized at these laboratories. The control formulation (binder: aggregate) is (1:3). The mortars were prepared with the substitution of the quantities of each addition (pozzolana, metakaolin, natural cement and crushed brick (with different grain sizes) of (10, 20, 30, 40 and 50%) of the aereal lime masses used. At this composition the additions of 2 (%) (Médaflow) and 50 (ml) olive oil adjuvants. A physico-mechanical characterization of the samples of mortars prepared was carried out after 14 and 28 days of aging. The results revealed that the Substitution of the different additions of the mass of lime influence the variation of the mechanical resistances and the water absorption of the mortars. This shows that the addition of the crushed brick confers a water-repellent character to the mortars and improves their mechanical characteristics. Olive oil decreases the water absorption and porosity content of mortars and improves their water repellency.

The best characteristics of the mortars formulated and suitable for use for the restoration of the Guelma swimming pool are: The sample (MBH1), mortar with substitution of brick and addition of 50 (ml) of olive oil, the (MP10) with 40% pozzolana and 2% médaflow, (MBP9) with (30 %) crushed brick and 50% pozzolana and 2% médaflow and (MM1) with 50% metakaolin and 2% médaflow.

Keywords: Roman pool, water-repellent mortars, formulation, mineral addition, physical and mechanical characteristics.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو تطوير ملاط ذو طبيعة مقاومة للماء متوافق مع مواد بناء المباني القديمة. حمام السباحة الروماني لقائمة هو في حالة متقدمة للغاية من التدهور. العوامل الرئيسية المسؤولة عن حالة الحفظ هذه وهي: الزمن، هجر الموقع والتدخلات غير المناسبة التي أجريت عليه.

تم استخدام الوسائل المادية المتوفرة في المخابر "ENJOA" في رغاية، و Lafarge في روبيية، و CETIM في بومرداس، ومخبر السيراميك التابع لكلية التكنولوجيا FT / UMBB، لتطوير الملاط واختبار خصائصه المعدنية (DRX) والكيميائية (FluoX) والفيزيائية (المسامية، الامتصاص، الامتصاص بفعل الخاصية الشعرية) والميكانيكية (مقاومة الضغط والانحناء).

يتكون ملاط المسبح الروماني من الجير الدولوميتي والرمل وإضافات من الأجر المطحون أو التراب المحروق. مما يعطيها طابع مقاوم للماء.

الخصائص المعدنية والكيميائية والفيزيائية لملاط حمامات السباحة؛ وكذلك المراجع النظرية. مكنتنا من الوصول إلى تركيبة مرجعية شاهدة سمحت لنا بتحضير عينات الملاط.

تم تحضير وتحليل لخصائص تركيبة عينة مرجعية كشاهدة على مستوى هذه المخابر، تركيبة العينة المرجعية الشاهدة (رابط: حصى) هي (1: 3). بعد ذلك تم تحضير عينات أخرى من الملاط باستبدال كميات كل إضافة من (البوزولان، الميتاكوولين، الأسمنت الطبيعي والأجر المطحون) بمقاييس حبيبية مختلفة ونسب مئوية تتراوح بين (10، 20، 30، 40 و 50٪) من كتل الجير الهوائي المستخدم. إلى هذه التركيبات تمت إضافة (2 ٪) (ميدافلو) و (50 ملل) من زيت الزيتون، تم التوصيف الفيزيائي والميكانيكي للعينات المحضرة بعد 14 و 28 يوم من التصلب. أظهرت النتائج أن استبدال الإضافات المختلفة بكتلة الجير يؤثر تأثيراً متبايناً في المقاومة الميكانيكية وامتصاص الماء للملاط. وهذا يدل على أن إضافة الأجر المطحون يضيف طابعاً مقاوم للماء على الملاط ويحسن خصائصها الميكانيكية. كمل أن زيت الزيتون يقلل من امتصاص الماء ومحتوى مسامية الملاط ويعطيه خاصية مقاومة الماء.

أفضل خصائص الملاط المحضر والمناسب للاستخدام في ترميم مسبح قائمة هو: العينة (MBH1)، الملاط المتكون من الأجر المطحون و 50 ملل من زيت الزيتون، العينة (MP10) الملاط المتكون من (40 ٪) بوزولانا و (2 ٪) ميدافلو، العينة (MBP9) الملاط المتكون من (30 ٪) أجر مطحون و (50 ٪) بوزولانا و 2 ٪ ميدافلو و (MM10) الملاط المتكون من (50 ٪) ميتاكوولين و 2 ٪ ميدافلو.

الكلمات المفتاحية: المسبح الروماني، الملاط المقاوم للماء، التركيبات، الإضافات المعدنية، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية.

SOMMAIRE

Introduction générale	01
-----------------------	----

Première partie : Partie théorique

Chapitre 01 : Généralités sur les mortiers

1. Introduction	12
2. Évolution et historique des mortiers	12
2.1. Les mortiers préhistoriques	12
2.2. Les mortiers grecs	13
2.3. Les mortiers romains	14
2.3.1. Evolution	14
2.3.2. Composition	15
2.4. Les mortiers médiévaux	18
2.5. Les mortiers modernes	19
2.5.1. Les mortiers à base des liants hydrauliques	19
2.5.2. Les mortiers à base des ciments	20
3. Les mortiers à travers la littérature	21
4. Conclusion	25

Chapitre 02 : matières premières pour des mortiers de chaux

1. Introduction	28
2. La chaux	28
2.1. La fabrication de la chaux	28
2.1.1. La calcination	28
2.2. L'extinction	31
2.3. La carbonatation	33
3. Les recettes antiques	37
4. La pouzzolane	41
4.1. L'activité pouzzolanique	41
4.2. Les terres cuites (pouzzolanes artificielles)	42
5. Le métakaolin	46
5.1. Définition	46
5.2. Obtention des méta kaolins	46
5.2.1. Procédé de Calcination	49
5.2.1.1. Procède de Calcination : traditionnelle (Four rotatif ou à lit circulant)	49
5.2.1.2. Les fours rotatifs.	49
5.2.1.3. Les fours à plateaux	50
5.2.1.4. Procédé de calcination flash: Four Flash	51
5.3. Propriétés physiques des métakaolins	52
5.3.1. La masse volumique	52
5.4. La granulométrie	53
5.5. Morphologie du métakaolin	53
5.6. Surface spécifique	54
5.7. Composition chimique	54

5.8. Composition minéralogique	55
6. Le ciment naturel	56
6.1. Fabrication du ciment prompt	56
6.1.1. Matière première	56
6.1.2. La cuisson	56
6.1.3. Le broyage	57
6.2. Caractéristiques physiques des ciments naturels	58
6.3. Caractéristiques chimiques des ciments naturels	60
6.4. Les utilisations des ciments naturels	62
7. Conclusion	63

Chapitre 03 : Altération des matériaux de construction (cas de la piscine romaine)

1. Introduction	66
2. Altérations des briques	66
2.1. Désagrégation	67
2.2. Altération chromatiques	67
2.3. Les attaques biologiques	68
3. Altérations des mortiers de chaux	68
3.1. Les causes mécaniques	68
3.2. Effet de l'humidité	68
3.3. Causes biologiques	69
3.4. Causes humaines	69
3.5. Les fissurations	69
3.6. Altérations chromatiques	69
4. Les causes d'altération des mortiers	69
4.1. Les effets visibles et mesurables	69
4.2. Un manque d'adhérence	70
4.3. Une perte de dureté	70
4.4. Une porosité importante	70
4.5. La présence de fissure	70
4.6. L'absence de cohésion	71
4.7. La présence de diverses traces	71
4.8. Dégradation générale des mortiers	71
4.8.1. Effet de l'humidité	71
4.8.2. Altération chimiques	72
4.8.3. Altération physique	72
4.8.3.1. Le gel-degel	72
4.8.3.2. L'influence des sels	73
4.8.3.3. La dilatation thermique	73
4.8.4. Altérations biologiques	73
4.8.4.1. Action de la pollution atmosphérique	75
4. Altération des pierres	75
5. Les altérations des mortiers à travers les recherches bibliographiques	76
6. Conclusion	78

Deuxième partie: Partie expérimentale

Chapitre 01 : Les méthodes d'analyses et de caractérisations

1. Introduction	86
2. Caractéristiques physiques	87
2.1. La masse volumique	87
2.1.1. La masse volumique absolue	87
2.1.2. La masse volumique apparente	88
2.2. Le potentiel hydrogène pH	89
2.3. Teneur en CaO libre	89
2.4. L'absorption d'eau par immersion totale	90
2.5. La porosité ouverte.	90
2.6. L'absorption d'eau par capillarité	91
2.7. Analyse granulométriques par tamisage	92
3. Résistances mécaniques	92
3.1. Résistances mécaniques à la flexion	92
3.2. Résistances mécaniques à la compression	93
4. L'analyse chimique par fluorescence X, (XRF)	94
5. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX)	95
6. Conclusion	97

Chapitre 02 : Histoire, état de conservation et caractéristiques des matériaux de la piscine

1. Introduction	100
2. Situation géographique de la ville de Guelma	100
3. Histoire et archéologie de la ville de Guelma	101
3.1. Préhistoire	101
3.2. La ville de Guelma de l'époque romaine au XIXe siècle	101
3.3. La ville de Guelma à la Période française de 1870 à 1962	102
4. Patrimoine architectural et environnemental de la ville de Guelma	102
4.1. Le théâtre romain de Guelma	102
4.2. Les vestiges antiques de Thibilis (Sellaoua Announa)	103
4.3. La Piscine romaine Héliopolis	103
5. Etat de conservation de la piscine romaine	104
5.1. L'effondrement des murs	105
5.2. Les pertes de masse	105
5.3. La perforation	106
5.4. Les plantes poussant	106
5.5. Les fissures	106
5.6. Travaux et interventions effectués sur la piscine	107
6. Caractérisation des échantillons	107
6.1. Protocole de prélèvement des échantillons de la piscine	107
6.2. Description des échantillons	108
6.3. Caractérisation des échantillons	109
6.3.1. Caractérisation minéralogique par diffraction X (DRX)	110
6.3.2. Caractérisation chimique par fluorescence X	114
6.3.3. Caractéristiques physiques	115

6.3.3.1. La masse volumique	115
6.3.3.1.1. La masse volumique spécifique	115
6.3.3.1.2. La masse volumique apparente	116
6.3.3.2. L'humidité	116
6.3.3.3. Le potentiel hydrogène (pH)	119
6.3.3.4. Teneur en CaO libre	119
6.3.3.5. L'Absorption d'eau	121
7. Interprétation des résultats	122
8. Conclusion	122

Chapitre 03: Elaboration des mortiers

1. Introduction	127
2. Les matières premières utilisées pour l'élaboration des mortiers	129
2.1. Description des matières premières	129
Le liant	129
Les agrégats	129
Addition minérale	129
La brique pillée	129
La pouzzolane	129
Le ciment naturel	129
Le métakaolin	129
L'adjuvant	130
L'eau de gâchage	130
3. Caractérisation matières premières utilisées pour l'élaboration des mortiers	132
3.1. Détermination des masses volumiques réelles	132
3.2. Les humidités des matières premières utilisées pour les mortiers	132
3.3. Analyse granulométrique des sables utilisées.	133
3.3.1. L'analyse granulométrique par tamisage du sable jaune	133
3.3.2. L'analyse granulométrique par tamisage du sable noir.	134
3.4. Détermination de module de finesse des sables utilisées.	134
4. Formulation des mortiers	135
4.1. Mélange des matériaux	135
4.2. L'étalement au cône	136
4.3. Rapport E/C et classe d'étalement.	136
4.4. Confection des mortiers.	137
5. Variantes de mortiers de restauration formulés	138
5.1. La première variante des mortiers (Ajout de la brique pilée et l'huile d'olive)	139
5.1.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	140
5.1.1.1 Caractérisation physique	141
5.1.1.2. Caractérisation mécanique	147
5.1.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	147
5.1.1.2.2. Résistance mécanique à la compression.	149
5.1.1.3. Caractérisation hydrique	151
5.1.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité	151
5.2. La deuxième variante des mortiers (Ajout de la pouzzolane).	154
5.2.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	155
5.2.1.1. Caractérisation physique.	157
5.2.1.2. Caractérisation mécanique.	162
5.2.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	162
5.2.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	164

5.2.1.3. Caractérisation hydrique	165
5.2.1.3. Absorption d'eau par capillarité	165
5.3. La troisième variante de mortier (Ajout de la pouzzolane et brique pillée).	169
5.3.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	171
5. 3.1.1. Caractérisation physique.	172
5. 3.1.2. Caractérisation mécanique.	177
5. 3.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	177
5.3.1.2. 2. Résistance mécanique à la compression	179
5.3.1.3. Caractérisation hydrique	181
5. 3.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité	181
5.4. La quatrième variante de mortier ((Ajout de métakaolin).	185
5.4.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés..	187
5.4.1. 1.Caractérisation physique.	187
5.4.1. 2.Caractérisation mécanique.	193
5.4.1. 2.1.Résistance mécanique à la flexion.	193
5.4.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	194
5.4.1.3. Caractérisation hydrique	197
5.4.1. 3.1.Absorption d'eau par capillarité	197
5.5. La cinquième variante de mortier (Ajout de ciment naturel).	201
5.5.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	204
5.5.1. 1.Caractérisation physique.	204
5.5.1.2. Caractérisation mécanique	210
5.5.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	210
5. 5.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	212
5.5.1.3. Caractérisation hydrique	213
5.5.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité	213
Interprétation générale	218
Conclusion générale	227
Liste des tableaux	230
Liste des figures	232
Bibliographie	237
Annexes	249

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

Les liants utilisés pour les mortiers de maçonnerie sont divisés en deux types, liants durcissant à l'air et liants hydrauliques. Le gypse et la chaux aérienne sont classés parmi les premiers, tandis que les chaux hydrauliques peuvent durcir dans des environnements humides, appartiennent à ces derniers. (En effet, les ciments utilisés de nos jours n'ont pas été développés qu'au 19^{ème} siècle) ¹. En fait, de nombreux types de liants ont été utilisés à différents âges afin d'obtenir des mortiers aux propriétés spécifiques, et plus précisément la stabilité dans des environnements humides. (Cette dernière est une condition essentielle pour permettre une résistance à long terme aux matériaux exposés à l'environnement extérieur). ². À l'heure actuelle, la chaux est fréquemment utilisée pour la restauration et la conservation des anciens bâtis ³. De plus, ses caractéristiques en font des matériaux de construction hautement adaptés et durables, et qui est une des raisons de son utilisation dans les mortiers pendant des siècles ⁴.

Dans la littérature, plusieurs exemples de matériaux avec des propriétés hydraulique sont rapportés, obtenus par cuisson (calcination) à des températures spécifiques du calcaire mélangé à des minéraux argileux (ajoutés délibérément ou non) ou en mélangeant de la chaux éteinte avec des substances capables de fournir des propriétés pouzzolanique au mortier, comme le métakaolin, la pouzzolane naturelle, le ciment naturel ou la brique pillée ⁵.

Une des grandes problématiques dans le domaine du patrimoine est le choix d'un mortier de restauration. Les règles de restauration actuelles recommandent une intervention minimale, efficace et réversible. Cela signifie qu'il faut s'assurer que les travaux de restauration n'engendrent pas plus de dégâts qu'avant l'intervention ⁶.

L'Algérie regorge d'un lot important de monuments historiques, de différentes époques transmettant le passage de chaque civilisation, et ces dernières années les opérations de préservation et de restauration se sont multipliées, pour y remédier aux nombreuses dégradations que subissent ce patrimoine.

1.L. Bertolini, M. Carsana, M. Gastaldi, F. Lollini, E. Redaelli ,Binder characterization of mortars used at different ages in the San Lorenzo church in Milan. *Materials characterization* 80 (2013) 9-20.

2.D. Miriello , D. Barca, A. Bloise,A. Ciarallo, M .Gino Crisci,T. De Rosea,C. Gattuso, F. Gazineo, F .Mauro, La Russa, Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. *Journal of Archaeological Science* 37 (2010) 2207–2223.

3.F .Caro', Riccardi, MP. Mazzilli, MT. Savini. Characterization of plasters and mortars as a tool in archaeological studies: the case of Lardirago castle in Pavia, Northern Italy. *Archaeometry* 50 (2008) 85–100.

4.A. Boato, T .Mannoni. Materials and techniques in port Genoa: pouzzolana concretes from the modern age to the industrial revolution. *Sci Beni Cult*; 9(1993) 12–20.

5.S. Kramara, V. Zalar, M .Urosevic, W. Körner, A .Mauko, B. Mirtič, Mineralogical and microstructural studies of mortars from the bath complex of the Roman villa rustica near Mošnje (Slovenia). *Materials Characterization*.62 (2011) 1042–1057.

6.These, sandrine ecrepont, Compatibilité des mortiers de restauration : contribution à l'étude de la migration des fluide

La piscine romaine de Guelma est l'une de ces monuments, ce patrimoine de la période romaine fait partie de la richesse architecturale de la ville d'Héliopolis, mais qui hélas n'a pas bénéficié d'un entretien digne de sa vraie valeur.

Dans le domaine de la restauration, beaucoup d'informations sont issues de la tradition orale. Elles sont généralement basées sur l'expérience du terrain et restent assez empiriques ou partielles. Ce travail tente d'apporter une pierre à l'édifice en vérifiant scientifiquement et expérimentalement les caractéristiques intrinsèques des mortiers de chaux, tels que les propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques. Des différents mélanges de mortiers ont été étudiés pour arriver à cet objectif.

L'utilisation des mélanges de la chaux est certains ajouts pouzzolaniques est une pratique ancienne chez les romains. Chose inconnue dans notre pays, c'est pour cela qu'il nous est apparu important de faire une étude sur ce sujet. Pour contribuer à une meilleure connaissance de ce mélange et déterminer ses caractéristiques physico-mécaniques, et éventuellement son utilisation dans la confection des différents destinés à la restauration adéquate au mortier ancien de la piscine.

L'élaboration des mortiers nécessite des quantités importantes de liant. Néanmoins, certaines matières premières dites de substitution peuvent remplacer avantageusement la chaux ⁷. Ces matériaux de substitution sont définis comme des matériaux siliceux ou siliceux alumineux. Ces derniers réagissent avec l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$), en présence de l'humidité sous température ambiante pour former des composés possédant des propriétés presque similaires que celles du ciment Portland ⁸. L'objectif de ce travail expérimental s'inscrit dans cette thématique et consiste à élaborer des mortiers destinés à la restauration des anciennes bâtisses. En effet, différents mélanges de mortiers à base de chaux et du (métakaolin, pouzzolane, brique pillée, ciment naturel et adjuvant) à différents taux pondéraux ont été conçus. Les propriétés physiques et mécaniques ainsi que le suivi du comportement hydrique des échantillons ont été déterminés.

7.E. Aggelakopoulou, A. Bakolas , A. Moropoulou, Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. *Construction and Building Materials* 225 (2019) 633–641.

8.A. Ali Al-Rawas, A. WahidHago , Evaluation of field and laboratory produced burnt clay pozzolans, *Applied Clay Science* 31 (2006) 29– 35.

Problématique

La conservation et restauration des sites archéologiques est encouragée dans la majorité de pays. Cependant, une inadéquate intervention peut causer un mal énorme, et donc les autorités ont établi de nombreuses conditions sur les procédures et matériaux employées pour la conservation et la restauration.

Aujourd'hui, l'utilisation rationnelle de la piscine romaine de Guelma exige une étude et recherche sur les matériaux de constructions qui la composent (en particulier le Mortier), afin d'élaborer un mortier compatible avec celui de l'époque romaine. Dans cette optique, nous avons posé les questions suivantes pour bien mener notre travail :

- Quelle sont les différent types de matériaux de construction utilisés dans la piscine romaine de Guelma ?
- Quelle est l'état de conservation et les paramètres responsables de l'altération et de dégradation de ces matériaux ?
- Quelle sont les caractéristiques et la composition de ces matériaux de construction ?
- Quelle sera la meilleure composition des mortiers qui sera utilisés d'une manière compatibles avec les matériaux de la piscine ?
- Quelle matières première utilisés dans cette composition et quel procédé de formulation utilisés pour élaborer un mortier de nature hydrofuge, permettant de mieux assurer sa fonction.

Objectifs

Trois objectifs principaux ont été poursuit :

- Déterminer les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des mortiers prélevés de la piscine romaine de Guelma et établir une interprétation des résultats obtenus. pour en déduire les formulations des matières premières utilisées.
- Elaboration des nouvelles formulations des mortiers contenant de chaux aérienne et ajouts pouzzolaniques (brique pilée, pouzzolane, métakaolin, ciment naturel).
- Analyse des caractéristiques intrinsèques de ces mortiers tels que les propriétés mécaniques, physiques et le suivi du comportement hydrique, ainsi que leurs compatibilités avec les mortiers anciens.

Méthodologie

A partir des ces objectifs, nous avons partagé notre travail en deux parties

La première partie théorique : comporte trois chapitres

Un premier chapitre est consacré à l'étude des connaissances historiques et techniques des mortiers anciens.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les matières premières employés dans la composition des mortiers de chaux.

Le troisième chapitre est axé sur l'étude des altérations des matériaux de constructions utilisés dans la piscine romaine.

- La deuxième partie pratique : comporte trois chapitres

Le premier chapitre est consacré à la présentation des différentes méthodes d'analyse et de caractérisation des matériaux. Ces méthodes se basent sur des analyses chimiques et minéralogiques. Complétée par des analyses physiques et mécaniques.

Le deuxième chapitre est axé sur l'étude et les prélèvements des échantillons de mortiers nécessaires à la réalisation des essais au niveau du laboratoire et leurs caractéristiques, et l'état de conservation avec une approche historique et archéologique de la région où se trouve la piscine de Guelma.

Le troisième chapitre est consacré à la formulation des mortiers constitués de différents composants : (chaux, agrégats, eau, ajouts, et certains adjuvants). Cette multiplicité des composants nous a permis l'élaboration d'une large gamme de mortiers avec des propriétés diverses selon l'usage et le besoin, dont le caractère hydrofuge est le plus recherché. Nous présentons aussi dans ce chapitre une série de caractérisations physiques, mécaniques et comportement hydrique des mortiers élaborés.

La synthèse des données des résultats des différents essais, nous a permis de choisir la formulation du mortier qui a des caractéristiques compatibles avec les matériaux de construction de la piscine de Guelma et par conséquent une utilisation dans la restauration de cette dernière.

Nous avons terminé notre travail avec une interprétation générale, une conclusion et des références bibliographiques utilisées dans cette recherche. La figure (Fig.1) montre un plan de travail général de notre recherche.

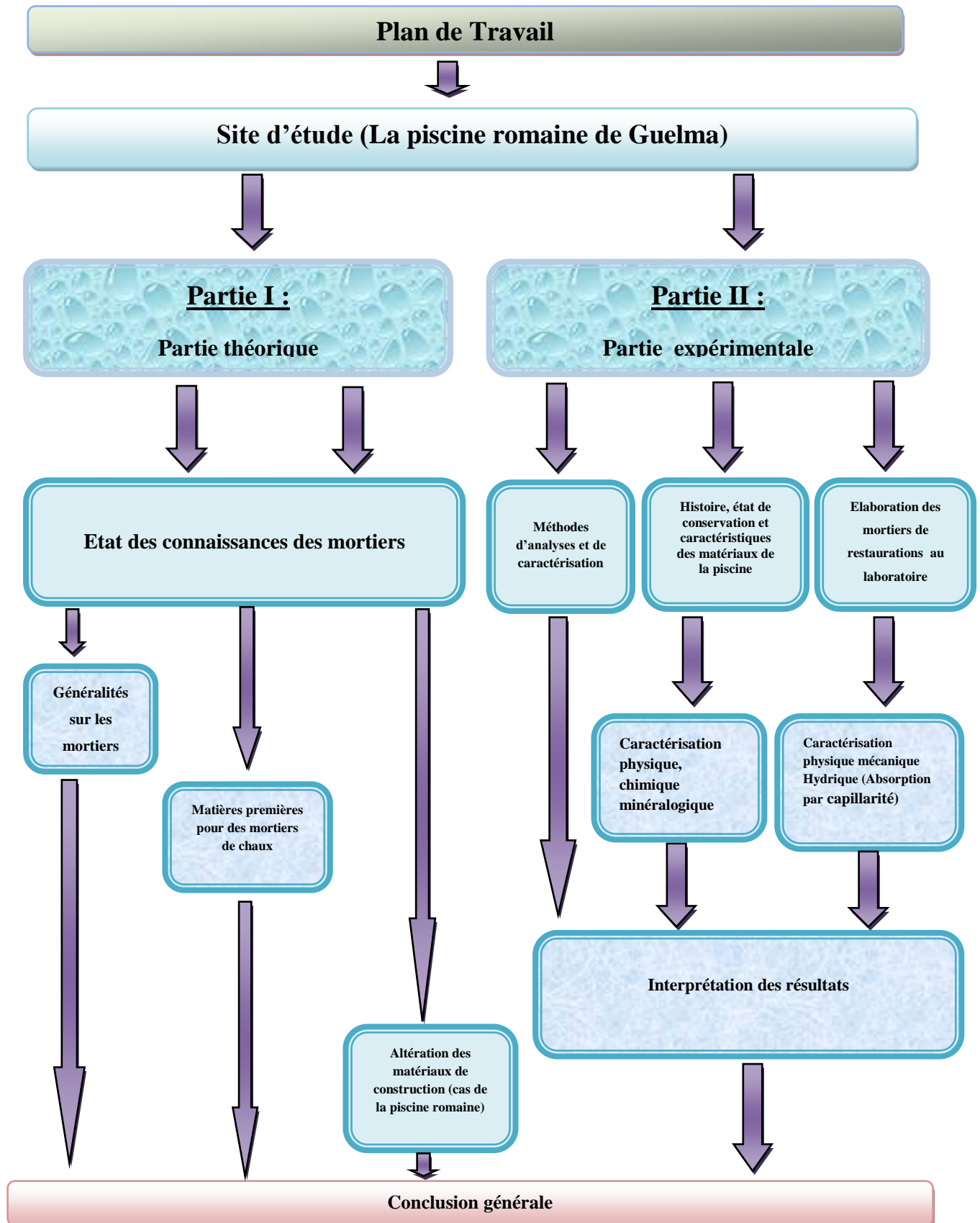


Fig.1. Plan de travail général.

Première partie : Partie théorique

Chapitre 01 : Généralités sur les mortiers

1. Introduction	12
2. Évolution et historique des mortiers	12
2.1. Les mortiers préhistoriques	12
2.2. Les mortiers grecs	13
2.3. Les mortiers romains	14
2.3.1. Evolution	14
2.3.2. Composition	15
2.4. Les mortiers médiévaux	18
2.5. Les mortiers modernes	19
2.5.1. Les mortiers à base des liants hydrauliques	19
2.5.2. Les mortiers à base des ciments	20
3. Les mortiers à travers la littérature	21
4. Conclusion	25

Chapitre 02 : matières premières pour des mortiers de chaux

1. Introduction	28
2. La chaux	28
2.1. La fabrication de la chaux	28
2.1.1. La calcination	28
2.2. L'extinction	31
2.3. La carbonatation	33
3. Les recettes antiques	37
4. La pouzzolane	41
4.1. L'activité pouzzolanique	41
4.2. Les terres cuites (pouzzolanes artificielles)	42
5. Le métakaolin	46
5.1. Définition	46
5.2. Obtention des méta kaolins	46
5.2.1. Procédé de Calcination	49
5.2.1.1. Procède de Calcination : traditionnelle (Four rotatif ou à lit circulant)	49
5.2.1.2. Les fours rotatifs.	49
5.2.1.3. Les fours à plateaux	50
5.2.1.4. Procédé de calcination flash: Four Flash	51
5.3. Propriétés physiques des métakaolins	52
5.3.1. La masse volumique	52
5.4. La granulométrie	53
5.5. Morphologie du métakaolin	53
5.6. Surface spécifique	54
5.7. Composition chimique	54
5.8. Composition minéralogique	55
6. Le ciment naturel	56
6.1. Fabrication du ciment prompt	56

6.1.1. Matière première	56
6.1.2. La cuisson	56
6.1.3. Le broyage	57
6.2. Caractéristiques physiques des ciments naturels	58
6.3. Caractéristiques chimiques des ciments naturels	60
6.4. Les utilisations des ciments naturels	62
7. Conclusion	63

Chapitre 03 : Altération des matériaux de construction (cas de la piscine romaine)

1. Introduction	66
2. Altérations des briques	66
2.1. Désagrégation	67
2.2. Altération chromatiques	67
2.3. Les attaques biologiques	68
3. Altérations des mortiers de chaux	68
3.1. Les causes mécaniques	68
3.2. Effet de l'humidité	68
3.3. Causes biologiques	69
3.4. Causes humaines	69
3.5. Les fissurations	69
3.6. Altérations chromatiques	69
4. Les causes d'altération des mortiers	69
4.1. Les effets visibles et mesurables	69
4.2. Un manque d'adhérence	70
4.3. Une perte de dureté	70
4.4. Une porosité importante	70
4.5. La présence de fissure	70
4.6. L'absence de cohésion	71
4.7. La présence de diverses traces	71
4.8. Dégradation générale des mortiers	71
4.8.1. Effet de l'humidité	71
4.8.2. Altération chimiques	72
4.8.3. Altération physique	72
4.8.3.1. Le gel-degel	72
4.8.3.2. L'influence des sels	73
4.8.3.3. La dilatation thermique	73
4.8.4. Altérations biologiques	73
4.8.4.1. Action de la pollution atmosphérique	75
4. Altération des pierres	75
5. Les altérations des mortiers à travers les recherches bibliographiques	76
6. Conclusion	78

Partie I : Partie théorique

ETAT DES CONNAISSANCES DES MORTIERS

Cette partie est composée de trois chapitres qui présentent les généralités sur les mortiers, leurs usages et leurs évolutions à travers le temps, les matières premières utilisés dans les mortiers de chaux, ainsi que leurs altérations et dégradations. Comme l'illustre la figure (Fig. 02).

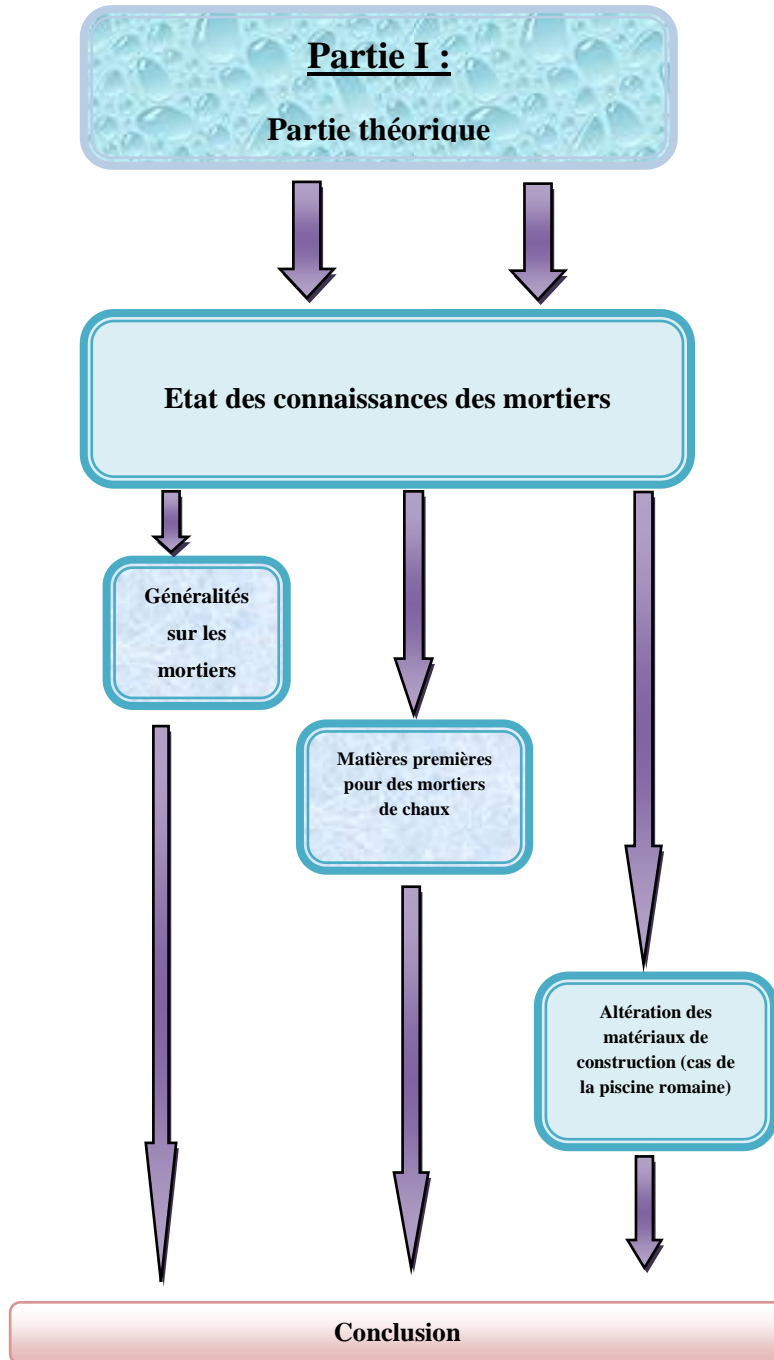


Fig.02. Plan de travail de la première partie.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES
MORTIERS

Chapitre 01 : Généralités sur les mortiers

Chapitre 01 : Généralités sur les mortiers

1. Introduction	12
2. Évolution et historique des mortiers	12
2.1. Les mortiers préhistoriques	12
2.2. Les mortiers grecs	13
2.3. Les mortiers romains	14
2.3.1. Evolution	14
2.3.2. Composition	15
2.4. Les mortiers médiévaux	18
2.5. Les mortiers modernes	19
2.5.1. Les mortiers à base des liants hydrauliques	19
2.5.2. Les mortiers à base des ciments	20
3. Les mortiers à travers la littérature	21
4. Conclusion	25

1. Introduction

L'étude et la comparaison des mortiers à base de chaux hydratée préoccupent depuis longtemps les archéologues et les historiens des monuments, car ces examens peuvent fournir de précieux renseignements pour l'interprétation archéologique et la datation relative d'un édifice, J. Mellaart (1971) ⁹. Ces mortiers montrent très souvent des différences considérables de coloration et de texture, liées à la pureté du liant, la nature, la grosseur et la répartition des grains de sable ainsi qu'à d'éventuelles interactions avec le milieu environnant. Toutefois ces différents éléments sont difficiles à chiffrer et à interpréter. Une approche plus technique et plus scientifique que le simple examen visuel auquel se limite le plus souvent l'archéologue, et qui ferait appel à la chimie, à la physique et à la minéralogie, pour lui donner des indications plus précises. Pourtant, les chercheurs qui étudient ce genre de problèmes en laboratoire sont encore rares et il semble qu'une méthodologie d'investigation rationnelle reste à préciser, V Furlan (1975) ¹⁰.

2. Évolution et historique des mortiers

2.1. Les mortiers préhistoriques

Les constructeurs préhistoriques se servaient d'argile crue, dont ils enduisaient les sols et les parois de leurs maisons faites de planches et de clayonnages. Les murets découverts lors de fouilles sont toujours faits de pierres sèches et les pavages datant de l'époque de la Tène. sont uniquement recouverts de terre battue, R.R. Schmidt (1937) ¹¹ Citant les fouilles effectuées dans l'une des plus anciennes agglomérations urbaines actuellement connues, en Turquie, dans la ville néolithique de Çatal Hüyük (environ 6000 av. J-C), le plâtre, qui recouvre tous les sols, murs et plafonds et qui sert de support aux peintures et aux animaux modelés des temples, n'est en fait que de l'argile blanche trouvée sur place et appliquée telle quelle, quant au mortier de terre utilisé pour la construction des murs, il est noir et riche en cendres et débris d'ossements, mais un véritable liant y est encore inexistant.

Cependant, d'autres campagnes de fouilles et investigations ont été effectuées sur des vases de céramique dont les décors incisés étaient remplis d'une matière blanche et dure.

(J. Hoika) ¹².

9. J. Mellaart, et al, une des premières cités du monde, Paris 1971, p. 50.

10. Furlan, Vi nicio .Les mortiers anciens : histoire et essais d'analyse scientifique, Revue suisse d'Art et d'archéologie 1975, p 2.

11. R. R. Schmidt, Établissements néolithiques dans le Fedeseemoor, Stuttgart 1937, p. 58- 67.

12. J. Hoika Einige Analyseergebnisse zur Frage der Inkrustation in Keramikverzierungen der nordischen Trichterbecherkultur, Archäologisches Korrespondenzblatt, p. 79.

Celle-ci, à l'analyse, s'est révélée être du calcaire, parfois mêlé de poudre d'ossements brûlés, de plâtre ou d'argile. Il n'a cependant pas été possible de déterminer si cette pâte blanche a été appliquée à l'origine sous forme de chaux (parfois mêlée à d'autres éléments) qui se serait régulièrement carbonatée, ou s'il s'agissait simplement de calcaire finement pilé et rendu pâteux par l'adjonction de corps gras ou d'autres matières organiques qui auraient pu servir de «colle».

2.2. Les mortiers grecs

Des travaux de fouilles ont attesté que les constructeurs grecs connaissaient les liants artificiels depuis une époque très reculée, M. Daumas (1962)¹³.

Dès le VII^e siècle av. J.-C. les architectes grecs eurent généralement recours à la technique des stucs et revêtements pour dissimuler l'aspect rude de certains matériaux comme le tuf et le calcaire. Mais le mortier de chaux n'a été utilisé en Grèce pour la construction des murs qu'à partir de la fin du II^{ème} ou du début du I^{er} siècle av. J.-C. (maisons de Délos et de Théra). Dans les constructions antérieures, les pierres étaient liées par un mortier simplement fait de terre et d'argile, A. Orlandos (1968)¹⁴.

De façon générale, les mortiers helléniques sont à base de chaux et de sable fin, les stucs à base de chaux, de plâtre et de poudre de marbre. Mais, selon les nécessités du moment, des adjuvants ont parfois été additionnés pour rendre le mortier plus dur et plus stable. A Théra, l'on introduisait dans le mélange chaux-sable de la poudre volcanique ou de la «terre de Santorin» exploitée sur l'île. On obtenait ainsi des mortiers stables à l'eau et dont les propriétés ont une certaine analogie avec les mortiers modernes à base de liants hydrauliques. Ce procédé était également connu hors de l'île, puisqu'on a trouvé de cette «Terre de Santorin» dans les stucs qui ornaient l'Héphaïstéion d'Athènes. Ailleurs, à défaut de roche volcanique, on utilisait de la tuile ou brique pilée, ainsi qu'en témoigne la coloration rose de certains enduits extérieurs. Le premier emploi connu de tuileau remonte à l'époque de la construction des citernes de Jérusalem. Cet usage semble avoir été introduit par des ouvriers phéniciens qui connaissaient donc empiriquement les propriétés des matériaux qu'on appelle aujourd'hui pouzzolanes artificielles.

13. M. Daumas, Histoire générale des techniques, Paris PUF 1962, p. 403.

14. A. Orlandos, Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs, Paris vol2, (1968), p. 13.

2.3. Les mortiers romains

La civilisation romaine a amélioré les procédés de fabrication de la chaux et les techniques de mise en œuvre du mortier, elle a su exploiter toutes les possibilités de ce matériau, elle a répandu à cette nouvelle technique dans tout l'Empire. Une des plus anciennes mentions de l'«opus caementicum » se trouve chez Caton (II^e siècle av. J.-C) qui décrit déjà une construction «ex calce et caementis» (D.R. Caton) (1961)¹⁵. La date exacte de l'introduction du mortier de chaux à Rome n'est pas connue, mais on sait que cette technique a été utilisée dès les deux derniers siècles de la République (II^e et I^{er} siècle av. J.-C), qu'elle se développa et se généralisa rapidement, supplantant les systèmes précédemment utilisés, tels que l'«opus quadratum» (gros blocs ajustés sans mortier) et l'«opus latericium» primitif, en «later crudus » ou briques séchées. G. Lugli (1957)¹⁶.

2.3.1. Evolution

Vitruve est la source la plus complète pour l'étude des éléments constitutifs du mortier de chaux romain (I^{er} siècle après J.-C). Par lui nous savons que le mélange des matériaux se faisait dans la proportion de: une unité de chaux pour trois de sable, ou de deux pour cinq, selon la qualité du sable. P. M. Vitruve (1971)¹⁷.

Mais outre ces éléments de base, il mentionne aussi l'emploi d'adjuvants déjà utilisés par les Grecs tels que la cendre volcanique ou la tuile pilée (tuileau). En effet, les Romains ont pratiqués à grande échelle l'adjonction à la chaux d'argile cuite et surtout de pouzzolane (roche volcanique provenant des gisements découverts à Pozzuoli près de Naples) qui confère au mortier des propriétés hydrauliques. Mais outre ces caractéristiques de composition, le mortier romain doit aussi son exceptionnelle qualité au soin avec lequel on choisissait et mélangeait ses éléments constitutifs. Ce mortier était utilisé massivement pour noyer un blocage de galets de toutes dimensions au cœur des murs, formant ainsi un béton compact entre les deux parements appareillés. Toute cette masse était tassée avec des pilons, de manière à remplir absolument tous les interstices, à chasser la moindre bulle d'air. M. Daumas (1962)¹⁸.

15. D.R. Caton, *De re rustica*. Les agronomes latins, Paris 1861.

16. G. Lugli, *La technica edilizia romana con particolare riguardo a Roma et Lazio*, Roma 1957, vol. I—II.

17. P. M. Vitruve, *OEuvres complètes*, Ed. Et trad, par Auguste Choisy, Paris 1971, 2 vol., 1.1, chap. II, V, VI, t. II, chap. IV, VI.

18. M. Daumas, *Histoire générale des techniques*, Paris PUF 1962, Tome. I, p. 220.

Par la suite, l'exceptionnelle qualité des mortiers romains a fait naître une sorte de légende. On a prétendu, en effet, que cette qualité était liée à des secrets de fabrication et notamment à des adjonctions très spéciales. Il est possible que, pour des usages particuliers (certissage de mosaïques, enduits soumis à l'action de l'eau, etc.), les constructeurs romains aient fait usage d'additifs tels que l'albumine et la caséine. L'utilisation d'urée et d'huiles n'est pas non plus exclue. Cependant, la plupart des auteurs, C. Granges (1894)¹⁹. Par exemple, pensent qu'il n'y a jamais eu d'autres secrets. Car si de tels secrets existaient, ils auraient sans doute été transmis par la tradition. Tout porte donc à croire que la qualité des mortiers romains tient essentiellement à la parfaite cuisson et extinction de la chaux, à l'homogénéité des mélanges et à la mise en œuvre particulièrement soignée.

2.3.2. Composition

Les recherches réalisées sur les mortiers anciens, antiques ou médiévaux, montrent que les chaux utilisées étaient assez systématiquement de nature aérienne, c'est-à-dire obtenues par la calcination, vers 800 à 900 °C, de calcaires contenant donc très peu d'impuretés argileuses (Coutelas) (2009)²⁰. Cet usage privilégié des chaux aériennes paraît être un écho aux préconisations de Vitruve qui, pour faire un bon mortier de maçonnerie, recommande d'utiliser les pierres les plus dures et les plus blanches possibles pour la fabrication des chaux (Vitruve) (1995)²¹. Ces chaux aériennes conviennent parfaitement à la construction de maçonneries hors sol, qui ont besoin de « respirer ».

Mais dans certaines fonctions architecturales particulières, l'utilisation d'un mortier aux propriétés spécifiques apparaît nécessaire. C'est particulièrement le cas de ceux utilisés dans les constructions liées à l'eau (citernes, bassins, canalisations) ou fortement exposées aux intempéries (toitures) et qui doivent, de fait, présenter une certaine étanchéité. C'est aussi le cas des mortiers qui vont être soumis à d'importantes contraintes mécaniques, comme ceux constituant les sols ou les soubassements des édifices (Deloye) (1993)²².

Les chaux hydrauliques naturelles répondent à ces caractéristiques. Celles-ci sont élaborées en calcinant des calcaires contenant de 8 à 20 % d'impuretés argileuses. Se forment alors des silicates, aluminosilicates et ferrosilicates de calcium qui, au contact de l'eau, constituent des insolubles conférant à la chaux des propriétés hydrauliques.

19. C. Granges, Chaux et sels de chaux, Paris, (1894).

20. Coutelas A., Büttner S., Oberlin C., Palazzo-Bertholon B., Prigent D., Sumera F., Le mortier de chaux, Paris, Errance. (2009).

21. Vitruve, De architectura : les dix livres d'architecture, Poitiers, Picon.LII, 1995, p 5

22. Deloye F.-X., « Hydraulicité et pouzzolanité », Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et chaussées, no 184, (1993), p. 94-95.

Le mortier constitué à partir de cette chaux a pour propriété de pouvoir « durcir » sous l'eau – d'où le qualificatif « hydraulique », en effet, contrairement au mortier de chaux aérienne, sa prise ne nécessite pas la présence de dioxyde de carbone et peut donc se faire en absence d'air. Ce mortier présente effectivement une certaine étanchéité et une bonne résistance mécanique. Cependant, pour obtenir une chaux hydraulique de bonne qualité, les températures à atteindre doivent dépasser les 1 000 °C et, en réalité, les technologies de calcination alors exigées ne seront véritablement et pleinement maîtrisées qu'à partir du (XVIII^e siècle). C'est la raison pour laquelle les rares mortiers de chaux hydraulique artificielle identifiés dans des maçonneries anciennes, souvent de piètre qualité, sont plutôt à considérer comme un fait exceptionnel, voire accidentel, et sont surtout liés à la faible variabilité des faciès géologiques dans l'environnement proximal du chantier. (Hughes) (1999) ²³.

Vitruve évoque cependant certains adjuvants qui, associés à une chaux aérienne, permettent d'obtenir un mortier aux propriétés hydrauliques. Il faut alors insister sur le terme de « mortier hydraulique », car ce n'est pas la chaux qui présente intrinsèquement ces qualités, mais la préparation dans son ensemble, du fait de l'ajout de certains composants. C'est d'abord le cas des pouzzolanes, scories volcaniques, nombreuses à proximité du Vésuve, région bien connue de Vitruve.

Celui-ci soulignait que mêlées « à la chaux et aux moellons, non seulement elles assurent la solidité des différentes constructions, mais plus particulièrement aussi, [elles font] s'affermir sous l'eau la maçonnerie des digues de mer».

Comme l'architecte antique le fait remarquer, sans bien évidemment établir un parallèle chimique, c'est aussi le cas des argiles cuites qui composent les tuiles ou briques et que l'on retrouve fréquemment broyées dans certains mortiers : les fameux mortiers de tuileau. L'ajout de fragments de terre cuite à la chaux hydratée engendre effectivement une réaction que l'on qualifie de « pouzzolanique » du fait de la similitude avec celle provoquée par les scories volcaniques (Dron) (1978) ²⁴.

23. Hughes J. J. et Sugden D, « The use of brick dust as a pozzolanic addition to hydraulic lime mortars », International RILEM Workshop on Historic mortars : characteristics and tests, Paris, RILEM, (1999), p. 351-360.

24. Dron R, « L'activité pouzzolanique », Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et chaussées, no 93, (1978), p. 66-69.

Le processus a été très bien décrit par certains auteurs : les argiles cuites, à l'instar des pouzzolanes, deviennent des verres amorphes, qui conservent une forte teneur en silice et en alumine et qui peuvent réagir rapidement avec le carbonate de calcium (la chaux aérienne) en présence d'eau (l'eau de gâchage) et à température ambiante.

Cependant, de récentes études montrent que la nature de la matière première (nature de l'argile) et surtout les températures de cuisson vont jouer un rôle sur les propriétés pouzzolaniques des terres cuites : il a été ainsi démontré que des températures dépassant les 900° C les annihilent. De fait, tous les fragments de terre cuite ne vont pas nécessairement engendrer la réaction recherchée. D'autres analyses montrent que cet ajout de tuileau à une chaux aérienne augmente bel et bien la résistance mécanique du mortier . Mais elles révèlent surtout que plus le broyat est fin – c'est-à-dire plus la surface spécifique de contact entre la chaux et les composants pouzzolaniques est importante – plus la rapidité de prise et la durabilité du produit augmentent. C'est particulièrement le cas des mortiers « roses », composés de chaux aérienne et de tuileau fin, qui sont en fait les seuls mortiers parfaitement étanches ; ils apparaissent aussi davantage résistants aux contraintes mécaniques. À l'inverse, l'utilisation d'un broyat de tuileau grossier, fait très fréquent dans certains mortiers anciens, réduit la surface spécifique de réaction. Dans ce cas, les réactions pouzzolaniques sont limitées aux seules bordures des fragments de terre cuite. (Coutelas) (2009) ²⁵. Cependant, cette zone de réaction peut suffire à conférer une remarquable résistance globale au produit fini et justifier son usage dans des fonctions architecturales particulières.

Les qualités d'un mortier de tuileaux dépendent donc de ces paramètres liés à la chimie et à la physique des matériaux. Ces principes n'apparaissent pas dans les traités d'art à bâtir. Vitruve, en particulier, ne parle que de proportions et n'évoque pas la dimension des tuileaux, ni la nature des argiles cuites. Et pour autant, dans certaines réalisations anciennes, la prise en compte effective de ces principes par les maçons indique qu'ils ont été acquis vraisemblablement par expérimentation et/ou transmission. Il semble donc que chaque artisan possède un savoir-faire, propre ou hérité, qui lui permet de maîtriser toute la chaîne opératoire : la qualité des matières premières (pierre à chaux, tuileau), leur conditionnement (cuisson, broyage) et leur dosage.

25. Coutelas A., Büttner S., Oberlin C., Palazzo-Bertholon B., Prigent D., Sumera F., , Le mortier de chaux, Paris, Errance. (2009).

2.4. Les mortiers médiévaux

Bien que les mortiers médiévaux soient encore très mal connus, il semble qu'aucun progrès technique remarquable n'ait été réalisé pendant cette période. Après l'éclatement de l'Empire romain, il est difficile de conserver une vue d'ensemble de cette évolution, car à la suite des grandes invasions, chaque pays, chaque région a désormais suivi sa propre voie. Dès lors les mortiers varient eux aussi beaucoup de lieu en lieu, d'époque en époque. Furlan (1975)²⁶.

Pour les IXe, Xe et XIe siècles. On trouve des mortiers généralement de qualité très médiocre, malgré parfois la présence de tuileau. (Il est à noter que le tuileau peut avoir deux fonctions bien distinctes par leur nature poreuse, les petits fragments de terre cuite rendent les mortiers plus perméables à l'air et permettent ainsi une meilleure carbonatation de la chaux. D'autre part, certaines argiles cuites peuvent avoir une activité pouzzolanique.

E. Hennig et al (1970)²⁷ ont permis d'établir le non-fondé de certaines croyances persistantes, au sujet de protéines animales qui auraient été incorporées aux mortiers médiévaux. En effet, l'adjonction de substances telles que blanc d'œufs, lait, caséine ou sang n'est pas attestée dans la littérature historique; d'autre part, ces chercheurs ont examiné des échantillons de mortier datés du XIe au XVIIe siècle. Jamais ils n'ont pu établir la présence de matières organiques. Par contre, l'adjonction de plâtre ou de tuileau a été prouvée, car ce sont là, nous l'avons vu, des additifs classiques. A. Naefv (1908)²⁸, a relevé que les maçons d'autrefois ont utilisé très souvent un liant à base de plâtre. L'usage en remonte à une très haute antiquité et fut très fréquent, presque général, jusqu'au milieu du XIIIe siècle, non seulement pour les enduits, mais encore pour les encadrements et les sièges de baies. Il s'agit d'un béton coulé, mélangé de quartiers de tuf et de cailloux de diverses grosseurs, très petits pour les sols, assez gros pour les supports mais toujours noyés dans la masse et non pas appareillés, ni régulièrement maçonnés. Ce système de construction coulée est peut être une réminiscence des procédés romains.

26. Furlan, Vi nicio .Les mortiers anciens : histoire et essais d'analyse scientifique, Revue suisse d'Art et d'archéologie 1975, p 4.

27. E. Hennig, et R.D. Bleck. W. Horn, The potential and limitations of Radiocarbon dating in the Middle Ages; the art historians view, Scientific Methods in Medieval archaeology, University of California Press .(1970).

28. A. Naef, Chillon. T.I: La Camera Domini, Genève 1908, p. 50.

2.5. Les mortiers modernes

2.5.1. Les mortiers à base des liants hydrauliques

La découverte des liants hydrauliques remonte à 1756. La présence de la chaux et du calcaire qui puissent résister à l'action de l'eau de mer. Des analyses chimiques ayant démontré aussi la présence d'argile, il en conclut que «la présence d'argile dans le calcaire doit être l'un des facteurs principaux sinon le seul qui détermine l'hydraulicité». L'influence de la tradition romaine a probablement retardé la découverte des liants hydrauliques, car dans la littérature romaine on insiste sur le fait que pour obtenir une bonne chaux il faut partir d'un calcaire très pur. Par conséquent les calcaires argileux étaient systématiquement bannis. Vers 1812, Vicat étudie des mélanges de calcaires purs et d'argiles et démontre définitivement que les propriétés hydrauliques dépendent des composés qui se forment pendant la cuisson entre la chaux et les constituants de l'argile. En effet, sous l'action de la chaleur, il y a tout d'abord déshydratation de l'argile puis décomposition du calcaire et enfin combinaison entre la chaux, la silice et les oxydes de fer et d'alumine. Suivant la teneur en argile, la température et la durée de cuisson, la réaction est plus ou moins complète et les produits obtenus plus ou moins hydrauliques. Furlan. V (1975)²⁹. Les premiers liants ainsi créés avaient le plus souvent les caractéristiques des ciments prompts actuels (ciments naturels). Ils étaient généralement riches en aluminates et de ce fait caractérisés par une prise très rapide. Cette dernière n'est plus due à la dessiccation du mortier et à la carbonatation de la chaux, mais à la réaction des aluminates et des silicates avec l'eau. Elle peut donc très bien avoir lieu à l'abri de l'air. Les travaux de Vicat, en s'écartant de l'empirisme de ses prédécesseurs, constituent les véritables bases scientifiques qui fixent les règles de fabrication et d'emploi des chaux hydrauliques. E. Marcotte (1929)³⁰.

Celles ci peuvent être considérées comme des produits intermédiaires entre la chaux hydratée et le ciment Portland actuel. En effet, avec les constituants hydrauliques, elles présentent toujours une teneur élevée en chaux libre et de ce fait doivent être soumises à extinction. Cette opération, qui consiste à hydrater l'oxyde de calcium libre, doit être faite avec une quantité modérée d'eau, pour éviter l'hydratation de constituants hydrauliques. Il s'agit là d'un processus qui était mal maîtrisé par les précurseurs de Vicat.

29. Furlan, Vi nicio .Les mortiers anciens : histoire et essais d'analyse scientifique, Revue suisse d'Art et d'archéologie1975, p 5.

30. E. Marcotte, Liants, chaux, ciments, plâtres, goudrons et bitumes, Paris 1929, p. 3-4.

2.5.2. Les mortiers à base des ciments

Joseph Aspdin, un maçon de Wakefield, prend en 1824 un brevet pour le ciment qu'il produit, ciment qu'il affirme être «aussi dur que la pierre de Portland». (Ce sera là l'origine de l'appellation «ciment Portland», actuellement donnée au ciment courant, bien que la nature et les caractéristiques de ce dernier soient très différentes.) L.C.Johnson découvre que le «clinker», obtenu par fusion partielle des éléments constitutifs de la matière première surchauffée et que jusqu'alors on avait toujours jeté comme déchet inutilisable, donne des résultats bien meilleurs que le ciment usuel, à condition d'être finement broyé. C'est le produit provenant de la mouture de clinker obtenu par calcination à environ 1450 °C, et additionné d'une faible quantité de gypse, que nous appelons aujourd'hui ciment Portland. L'Exposition universelle de 1851, en permettant une démonstration du nouveau produit, lui a donné une grande publicité. Dès ce moment, la plupart des fabricants de liants pratiquent la calcination à haute température, et la chaux, de plus en plus, sera remplacée par le ciment. (E. Universalis)³¹. Depuis la fin du XIXe siècle, les principes généraux de fabrication du ciment Portland n'ont guère changé. Cependant, on a assisté à une évolution technique et scientifique très importante. Cette évolution, en élargissant les connaissances scientifiques de base, a notamment permis la découverte de toute une gamme de liants dérivés du Portland (Portland spéciaux), de liants de mélange (ciments pouzzolaniques, métallurgiques, etc..) et de liants tout à fait spéciaux (alumineux). Ceci d'une part pour pallier à certaines insuffisances du ciment Portland et, d'autre part, pour mieux satisfaire à d'autres exigences. D'une manière générale, on peut aisément faire la distinction entre un mortier à la chaux hydratée et un mortier à base d'un liant hydraulique. utilisé. Toutefois, cette distinction très nette n'est que rarement utile à l'archéologue et à l'historien, la découverte des liants hydrauliques étant toute récente. Etant donné l'intérêt croissant que les historiens d'art portent à l'architecture du XIXe siècle, ces distinctions très nettes pourront certainement rendre de grands services pour cette période et permettront de préciser les méthodes de datation. Furlan, V (1975)³²

L'examen microscopique permet notamment de reconnaître le type de liant hydraulique

31. Encyclopedia Universalis, cf. article ciment, p. 493.

32. Furlan, Vi nicio .Les mortiers anciens : histoire et essais d'analyse scientifique, Revue suisse d'Art et d'archéologie1975, p 6.

3. Les mortiers à travers la littérature

Les travaux de (N.A. Mahindad, M. Hamiane et al) (2010)³³, ont été portés principalement sur les mortiers utilisés dans les bâtiments à l'époque ottomane. Des d'essais en laboratoire ont été effectués sur des échantillons de mortiers collectés in situ (Citadelle d' Alger Casbah d'Alger, Djenane Mahieddine), pour déterminer leurs caractéristiques physiques, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs résultats ont montrés que ces mortiers sont à base de chaux et d'argile comme il a été mentionné dans les documents et archives de l'époque ottomane.

On trouve aussi les travaux de (Messaoud Hamiane, S.Aitouakli et al) (2010)³⁴ portés sur la formulation des mortiers à base de chaux aérienne et chaux hydraulique pour la restauration de monument historique qui remonte a l'époque ottomane (villa Mahiédinne d'Alger) figure (Fig.3), leurs résultats ont montrés que le mortier à base de chaux aérienne semble être le plus appropriée ou le plus proche de la maçonnerie historique



Fig.3. Villa Mahiédinne d'Alger. ³⁴

33. Naima Abderrahim Mahindad and Messaoud Hamiane, 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, Prague, Czech Republic, 22-24 September (2010).

34. Messaoud Hamiane, S.Aitouakli, L.Boumghar, W.Zekagh and M.Saidi, 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, Prague, Czech Republic, 22-24 September (2010).

Le travail de mené par (C. Borges, et al) ³⁵ qui présente les résultats de caractérisation des mortiers de deux monuments historique: la forteresse de Santa Marta à Cascais, près de la côte atlantique, et du mur de défense de la ville de Lisbonne, figure (Fig.4) dans laquelle les mortiers à la chaux ont été utilisés dans des conditions environnementales sévères. Leurs résultats ont montrés que les mortiers qui ont été exposés à un environnement marin sévère et avec les énormes entrées de sel conservent une durabilité remarquable, qui pourrait être liée à la combinaison de sel avec les composés de silicates et aluminate de calcium formé dans de vieux mortiers en présence d'eau.



Fig.4.la forteresse de Santa Marta à Cascais et le mur de défense de la ville de Lisbonne .³⁵

Dans le travail aussi de (M. Hamiane, M. Belaidi et al) (2013) ³⁶, une étude comparative des mortiers a base de chaux formulés in situ et d'autres formulés au laboratoire, les résultats ont montrés que ceux préparés au laboratoire ont les meilleurs caractéristiques physiques et mécaniques, et présentent une bonne compatibilité avec l'ancien bâtis. (La citadelle d'Alger). figure (Fig.5)

35. Cristina Borges, Antonio Santos Silva and Maria do Rosário Veiga, 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, Prague, Czech Republic, 22-24 September (2010).

36. M. Hamiane, M. Belaidi, M. Saidi, W. Zekagh, B. Benacer, The characteristics and evolution of different lime plasters used in historical monuments (Case Study - the citadel of Algiers),3rd Historic Mortars Conference 11-14 September, Glasgow, Scotland, (2013).



Fig.5. Application des mortiers in-situ (La citadelle d'Alger).³⁷

Le travail aussi de (M.Hamiane, N. Mahinded et al) (2016)³⁸, qui à été focalisé sur l'étude des mortiers de 4 site archéologiques en Algérie, site de Djamilia de la période romaine, site de Timgad de la période Byzantine, les sites de la Casaba et la Citadelle d'Alger de la période Ottomane. Leurs résultats ont confirmés la différence des étapes historiques de la construction.

37. M. Belaidi, directeur de these M.Hamiane. Etude des caractéristiques des mortiers de chaux pour l'utiliser dans la restauration, cas de la Citadelle d'Alger, mémoire de magister ,Université d'Alger 2, Institut d'archéologie, 2012.

38. M.Hamiane, N. Mahinded, S. Dressi, A. Boukenouf, W.Zekar,M.Saidi, Characterisation of historic mortars, case of Roman, Byzantine and Ottoman periods in Algeria, 4th Historic Mortars Conference - HMC 2016 ,10-12 October , Santorini, Greece, (2016).

Des nouvelles investigations ont été menées sur ces types de mortiers telles que rapporté dans différents travaux issus de la littérature scientifique. En effet, il a été confirmé par les résultats que l'ajout du métakaolin à la chaux, provoquent des écarts considérables dans les propriétés physiques et mécaniques des mortiers obtenus. On peut également citer les travaux de (Jan Válek et al) (2012)³⁹, qui ont étudié la variation de quelques paramètres influençant les propriétés de ce type de mortiers. Leurs résultats montrent que les mortiers contenant de la chaux et le métakaolin comme liant peuvent atteindre des meilleures valeurs des résistances à la compression à 90 jours.

Ces investigations ont ouvert le champ sur de nouvelles connaissances et perceptions du matériau à travers des approches scientifiques et analytiques.

Récemment, une étude (M.A.O. Mydin) (2018)⁴⁰ est consacrée à l'effet de l'albumine d'œuf (ajout organique utilisé comme adjuvant naturel) sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers de chaux. Les résultats obtenus indiquent que la résistance à la compression et à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage d'albumine d'œuf ajouté à la chaux. De plus, l'étude de (M.Hamiane et al) (2013)⁴¹, a été mener sur l'étude de caractère hydrofuge des mortier a base de chaux avec l'utilisation d'un adjuvant naturel qui est l'huile d'olive, Les résultats ont montré une grande amélioration de l'absorption d'eau. Un autre travail de (Eleni Aggelakopoulou et al) (2019)⁴² a été porté sur la porosimétrie, et l'absorption d'eau par capillarité ou par immersion totale dans l'eau des mortiers élaborés par la chaux en pâte et d'autres élaborés par la chaux en poudre. Les résultats ont montré que les mortiers en poudre de chaux présentent une distribution des pores unimodale, tandis que les mortiers en pâtes de chaux en présentent un bimodale.

38. E. Vejmelková, M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner, R. Černý, Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar. *Cem. Concr. Compos.*, 34(4) (2012), p 486-492.

39. J. Válek, T. Matas. *Experimental Study of Hot Mixed Mortars in Comparison with Lime Putty and Hydrate Mortars*. Dordrecht: Springer Netherlands. (2012), p269-281.

40. M.A.O. Mydin, Physico-mechanical properties of lime mortar by adding exerted egg albumen for plastering work in conservation work. *J. Mater. Environ. Sci.*, 9(2) (2018) 376-384.

41. M.Hamiane, M.Belaidi, M.SAIDI, B.B. W. Zekagh. The characteristics and evolution of different lime plasters used in historical monuments (Case Study - the citadel of Algiers) in *Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13*. Glasgow, Scotland (UK): University of the West of Scotland. (2013), p 233-239.

42. E. Aggelakopoulou, A. Bakolas, A. Moropoulou, Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. *Constr. Build. Mater.* 225 (2019) , p 633-641.

4. Conclusion

Les mortiers antiques présentent un intérêt autre qu'archéologique, ils sont la preuve de l'existence de matériaux artificiels qui ont traversé les siècles

Le mortier romain fait part de ces mortiers, les recherches à travers la littérature, nous renseignent sur la composition de ces mortiers et leurs évolutions. On trouve à travers ces écrits, le transfert d'un savoir faire et même d'une technologie de l'antiquité a nos jours.

Faisant appel à de la chaux de qualité, le mortier de tuileau (mortier romain), est un matériau aux propriétés particulières présente une exceptionnelle durabilité, qui explique certainement le bon état de conservation des structures maçonnées qu'il constitue.

CHAPITRE 02
MATIERES PREMIERES POUR
DES MORTIERS DE CHAUX

Chapitre 02 : matières premières pour des mortiers de chaux

1. Introduction	28
2. La chaux	28
2.1. La fabrication de la chaux	28
2.1.1. La calcination	28
2.2. L'extinction	31
2.3. La carbonatation	33
3. Les recettes antiques	37
4. La pouzzolane	41
4.1. L'activité pouzzolanique	41
4.2. Les terres cuites (pouzzolanes artificielles)	42
5. Le métakaolin	46
5.1. Définition	46
5.2. Obtention des méta kaolins	46
5.2.1. Procédé de Calcination	49
5.2.1.1. Procède de Calcination : traditionnelle (Four rotatif ou à lit circulant)	49
5.2.1.2. Les fours rotatifs.	49
5.2.1.3. Les fours à plateaux	50
5.2.1.4. Procédé de calcination flash: Four Flash	51
5.3. Propriétés physiques des métakaolins	52
5.3.1. La masse volumique	52
5.4. La granulométrie	53
5.5. Morphologie du métakaolin	53
5.6. Surface spécifique	54
5.7. Composition chimique	54
5.8. Composition minéralogique	55
6. Le ciment naturel	56
6.1. Fabrication du ciment prompt	56
6.1.1. Matière première	56
6.1.2. La cuisson	56
6.1.3. Le broyage	57
6.2. Caractéristiques physiques des ciments naturels	58
6.3. Caractéristiques chimiques des ciments naturels	60
6.4. Les utilisations des ciments naturels	62
7. Conclusion	63

1. Introduction

La préparation d'un mortier de chaux répond à des principes généraux qui n'ont pas évolués depuis les origines de ce matériau. Le mortier est un agglomérat artificiel de grains de sable réunis par un liant (chaux ou ciment), utilisé pour lier les éléments d'une construction ou pour faire des enduits. (Diderot, D'Alembert, l'Encyclopédie)⁴³.

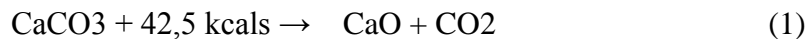
2. La chaux

La chaux est obtenue par cuisson des roches calcaires à une température d'environ 1000°C. Les roches calcaires naturelles contiennent souvent des impuretés en particulier argileuses, selon le degré de pureté des calcaires utilisés on peut avoir de la chaux aérienne ou hydraulique.

2.1. La fabrication de la chaux

2.1.1. La calcination

La chaux est un produit obtenu à partir de la calcination d'une roche carbonatée à une température minimale de 830°C pour une pression de 1 atmosphère (pression atmosphérique normale). Il se produit une réaction endothermique (1) :



Le dégagement de dioxyde de carbone entraîne une perte de poids importante, jusqu'à 44 % de la masse initiale. Le volume est en revanche conservé. L'oxyde de calcium restant est appelé chaux vive (la calce viva de Vitruve, De Architectura, VIII, 8).

La composition minéralogique de la chaux vive dépendra directement de la température de cuisson et de la nature de la pierre à chaux (le calcaire). Globalement, pour chaque type de calcaire, le taux de silice soluble augmente avec la température de cuisson et qu'à 900°C les chaux contenaient encore 20 à 30 % de carbonates. La décarbonatation des roches mères, ou plutôt la disparition totale de la calcite, intervient aux environs de 1000°C, et la nature des « impuretés » présentes dans ces chaux calcinées à haute température dépend plus de la température de cuisson que de la nature des minéraux accessoires des roches carbonatées (Bernard *et al.* 1975)⁴⁴.

43. Diderot.M, D'alembert (1751-1772.). Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences des arts et des métiers, Le Breton, Durand, David l'aine et Briasson, Paris.

44. Bernard A., Millet J., Hommey R. et Poindefert A. Influence de la température de cuisson et de la nature du calcaire sur la minéralogie des chaux vives. Bull. liaison Labo. P. et Ch., (1975), p 79, 45-50.

La cuisson du calcaire s'effectue dans un four à chaux. Ce procédé est décrit par Caton l'Ancien vers 160 av. J.-C. (*De fornace calcaria*). Il commence par la description de la construction du four (Fig.6).

« Faites le four à chaux large de dix pieds [2,957 mètres], haut de vingt ; au sommet, réduisez la largeur à trois pieds. Si vous cuisez avec une seule bouche, ménagez une grande cavité à l'intérieur suffisante pour contenir la cendre, de façon qu'il n'y ait pas à la sortir, et construisez bien le four ; faites en sorte que la sole [le sol du foyer] occupe toute l'étendue inférieure du four. Si vous cuisez avec deux bouches, il ne sera nullement besoin d'un vide ; quand il sera besoin de sortir la cendre, sortez-la par une bouche, le feu sera maintenu dans l'autre. (...) Quand vous ferez le four, donnez au puits une pente raide, quand vous aurez creusé suffisamment, disposez l'emplacement du foyer de sorte qu'il soit le plus profond et le moins exposé au vent possible ; si vous n'avez pas d'emplacement pour faire un four assez profond, construisez le haut en briques ou en moellons, avec du mortier. Enduisez le haut extérieurement. Quand vous aurez allumé, si la flamme sort ailleurs que par l'orifice circulaire du haut, colmatez avec du mortier. » (Traduction R. Goujard)⁴⁵.

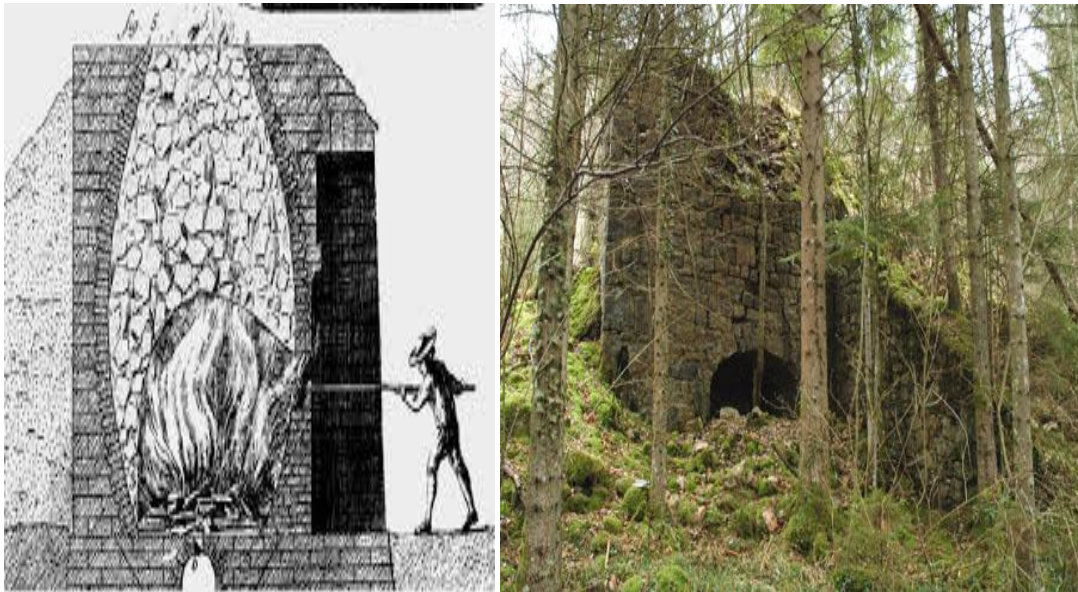


Fig.6. four à chaux st-Claude .

Voici ensuite ce qu'il dit sur son fonctionnement :

« Prenez garde à ne jamais laisser le feu s'éteindre ; prenez garde qu'il ne s'éteigne ni la nuit ni à aucun moment. Chargez le four avec de bonnes pierres, les plus blanches et les moins tachetées possible. (...) Voici ce qui indiquera quand la chaux sera cuite.

45. Coutelas, (La description de Caton l'ancien, trad. R.Goujard est reportée dans, *De Agri Cultural*, Paris, Société d'édition Les Belles Lettres, coll. «Universités de France», (1975).

Il faudra que les pierres du haut soient cuites ; de plus, les pierres du bas, cuites, s'affaîsseront, et la flamme donnera moins de fumée. »

De nombreuses variétés de combustibles peuvent être employées, mais la préférence devait aller au bois, et principalement à ceux qui laissent échapper rapidement leur gaz inflammable. Le choix du combustible privilégiait toutefois l'environnement immédiat. Progressivement monter la température, pour éviter tout phénomène d'éclatement des blocs calcaires et donc l'écroulement du remplissage du four. Le travail nécessitait un réel savoir faire, les chauxfourniers étaient des artisans spécialisés (Lavergne et Suméra 2000)⁴⁶.

Il semble acquis que les fours à chaux étaient préférentiellement implantés à proximité des lieux d'extraction du calcaire, pour une raison simple : le transport de la chaux vive est plus rentable puisqu'il y a perte de masse du matériau suite à la calcination. Toutefois, des indices archéologiques montrent l'éventualité de productions artisanales de chaux par des batteries de fours dans des contextes ruraux. Il se pourrait aussi que l'importance de certains chantiers ait nécessité la présence de chauxfourniers sur place (Coulthard 2000)⁴⁷.

Il existe une autre méthode de cuisson de la roche carbonatée. La cuisson à courte flamme, qui nécessite l'empilement préalable dans la chambre de chauffe de couches alternées de pierres et de combustible à ignition lente (charbon de bois). Les matériaux récupérés après cette cuisson devaient être soigneusement criblés afin d'éliminer les résidus de combustion (ce qui est vrai aussi pour l'autre méthode). Il est fort probable que ce tri se faisait lors de la phase d'extinction (cf. infra), les charbons de bois flottant à la surface de la fosse. (Adam 1995)⁴⁸.

46. Lavergne D. et Sumera F. (2000) .La fabrication de la chaux : une activité pérenne ou occasionnelle pendant l'Antiquité gallo-romaine ? Premiers éléments de réponse. In Pétrequin P., Fluzin P. Thiriot J. et BenoitP. (dir.) – *Arts du feu et productions artisanales*. XXe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 21-23 octobre 1999. Editions APDCA, Antibes, 453-472.

47. Coulthard N. Les activités artisanales gallo-romaines à Touffréville (Calvados, France), et quelques réflexions sur leur importance dans le développement du site. In POLFER M. dir. – *Artisanat et productions artisanales en milieu rural dans les provinces du nord-ouest de l'Empire romain*. Actes du colloque d'Erpeldange, mars (2000). Monographies *instrumentum* 9, éditions Monique Mergoil, 165-183.

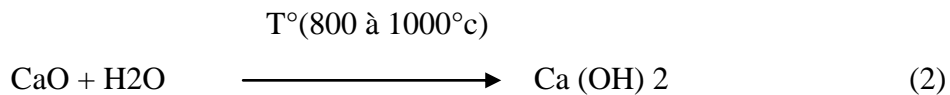
48. Adam J.-P. *La construction romaine : matériaux et techniques*. 3ème édition. Grands manuels Picard, éditions A. et J. Picard. (1995).

2.2. L'extinction

La chaux vive est un produit instable, considéré comme dangereux car elle a pleine d'affinité. Les chaux vives les plus réactives sont obtenues après calcination du calcaire à une température de 900°C (il n'y aurait donc pas disparition totale de la calcite), la surface spécifique totale de la chaux vive étant optimale pour cette température, c'est pour cela que les fours traditionnels, utilisant le bois et les charbons de bois comme combustible, produisent encore des chaux d'excellente qualité (Moropoulou et al. 2001)⁴⁹.

L'extinction de la chaux est perçue ordinairement comme une nécessité dans la chaîne opératoire de la fabrication du mortier pour éviter des phénomènes de gonflement et de dislocation après la prise.

L'extinction de la chaux vive est une réaction d'hydratation (2) :



Cette réaction est exothermique, la température du mélange peut s'élever jusqu'à 400°C, mais elle est généralement comprise entre 150 et 200°C. On observe alors souvent le foisonnement de la chaux vive, c'est-à-dire, pratiquement, la désagrégation des blocs de chaux vive en une poudre fine, blanche et sèche.

La chaux éteinte. C'est cette poudre qui servira pour la préparation du mortier. Cependant, on ne peut totalement écarter l'hypothèse de l'utilisation de chaux vive pour la préparation de mortier puisque Vitruve semble la conseiller pour au moins deux types d'ouvrages hydrauliques : les citernes et les joints des tuyaux de terre cuite dans les canalisations. Dans sa recommandation pour les joints de tuyaux, Vitruve emploie le terme « *calce viva* » qu'il préconise de pétrir avec de l'huile (Vitruve, *De Architectura*)⁵⁰.

Pliny l'Ancien reprend une partie des prescriptions de Vitruve concernant les citernes :

« *Les citernes doivent être construites avec cinq parties de sable pur et granuleux, deux de chaux la plus vive et avec des fragments de silex ne dépassant pas le poids d'une livre* » (Pliny)⁵¹.

49. Moropoulou A., Bakolas A., Aggelakopoulou E. – The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. *Cement and concrete research*, (2001) .31 (4), 633-639

50. Vitruve – livre VII, traduit par Liou B. et Zuïngedau M., commenté par Cam M.-Th., *Vitruve, De Architectura*, Paris, Les Belles Lettres (1995).

51. Pliny l'Ancien – *Histoire naturelle*. Livre XXXVI. Texte établi par Andre J., traduit par Bloch R. et commenté par Rouveret A. ; Collection université de France, édition Les Belles Lettres, Paris, 1981.

R. Malinowski, qui s'est intéressé aux matériaux et aux techniques de construction des aqueducs antiques, considère qu'un mélange chaux éteinte et huile ne peut être employé car donnant inmanquablement une mixture incapable d'expansion et susceptible de se rétracter après quelques mois. Au contraire, un mélange chaux vive et huile se dilatera, verra son volume se développer dans l'eau*, ce qui fait dire à l'auteur que seul ce dernier mélange est réellement approprié pour la préparation des joints. (Malinowski 1979)⁵².

Il existe plusieurs techniques d'extinction, la plus courante et la plus ancienne étant l'extinction en fosse (Palazzo.B)⁵³. Le mélange chaux et eau est brassé régulièrement jusqu'à dislocation complète des particules de chaux, formant alors une pâte onctueuse mais encore fluide, qui est ensuite versée dans des bassins. L'eau excédentaire est éliminée par évaporation et par filtrage dans le sol naturel. Après quelques jours de repos (jusqu'à vingt jours) la pâte devient blanche, onctueuse et souple, déjà dotée de propriétés liantes, mais son séjour doit être prolongé afin que les processus de cristallisation arrivent à maturation. Pline l'Ancien rapporte une loi « d'autrefois » interdisant un entrepreneur d'utiliser une chaux de moins de trois ans (Pline)⁵⁴.

Il n'y a toutefois aucune corrélation réellement établie entre l'âge de la chaux et sa qualité. La conservation peut se faire sous couverture (de sable mouillé ou de terre) ou non. Ce dernier type implique la formation d'une croûte de calcite à la surface qui constitue une protection naturelle contre une carbonatation trop précoce de l'ensemble.

L'extinction de la chaux vive peut se faire par l'utilisateur sur le chantier, s'il possède assez de place et de temps pour cela, sinon par le chauffournier. On a de nombreux exemples de petites fosses quadrangulaires, à cuvelage de planches de bois ou de dalles de terre cuite, servant à l'extinction de la chaux vive et/ou à la conservation de la chaux éteinte. (Lavergne et al (2000)⁵⁵.

52. Malinowski r. Concretes and mortars in ancient aqueducts. *Concrete International* / January, (1979). p. 66-76.

*Il faut signaler que le volume du Ca(OH)₂ est 40 % plus important que celui du CaO pour un poids équivalent.

53. Palazzo. Bertholon. *Histoire, archéologie et archéométrie des mortiers et des enduits au Moyen Age*. Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon II, (1998), p.27

54. Pline l'Ancien, *Hist. Nat.*, XXXVI, Texte établi par Andre J., traduit par Bloch R. et commenté par Rouveret A. Collection université de France, édition Les Belles Lettres, Paris, (1981).p55)

55. (Lavergne et Suméra. La fabrication de la chaux : une activité pérenne ou occasionnelle pendant l'Antiquité gallo-romaine Premiers éléments de réponse. In Pétrequin P., Fluzin P. Thiriot J. et BenoitP. (dir.) – *Arts du feu et productions artisanales*. XXe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 21-23 octobre (1999).

2.3. La carbonatation

Dans la préparation du mortier, l'ensemble des transformations que vont subir la pierre à chaux et la chaux est une boucle. D'un carbonate de calcium, on obtient à la fin, de nouveau, un carbonate de calcium (Fig.7). Mais cela seulement lorsque la chaux s'obtient par calcination de calcaires purs.

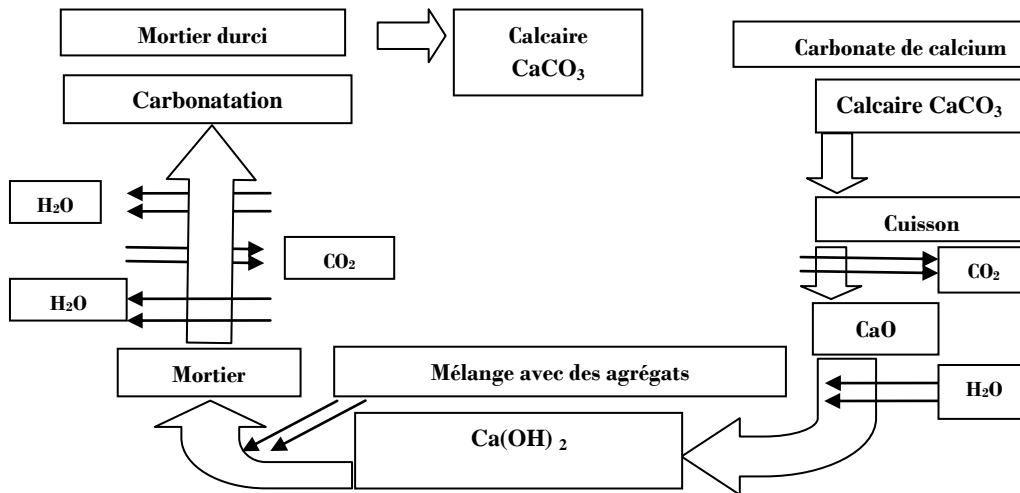
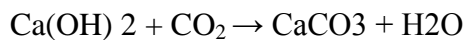


Fig.7.Schéma simplifié de cycle de chaux.

Si la roche contient moins de 1 % d'argile, la chaux tirée de ce calcaire est une chaux grasse. Si la teneur en argile est comprise entre 2 et 8 % on obtient une chaux maigre qui donnera un mélange moins facile à mettre en œuvre car moins onctueux qu'avec une chaux grasse. Ces deux types de chaux sont des chaux aériennes, c'est-à-dire qu'en présence du CO₂ d'origine atmosphérique interviendra une réaction de carbonatation :



Il y a cristallisation de calcite (carbonate de calcium CaCO₃), qui entraînera le durcissement de la masse, c'est le phénomène de prise. On dissocie généralement, dans la littérature, la prise du durcissement. La première est souvent considérée comme la cause et le deuxième comme le résultat. Ce n'est qu'en partie vraie, le durcissement pouvant s'initier lors de l'évaporation de l'eau, et augmenter sur une très longue période par interaction chaux/granat. La carbonatation se produit en milieu humide (Canonge *et al.* (1998)⁵⁶.

56. Canonge p. Autric F., Nourissier G.. *Techniques et pratique de la chaux*. Ecole d'Avignon, Editions Eyrolles. (1998). p 211.

Elle nécessite de l'eau au départ car le gaz carbonique (CO_2) ne réagit pas à sec sur la Portlandite, mais il est prouvé que l'humidité de l'air suffit pour cela, d'autant plus que la réaction libère elle-même de l'eau (Deloye). (1996)⁵⁷. La vapeur d'eau forme avec le gaz carbonique (CO_2) l'acide carbonique (HCO_3^-), puis la chaux fixe le CO_2 contenu dans cet acide pour former le carbonate de calcium. Cette carbonatation s'effectue dès la mise en œuvre du mortier.

Mais cette réaction est très lente, 60 à 70 % de la chaux est transformé en carbonates après deux à trois semaines. Il faut souvent attendre près d'un an avant que la totalité de la maçonnerie soit carbonatée. Puisque le CO_2 atmosphérique doit pénétrer dans le mortier pour qu'il y ait possibilité d'échanges, ce phénomène est directement dépendant de la porosité du mortier. Ainsi, il a été remarqué que le cœur de certaines maçonneries antiques montrait parfois des phénomènes de tassement, la chaux non carbonatée y ayant gardé toute sa plasticité. Mais, rappelons-le, la lenteur du phénomène de prise (caractéristique liée aux chaux aériennes) n'était pas considérée comme un handicap par les bâtisseurs romains, elle était même prisée, puisqu'elle permettait par la plasticité des mortiers un tassement lent et progressif de la construction au fur et à mesure de son élévation, ainsi qu'une excellente répartition des pressions (Adam 1995, p.76)⁵⁸.

La carbonatation des mortiers de chaux est un phénomène extrêmement complexe. Elle est influencée par la diffusion du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique dans la porosité du mortier, par la réactivité de la chaux et par le climat (humidité, vent, température).

Lorsque les calcaires contiennent 8 à 20 % d'argile (20 % étant la limite au-delà de laquelle la roche n'est plus considérée comme exploitable pour la fabrication de la chaux) leur calcination donne une chaux hydraulique (stricto sensu). Lors de la cuisson le calcium se combine avec les éléments chimiques des argiles, tels que le fer, l'aluminium et surtout le silicium, pour former un mélange de silicates, aluminates et Ferro-aluminates de calcium.

57. Deloye F.-X. La chaux à travers les âges. *Bull. des Labo. P. et Ch.*, 201, (1996), p. 94-98.

58. J.P Adams, la construction romaine. p.76.

Par contact avec l'eau ces corps vont former des hydrates insolubles (surtout des silicates de calcium hydratés CSH) qui confèrent au liant un caractère hydraulique (prise hydraulique lors du gâchage), c'est à dire qu'il pourra rapidement faire prise avec l'eau, sans air, et qu'il aura une bonne résistance à l'eau (le mortier pourra même faire prise sous l'eau). Si le mortier est en contact avec de l'air humide, la chaux et les hydrates vont se carbonater pour donner le carbonate de calcium et de la silice : c'est la partie aérienne de la prise Cette réaction prend plusieurs mois. (Canonge *et al.* 1998.)⁵⁹.

En théorie, devraient se retrouver dans ces chaux hydrauliques les mêmes composés que dans les ciments Portland actuels. Leur identification n'est pas aisée du fait des variations de leur cristallinité et de la faible dimension des particules (Charola *et al.* 2000.)⁶⁰.

Les composés les plus souvent cités sont 4 :

- Le silicate tricalcique (l'alite) de formule Ca_3SiO_5 ou encore $(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$. c'est-à-dire, dans la nomenclature des cimentiers, (C3S).
- Le silicate bi calcique de formule $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ou encore $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, soit $\beta\text{-(C2S)}$.
- L'aluminate tricalcique $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ou encore $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, soit C3A.
- L'aluminoferrite tétracalcique $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ ou encore $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, soit C4AF.
- On trouve aussi cités dans la littérature d'autres composés, tels que C2F et C6A2F.

Certains auteurs ont fait remarquer que l'alite (C3S) ne se forme pas dans les chaux hydrauliques anciennes (Banfill & Forster 2000)⁶¹, à cause de températures de calcination trop faibles : les chaux s'obtiennent après calcination de calcaires à température comprise entre

800 et 1000°C environ, alors que les ciments Portland sont obtenus après cuisson des mélanges à une température de 1450°C environ.

Dans les mortiers préparés avec ces chaux hydrauliques anciennes pourront se former certains C-S-H, associés au carbonate de calcium. Il s'agit de gels de silicate (ou aluminosilicate) de calcium hydratés, au ratio CaO/SiO_2 variable, dépendant notamment de la composition d'origine de la chaux et de l'état d'altération du mortier (décalcification des C-SH

59. Canonge p. Autric f., Nourissier g. techniques et pratique de la chaux. ecole d'avignon, editions eyrolles. (1998). p 211 .

60. charola. a.e. and henriques f.m.a. (2000). *hydraulicity in lime mortars revisited*. in bartos p., groot c. and hughes j.j. ed. – historic mortars: characteristics and tests. proceedings (pro 12) of the international rilem workshop, paisley (scotland), 12th-14th may 1999, 95-104.

61. banfill p.f.g. and forster a.m. (2000). a relationship between hydraulicity and permeability of hydraulic lime. in bartos p., groot c. and hughes j.j. ed. – historic mortars : characteristics and tests. proceedings (pro 12) of the international rilem workshop, paisley (scotland), 12th-14th may 1999, 173-193.

Au contraire des ciments, où les C-S-H se forment rapidement à partir des C3S, ces composés hydratés se formeront dans les mortiers hydrauliques à partir des C2S, puis secondairement des C4AF et de la Gehlenite (C2AS), ce qui explique la relative lenteur de la prise en comparaison des *ordinary portland ciment* (O.P.C.).

Afin de déterminer rapidement la qualité hydraulique d'un mortier, on a été amené à introduire l'*indice d'hydraulicité* (Papadakis et Venuat 1980)⁶², qui correspond à un rapport simple « i » qui croît avec le caractère hydraulique d'un mortier :

$$\text{Indice d'hydraulicité} = \frac{\text{SiO}_2 \text{ soluble} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

Des essais en laboratoire sur des chaux industrielles (éprouvettes conservées à l'air humide, 90 % d'hygrométrie) ont montré que le temps avant le début de la prise dépendait directement de l'indice d'hydraulicité (tableau 1, d'après Fournier 1975).

Tableau 1. Temps avant le début de la prise en fonction de l'indice d'hydraulicité (d'après Fournier 1975).

Indice d'hydraulicité	Temps avant le début de la prise
0,080	20 heures
0,050	28 heures
0,025	3 jours
Pratiquement nul	Pas de début de prise après 60 jours

M. Frizot dénonçait il y a plusieurs années la mauvaise utilisation du terme « hydraulique », trop souvent employé pour désigner des mortiers résistants et durs. Si les mortiers hydrauliques sont souvent plus résistants que les mortiers de chaux aériennes, cette dureté n'est pas leur apanage ; nombreux sont ceux de piètre qualité, et fréquents sont les mortiers de chaux aériennes possédant de très bonnes propriétés mécaniques. La dureté d'un mortier ne dépend pas seulement de la présence de composés hydrauliques, mais aussi, notamment, de la qualité de sa mise en œuvre et de sa conservation. (Frizot 1975, p.26)⁶³

62. Venuat.M. Le traitement des sols à la chaux, Ed par l'auteur, Chatillon sur Bagneux. (1980).

63. Frizot. M. *Mortiers et enduits peints antiques. Etude technique et Archéologique*, université de Dijon, centre de recherches sur les techniques gréco-romaines. (1975). p26

Lorsque la roche carbonatée contient plus de 5 % de magnésium (on parle de calcaire dolomitique jusqu'à 50 % de dolomite, au-delà c'est une dolomie) la chaux fabriquée est appelée chaux dolomitique ou magnésienne. Il est toutefois intéressant de signaler que des branches de la réaction de prise du mortier de chaux magnésienne, notamment la formation de brucite ($Mg(OH)_2$), ne peuvent se produire que sous l'eau ou en milieu très humide, tandis que d'autres nécessitent de large quantité de CO_2 . Cela signifie que, pour une même composition chimique d'origine, la minéralogie de la matrice du mortier n'est pas fixée, elle dépendra de son « histoire ».

3. Les recettes antiques

- Les granulats

Le granulat est primordial pour la fabrication d'un liant architectural à base de chaux.

Un sable quartzueux, ou n'importe quel autre sable inerte (pas ou quasiment pas d'interactions chimiques avec la matrice), mélangé avec la chaux, permet de neutraliser le retrait (la contraction lors de la carbonatation), d'assurer une porosité effective au mortier et de lui donner une résistance mécanique acceptable. Son rôle de charge permet aussi, par l'apport de son volume, d'économiser sur l'emploi de la chaux. Ainsi, la chaux aérienne n'est jamais employée seule comme liant architectural dans la maçonnerie, sinon plusieurs phénomènes secondaires apparaîtraient : la perte de volume due à la carbonatation serait à l'origine d'une indésirable fissuration, le cœur de la masse ne pourrait pas durcir, faute de contact avec l'air, et la plasticité interne provoquerait des tassements et des glissements dangereux pour la structure.

La granulométrie de la charge des mortiers n'est pas sans importance. On sait par exemple que la compacité du mortier – c'est-à-dire le rapport entre le volume des agrégats et le volume total du mortier – sera la meilleure avec une charge contenant 2/3 de gros grains (diamètre supérieur à 2 mm) pour 1/3 de grains très fins (diamètre inférieur à 63 μm), ces derniers comblant les espaces entre les plus gros. Cette bonne compacité doit permettre d'établir un contact entre chaque grain, ce qui accroît la résistance du mortier (Canonge *et al.* 1998)⁶⁴.

64. Canonge p. Autric F., Nourissier G. Techniques et pratique de la chaux. école d'Avignon, éditions Eyrolles. (1998). p 30.

Si cette propriété est recherchée, c'est donc qu'elle ne se produit pas souvent. En fait, dans la nature, les grès se forment avec cristallisation d'une matrice interstitielle, c'est-à-dire par un comblement des vides existants entre les grains de sable déjà déposés, et donc en contact les uns avec les autres. Pour un mortier il en est tout autrement, puisqu'il s'agit de la cristallisation d'une pâte contenant du sable : les grains « flottent » dans le mélange, les contacts entre eux sont limités.

L'analyse granulométrique est un moyen d'analyse très puissant, d'autant plus intéressant que la granulométrie est généralement un critère assez fort de différenciation des mortiers. Malheureusement elle présente un grand nombre d'inconvénients. Le premier, est la quantité de matériau nécessaire pour effectuer une analyse qui soit statistiquement valide. Si obtenir un grand volume (plusieurs centaines de grammes) est possible pour des mortiers de blocage ou des bétons de sol, cela devient plus périlleux lorsque l'on souhaite acquérir des mortiers de jointoiement ou d'enduit, qui plus est d'enduit peint, dont chaque couche doit être analysée indépendamment des autres. La désagrégation du matériau est nécessaire pour pouvoir récupérer le granulat. La technique est donc particulièrement destructive.

Elle est aussi agressive pour le granulat, puisque la méthode généralement employée pour désagréger le matériau est une dissolution à l'acide de la matrice carbonatée, entraînant par la même la disparition du granulat carbonaté. L'analyse granulométrique ne porte donc pas sur la totalité de la charge, mais seulement sur la fraction non carbonatée. On voit de suite l'ambiguïté de cette méthode, qui favorise les comparaisons des matériaux sur des critères qui, bien que propres au mortier, ne correspondent pas à ses caractéristiques réelles.

Si le granulat est parfaitement siliceux alors elle devient pleinement exploitable. La courbe granulométrique représentera la charge du mortier *stricto sensu* s'il y a eu mélange de diverses matières premières pour le granulat. Sinon, si la source est unique et géologique, la courbe renverra à une formation sableuse, celle source du granulat. Dans ce deuxième cas, les courbes obtenues ne peuvent en aucun cas être perçues comme la marque d'un choix, d'un trait technique amenant à établir un mortier avec telles ou telles caractéristiques granulométriques, la finesse et éventuellement le mélange entre des particules fines et d'autres plus grossières (le tri) peuvent avoir été recherchées, mais on peut fortement douter d'une connaissance précise des courbes granulométriques optimales de la part des Anciens, ce qui signifie que la courbe analysée donnera plus d'informations sur la formation sableuse exploitée que sur le savoir-faire technique des architectes.

-Le choix du sable naturel

Les textes de plusieurs auteurs antiques, concernant la pratique du mortier de chaux, nous sont parvenus. Les trois auteurs principaux sont Caton l'Ancien (II^e siècle av. J.-C.), Vitruve (I^{er} s. av. J.-C.) et Pline l'Ancien (I^{er} ap. J.-C.). Les écrits les plus déterminants sur la préparation des mortiers sont ceux de Vitruve, qui a vraisemblablement rédigé ses dix livres d'architecture sur une décennie autour de 27 av. J.-C.⁶⁵

Dans le chapitre 4 de son livre II, « du sable » (*De harena*), il prévient de faire attention au sable que l'on emploie pour faire le mortier. L'emploi du terme *harena* ne serait pas anodin, il marquerait la distinction entre un sable fin non mêlé de terre et le *sabulo* qui est au contraire naturellement mêlé à de la terre ou de l'argile, et dont on se sert pour la fabrication des briques crues (*De Architectura*, II, 3)⁶⁶. Pour cet architecte, il y a trois types de sable : le sable fossile, le sable de rivière et le sable marin.

Le sable de rivière et le sable marin (ou plutôt de bord de mer) ne sont pas bien considérés par l'auteur car ils présenteraient des inconvénients majeurs : ils sèchent difficilement dans les maçonneries et s'il n'y a pas de pauses dans la construction du mur celui-ci ne supportera pas la charge d'une maçonnerie continue, le sable marin présente aussi l'inconvénient de rejeter du sel faisant ainsi s'effriter les couches d'enduits. Ils sont indiqués comme sources de remplacement s'il n'y a pas de sable fossile, tout comme les « graviers », le sable de rivière peut nécessiter un criblage. En revanche le sable de rivière est apprécié pour les enduits où, grâce à sa nature « maigre », il devient ferme, empêchant le mélange chaux, sable et paille de se fissurer.

Le sable fossile est un sable de carrière. Pour l'auteur, le meilleur est celui qui crisse lorsqu'on le frotte dans la main et qui ne laisse aucune trace et pas de terre sur une toile blanche. Les sables fossiles ont, toujours pour l'auteur (*De Architectura*, II.4.3), la propriété de sécher facilement dans les maçonneries, s'il s'agit d'un sable extrait depuis peu. S'ils restent longtemps en attente d'utilisation, ils se désagrègent « sous la brûlure du soleil, de la lune ou du gel et deviennent terreux ».

65. Commentaires de P. Gros du livre II (traduction Callebaut, 1999), note 4.1.2.

66. (*De Architectura*, II, 3) Le traité de Vitruve, *De Architectura* constitue l'ouvrage de base qui relate toutes les techniques de construction de l'antiquité, il a été traduit et commenté par plusieurs auteurs.

Vitruve a choisi de parler de préférence des carrières des environs de Rome, du Latium et de l'Etrurie méridionale ⁶⁷ La description qu'il donne des sables fossiles (*De Architectura*, IV, 1) les caractérisent presque uniquement par leur couleur, soit noire, gris blanchâtre ou rouge. Un tel sable, ne devant pas laisser de traces sur un linge blanc,

Un autre problème d'interprétation du texte de Vitruve se pose ; il concerne les sables de rivière. Cette dénomination devrait signifier une exploitation du lit des rivières pour l'extraction du sable. Seulement, qu'en est-il des berges et par extension des terrasses alluviales ? Sont-elles considérées comme appartenant au système alluvial, ou leur exploitation pourrait-elle déjà renvoyer à une dénomination de sable de carrière⁸ pendant la période antique ? Si l'on se réfère au texte antique, livre II chapitre 4, la première occurrence est :

« Si cependant il n'y a pas de carrière d'où le sable puisse être extrait, on le tirera des fleuves ou du gravier, en le passant au crible » (traduction Callebat).

Une autre, un peu plus loin, chapitre 6, participe à la démonstration de la diversité de la nature des terres suivant les régions :

« Certains sols sont de nature terreuse d'autres alluvionnaires et aussi graveleuses, mais dans d'autres lieux il y en a de nature sablonneuse et également rocheuse ».

Il semble, finalement, que ce type de matières premières soit toujours associé dans le texte à des matériaux graveleux. C'est donc qu'une relation existe, mais aussi que l'auteur fait une distinction. Si l'on adopte une vision généralisatrice de l'environnement géologique d'une vallée, les alluvions récentes se présentent sous l'aspect d'une masse limoneuse ou limono sableuse et souvent organique, alors que les alluvions anciennes, présentes aussi en système de terrasses, sont plus grossières, riches en graviers. Les formations grossières ont pu être exploitées pour fournir du sable, après criblage, tel que signifié par Vitruve. Ce sable, qui n'est pas considéré comme fossile ou de carrière, n'est donc pas plus un sable de rivière. Il faut peut-être voir ici un aspect de la connaissance géologique des Romains qui auraient su voir dans les terrasses la marque des anciennes divagations des cours d'eau cheminant en contre-bas. Ainsi, pour les régions auxquelles Vitruve fait référence, les terrasses alluviales pourraient être associées aux « sables de rivière ».

67. (*De l'architecture*, livre IV, 1) édit. P. Gros, Coll. des Univ. De France, Paris, 1992.

Pour d'autres régions, celles de Gaule plus particulièrement, les distinctions entre les « sables de carrière » et les sables alluviaux sont plus difficiles, puisque la nature des grains peut ne pas diverger, laissant alors aux *structores* (maçons) le libre choix de la source, à proximité ou non des rivières, sans réelles répercussions sur la propriété des matériaux de chaux. Quant à l'exploitation du lit des rivières au sens strict, elle reste parfaitement plausible, plusieurs exemples de mollusques d'eau douce ayant été signalés ou repérés dans les mortiers, en association avec le granulat.

4. La pouzzolane

Cette poudre c'est la pouzzolane. Elle est conseillée par Vitruve pour les ouvrages hydrauliques car elle donne au mortier la propriété de durcir sous l'eau.

Les pouzzolanes de Pozzuoli (localité de Pouzzoles, une ville proche de Naples), mais aussi du Latium, sont des roches pyroclastiques meubles ou de faible cohésion provenant des éruptions volcaniques de type explosif (Furlan et al 1980)⁶⁸. En fait, le terme de pouzzolanes s'applique à tout un ensemble de matériaux volcaniques meubles, non cimentés, émis puis déposés par voie aérienne et refroidis dans l'air .

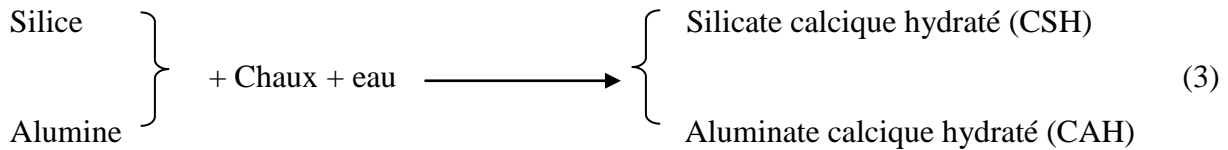
Actuellement, ce terme est employé pour tous les matériaux siliceux ou silicoalumineux qui ne possèdent pas en eux-mêmes de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes , c'est pourquoi, parmi les pouzzolanes naturelles et artificielles, se retrouvent les roches tufeuses broyées, les argiles naturellement cuites et les terres cuites, les terres à diatomées et les cendres volantes (résidus de combustion de houille ou lignite des centrales thermiques).

4.1. L'activité pouzzolanique

La réactivité des pouzzolanes volcaniques (aspect chimique de la pouzzolanité) est fonction de la nature et de la proportion des phases qui les composent. Parmi celles-ci, on retrouve le verre volcanique, très sensible au pH basique développé par la chaux en solution, qui tend à se dissoudre par attaque calcobasique. Cette phase vitreuse, soluble, est potentiellement la seule réactive.

68. Furlan V. et Houst Y. (1980). *Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation*. Chantiers, 7/80, P 30

Le schéma, simpliste, de la réaction, peut s'écrire sous la forme (3):



L'analyse d'un mélange chaux éteinte-pouzzolane de proportion 1:1 (rapportée dans Charola et Henriques 2000)⁶⁹ a montré après sept jours la présence d'aluminate de calcium hydraté ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), de silicate de calcium hydraté ($5\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) et de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Les aluminates et silicates de calcium se présentaient en cristaux polygonaux croissant à partir de la surface des pouzzolanes. Pour un mélange chaux-pouzzolane-sable de proportion 4:1:10, aucun silicate ou aluminate de calcium n'a pu être identifié après deux mois, et la Portlandite s'est convertie en calcite. En fait, seuls des ajouts importants permettent d'exploiter au mieux les propriétés et avantages des matériaux pouzzolaniques de nos jours. (Furlan et al 1980)⁷⁰.

Les pouzzolanes sont normalement utilisées avec des chaux à haute teneur en calcium. Le temps de prise de tels mélanges varie de 1 à 3 heures pour le début de la prise et de 10 à 12 heures pour la fin de la prise. Les résistances mécaniques obtenues avec ces mélanges varient selon le rapport chaux-pouzzolane. A court terme, avec des matériaux finement divisés et bien mélangés, la résistance maximum est obtenue avec un rapport chaux pouzzolane d'environ 1:4. A long terme (environ 1 an), les mélanges 1:3 à 1:2 donnent les meilleures résistances. (Furlan et Houst 1980)⁷¹.

4.2. Les terres cuites (pouzzolanes artificielles)

Les minéraux argileux non chauffés sont, globalement, considérés comme de possibles équivalents des pouzzolanes naturelles, du fait de leur haute teneur en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Les études des mortiers des anciens thermes ont été confrontées à plusieurs familles de mortiers de chaux et de sable quartzeux particulièrement enrichis en minéraux argileux.

69 Charola A.E. and Henriques F.M.A. *Hydraulicity in lime mortars revisited*. In Bartos P. Groot C. and Hughes J.J. ed. – Historic mortars: characteristics and tests. Proceedings (PRO 12) of the International RILEM Workshop Paisley (Scotland), 12th-14th May (1999) , 95-104.

70. Furlan V. et Houst Y. (1980). *Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation*. Chantiers, 7/80, P 30

71. Furlan V. et Houst Y. (1980). *Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation*. Chantiers, 7/80, P 30

Il s'agit d'argiles d'illuviation, qui se déposent après migration dans le profil des sols pédologiques sur les parois des vides laissés entre les grains de quartz. Elles sont colorées par des oxydes de fer, jaunes à orangées. Les analyses par diffraction des rayons X ont révélées leurs natures : il s'agit de la kaolinite. Dans les mortiers correspondants, des silicates et aluminates de calcium hydratés, supposés en microscopie optique, ont été « repérés » par EDS au MEB. La présence des argiles d'illuviation intégrées au mortier avec le sable a entraîné la formation dans la matrice, par réaction avec la chaux, de composés pouzzolaniques.

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates (minéraux « en feuillets ») constitués de couches de tétraèdres et de couches d'octaèdres.

L'espace qui se trouve entre les feuillets est appelé espace interfoliaire. Tous les minéraux argileux n'ont pas le même comportement avec les phases liquides. La demande en eau de mélange pour un mortier de chaux, de sable et d'argile dépendra directement du cortège de minéraux argileux. La montmorillonite particulièrement possède des propriétés d'adsorption des molécules d'eau dans les espaces interfoliaires, qui se traduisent par des phénomènes gênants de gonflement. La montmorillonite non cuite réagit avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former des composés pouzzolaniques, mais sa forte demande en eau lors de la confection du mortier la rend impropre comme additif.

La calcination de ces minéraux réduit considérablement ces inconvénients. La calcination des argiles à température comprise entre 600 et 900°C entraîne le départ des hydroxyles, c'est-à-dire l'eau de constitution, jusqu'à détruire la structure cristallographique. Il en résulte un produit amorphe riche en silice et alumine qui peut réagir rapidement, à température ambiante et en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium (Furlan et al 1980, Charola et al 2000)⁷².

(He (1995) ont étudié l'accroissement de l'activité pouzzolanique des argiles suivant leur température de cuisson, déduite notamment des tests de compression. Leurs résultats témoignent des avantages inégaux des différentes matières premières et, surtout, de variations de température de cuisson optimale suivant chaque minéral.

72. Furlan V. et Houst Y. *Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation*. Chantiers, (1980) .7/80, P 30

Certains auteurs considèrent que des températures dépassant les 900°C ne permettent pas d'obtenir des produits pouzzolaniques (perte des propriétés) et que toutes les minéraux argileux cuits ne possèdent pas de caractère pouzzolanique. Par voie de conséquence, toutes les terres cuites « anciennes » ne seraient pas nécessairement de bonnes pouzzolanes artificielles (Binda *et al.* 2000)⁷³.

Cependant, dans une optique plus globale, les essais d'emploi d'argiles cuites ou plus particulièrement de terres cuites broyées ont montré que cet ajout augmente la résistance mécanique et la durabilité du matériau. Les résultats montrent que les fragments de brique de granulométrie fine, aux particules de diamètre inférieur à 75 µm, peuvent agir telles des pouzzolanes réactives, jouant sur la rapidité de la prise et augmentant la durabilité (Teutonico *et al.* 2000)⁷⁴.

Il est en effet recommandé, d'une manière générale, de broyer finement les matériaux pouzzolaniques afin d'augmenter la surface spécifique totale des éléments, et donc la surface totale de contact entre la chaux et les pouzzolanes. Le domaine des mortiers et bétons de tuileau anciens présentent bon nombre de matériaux exempts de poussière de tuileau, chargés au contraire de fragments de plusieurs centaines de micromètres voire de plusieurs millimètres. Dans les mélanges à gros éléments la coloration de la matrice ne présente alors aucune teinte rose caractéristique des « mortiers hydrauliques ». La surface spécifique totale de ces pouzzolanes artificielles est bien plus faible. Les réactions pouzzolaniques sont limitées aux seules bordures des morceaux de brique. La formation de ces bordures est supposée correspondre à la dissolution partielle des silicates des terres cuites (de basse température, < 900°C) en contact avec un environnement alcalin (action de la chaux et de l'eau), suivie de la formation de nouveaux silicates (composés pouzzolaniques) avec, éventuellement, migration et carbonatation de la chaux dans la brique, remplissant ainsi les espaces entre les deux systèmes et remplissant les vides de la terre cuite, créant ainsi une continuité qui augmente leur adhérence (Baronio *et al.* 1997 Charola & Henriques 2000)⁷⁵.

73. Baronio G., Binda I. and Lombardini N.. *The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks*. Construction and Building Materials, (1997) . p 33-40.

74. Teutonico j.M., Ashall G., Garrod E. and Yates T. *A comparative study of hydraulic lime based mortars*. In Bartos P., Groot C. and Hughes J.J. ed. – Historic mortars : characteristics and tests. Proceedings (PRO 12) of the International RILEM Workshop, Paisley (Scotland), 12th-14th May (1999), P339-349.

75. Baronio g., Binda I. and Lombardini N. *The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks*. Construction and Building Materials, (1997). p. 33-40.

L'interaction chaux / terre cuite trouve un autre terrain dans les parements des murs de briques, au contact des joints de mortier. Il est aisé de se faire une idée de l'importance d'un tel phénomène lors des phases de prélèvements sur le terrain : l'adhérence mortier / brique est telle qu'il est fréquent que ce soit la brique qui cède au moment de l'échantillonnage, alors qu'un joint de mortier entre deux moellons en pierre cèdera quasi-systématiquement au niveau du contact mortier / pierre. Les phénomènes intervenant à l'interface entre le liant architectural et la brique sont de même ordre que ceux décrits précédemment.

L'analyse a permis de déceler la fine zone de réaction à l'interface mortier / brique. La migration de calcium dans la terre cuite et la mise en place d'une zone de réaction, assurant la continuité entre les deux systèmes, sont venues renforcer la cohésion de la structure. Francini et al(1999)⁷⁶.

En résumé, dans les pouzzolanes, c'est le verre volcanique, phase vitreuse soluble, qui est réactif. Dans les terres cuites, la cuisson des argiles entraîne la formation d'un verre réactif, au même titre que celui des pouzzolanes ; cette équivalence autorise l'appellation de pouzzolane artificielle pour le tuileau mais, nous l'avons dit, avec une prudence de rigueur au regard des réponses différentes des terres cuites selon la composition des argiles d'origine et la température de cuisson.

76. Francini et al(1999)48.

5. Le métakaolin

5.1. Définition

Le métakaolin est une poudre de grande surface spécifique obtenue par calcination broyage ou broyage calcination d'une argile composée majoritairement de kaolinite. Le métakaolin est constitué principalement des particules de silicate d'alumine amorphe ayant des propriétés pouzzolaniques ; il est composé essentiellement d'oxyde de silicium (SiO_2) et d'aluminium (Al_2O_3) réactifs. Les températures de calcination sont comprises entre $600\text{ }^\circ\text{C}$ et $850\text{ }^\circ\text{C}$ suivant le degré d'ordre de la kaolinite, il se produit une réaction de dé-hydroxylation du matériau avec une destruction de la structure cristalline initiale conduisant à une amorphisation du matériau (k. salhi) (2021)⁷⁷.

Parmi les premières applications principales du métakaolin, on peut citer la construction entre 1962 et 1972 de quatre barrages hydrauliques au Brésil, sur la rivière d'Amazone, qui a utilisé environ 300000 tonnes de métakaolin. Dans cet exemple, les agrégats utilisés étaient connus comme potentiellement réactifs, compte tenu des risques d'alcali-réaction (B v B.C et al). (1985)⁷⁸. Pour prévenir les réactions alcali-granulats, mais aussi pour des considérations économiques, la décision a été prise de recourir à la substitution partielle du ciment par des métakaolins dans le béton destiné à la construction de ces ouvrages. Jusqu'à présent, aucun problème majeur n'a été signalé sur ces barrages.

5.2. Obtention des métakaolins

La kaolinite dont est issu le métakaolin est une argile naturelle, les kaolinites (éléments purs du kaolin) sont des minéraux argileux (silicates lamellaires micro-cristallisés) constitués par l'empilement de feuillets identiques de type 1:1, la formule structurale de la kaolinite est $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Chaque feuillet de kaolinite est constitué d'une couche de tétraèdres SiO_4 reliés dans un même plan par trois de leurs sommets, associée à une couche octaédrique, deux sites octaédriques sur trois étant occupés par des atomes d'aluminium : la kaolinite est un phyllosilicate dioctaédrique. Figure (Fig.8). La kaolinite est un minéral à 7Å formé de l'empilement d'une couche de cations tétraédriques et d'une couche de cations octaédriques. (Christelle Bich). (2005)⁷⁹.

77. K. SALHI, performance des mortiers et bétons a base des ciments contenant du metakaolin algerien, these doctorat, université Biskra, (2021), p5.

78. B v B.C.: Proceedings of the 7th International Conference of AAR, Ed. Grattan-Bellow, (1985), p. 66-70,

79. Christelle Bich.: « Contribution a l'étude de l'activité thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2005).

La morphologie des cristaux de kaolinite est généralement assez régulière. Ces cristaux se présentent sous la forme de plaquettes hexagonales, souvent allongées et parfois réduites en losanges, dont le diamètre du cercle adjacent est de l'ordre du micromètre et l'épaisseur de quelques centaines d'Angströms. (Christelle Bich). (2005)⁸⁰.

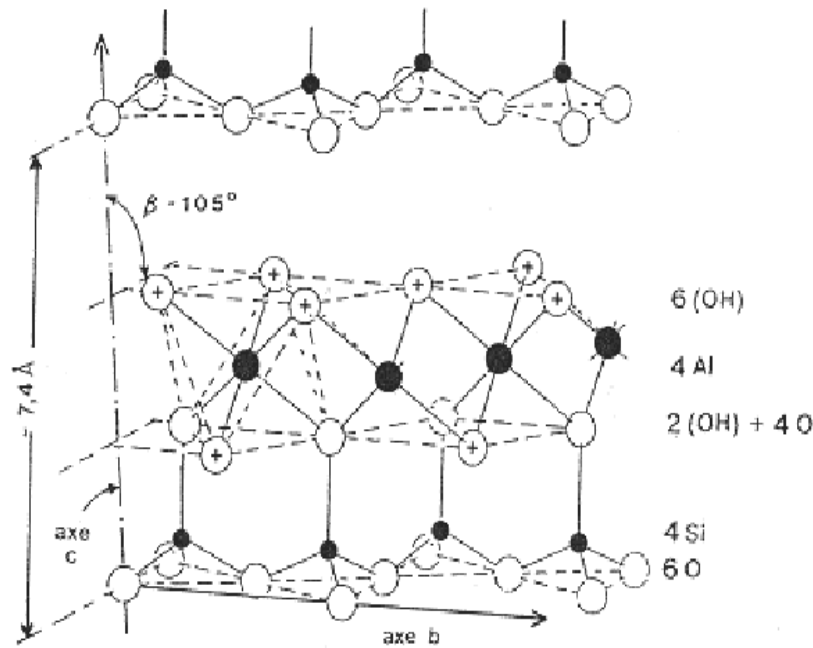


Fig. 8. Structure de la kaolinite $Si_2Al_2O_5(OH)_4$.

Dans les conditions environnementales normales, le kaolin est assez stable. Cependant, lorsqu'il est chauffé à des températures de 650-900 °C, le kaolin perd 14% de sa masse en ions hydroxyles liés. Ce traitement thermique entraîne une destruction de la structure cristalline initiale du kaolin selon l'équation (1). (Brindley G.W et al) (1959)⁷¹. Les résultats de cette déshydroxylation, une phase de transition hautement réactive appelée métakaolin (kaolinite calcinée). Sa composition stoechiométrique est de type : $Al_2O_3(SiO_2)_2(H_2O)_{0,24}$. La température de calcination dépend du degré de pureté en kaolin. Le MK est une pouzzolane amorphe.

80. Christelle Bich.: « Contribution à l'étude de l'activité thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2005).

81. Brindley G.W., Nakahira M.: « The kaolinite-mullite reaction series: I: survey of outstanding problems. II: metakaolin. III: the high temperature phase. », Journal of American Ceramic Society, vol. 42, (1959), p311-324.

Avec quelques propriétés hydrauliques latentes, qui est bien adaptée pour une utilisation en tant qu'addition minérale. (Bensted, J et al) (2002) ⁸².



Avec : x : est le coefficient de déshydroxylation

L'analyse thermique différentielle (ATD) un des moyens les plus utilisés pour détecter les transformations thermiques d'un matériau qui met en évidence tous les phénomènes s'effectuant avec une variation d'énergie. Cette courbe met en évidence plusieurs phénomènes. Figure (Fig.9). 1) : De 20°C à 100°C : nous remarquons que la courbe décroît est due à l'évaporation de l'eau, 2) : De 100°C à 480°C : on peut observer un palier, la poudre reste dans son état sans subir de transformation, 3) : De 480°C à 600°C : On observe un pic correspondant à la déshydroxylation du kaolin (les hydroxyles structuraux sont éliminés de la kaolinite). 4) De 600°C à 940°C : Nous avons de nouveau un palier, donc entre ces températures il n'y a pas de transformation. 5) De 940°C à 1000°C : On observe un pic qui représente la transformation du métakaolin en mullite (inerte) (3Al₂O₃.2SiO₂). (San Nicolas R) (2011) ⁸³.

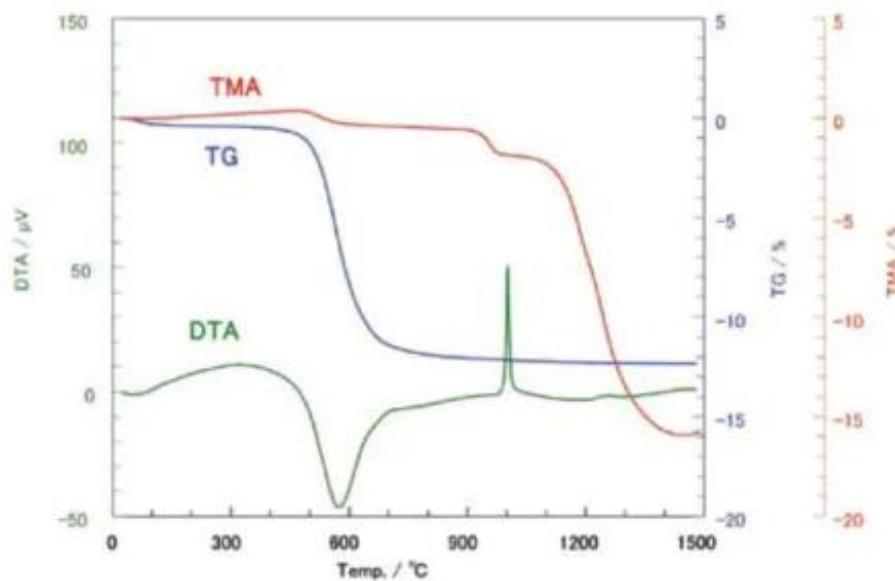


Fig.9. Spectres d'analyses thermiques gravimétrique (TGA) et différentielle de kaolin (ATD). (San Nicolas R)

82. Bensted, J. And Barnes, P.: «Structure and Performance of Cements.», 2nd ed., New York: Spon Press. (2002).

83. San Nicolas R., « Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2011

Le traitement thermique, ou la température de calcination joue un rôle primordial dans la réactivité du métakaolin produit. (Badogiannis et al) (2005)⁸⁴. Ont conclu que le traitement thermique à 850 C° pendant 3 h, est efficace pour transformé le kaolin à haute teneur en alunite (KAl₃(SO₄)₂(OH)₆) en métakaolin. De même, (Ramezani pour et al). (2011)⁸⁵. Ont étudié la température optimale et le temps de calcination pour produire du métakaolin à partir de trois kaolins différents. Ils ont trouvé que pour une température comprise entre 750 C° et 850 C° et pour une durée de calcination une heure, est suffisante pour obtenir de MK de performance désirée, tandis que pour des températures inférieures à 750C° l'augmentation de la durée de calcination de 1 à 2 heures entraîne une augmentation de la réactivité. Pour des températures d'activation optimale (de 750 C° à 850 C°), et lorsque la durée de calcination passe de 1 a 2 heures. Ont remarqué qu'aucune amélioration significative n'a été observée pour la résistance à la compression et la déshydroxylation des kaolins. De plus, ont constaté que la réactivité de MK diminue avec l'augmentation de la durée de calcination à ces températures. (Bensted et al). Ont étudiés, la température optimale pour l'activation thermique de différents types de kaolin, ont signalé qu'au-dessus de 850C° la récrystallisation de métakaolin commence et leur réactivité diminue, car le kaolin commence à se transformer en matériaux céramiques relativement inertes, comme le spinelle, la silice et la mullite.

5.2.1. Procédé de Calcination

Le métakaolin peut être produit par deux méthodes, calcination traditionnelle et calcination flash

5.2.1.1. Procède de Calcination : traditionnelle (Four rotatif ou à lit circulant)

La calcination traditionnelle est dite lente, car le plateau de température dure en général plusieurs heures (cinq heures environ pour la transformation du kaolin en métakaolin).

5.2.1.2. Les fours rotatifs.

Les fours rotatifs sont les plus utilisés dans l'industrie cimentière. Ces fours nécessitent un broyage de la matière à l'entrée. Ils font de 60 à 90 m de longueur et 4 à 5 m de diamètre. Le cylindre en acier est recouvert d'un revêtement intérieur réfractaire, incliné sur l'horizontale de quelques degrés en tournant autour de son axe. figure (Fig.10).

84. E. Badogiannis, G. Kakali And S. Tsvivilis.: « Metakaolin as supplementary cementitious material. », Journal of Thermal Analysis and calorimetry 81,.(2005), p. 457-462

85. F. Moodi, A.A. Ramezani pour, A.Sh. Safavizadeh: «*Evaluation of the Optimal Process of Thermal Activation of Kaolins* .», Sientia Iranica, (2011)

La rotation et l'inclinaison font que la matière progresse suivant l'axe. Ces fours nécessitent plusieurs heures avant d'être à température pour la calcination. (Christelle Bich) (2005) ⁸⁶



Fig.10. Photo d'un four rotatif. ⁷⁷

5.2.1.3. Les fours à plateaux

Les fours à étages sont constitués d'une série de plateaux que les matériaux parcourent en descendant. Ces fours travaillent à contre-courant : les matériaux descendent tandis que les gaz montent. Il a donc un bon rendement thermique. C'est une technique assurant une bonne calcination, mais qui manque de flexibilité. En effet, elle présente une inertie très grande et exige des temps de séjour assez longs. Ces types de fours ont commencé à se développer avec les techniques d'incinération de boues et de déchets industriels. Ces fours sont constitués d'un cylindre vertical en acier et d'une couche de matériaux réfractaires. Les matériaux entrent dans le réacteur en haut de la tubie, descendent le long du tube et passent au travers de la série de foyers. Figure (Fig.11). Les cendres sont déchargées en bas du four. C'est un procédé qui permet d'obtenir une bonne stabilité des paramètres et un produit calciné très réactif. (Christelle Bich) (2005) ⁸⁷

86. Christelle Bich.: « Contribution à l'étude de l'activité thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2005).

87. https://www.impexequip.com/equip_calcination.

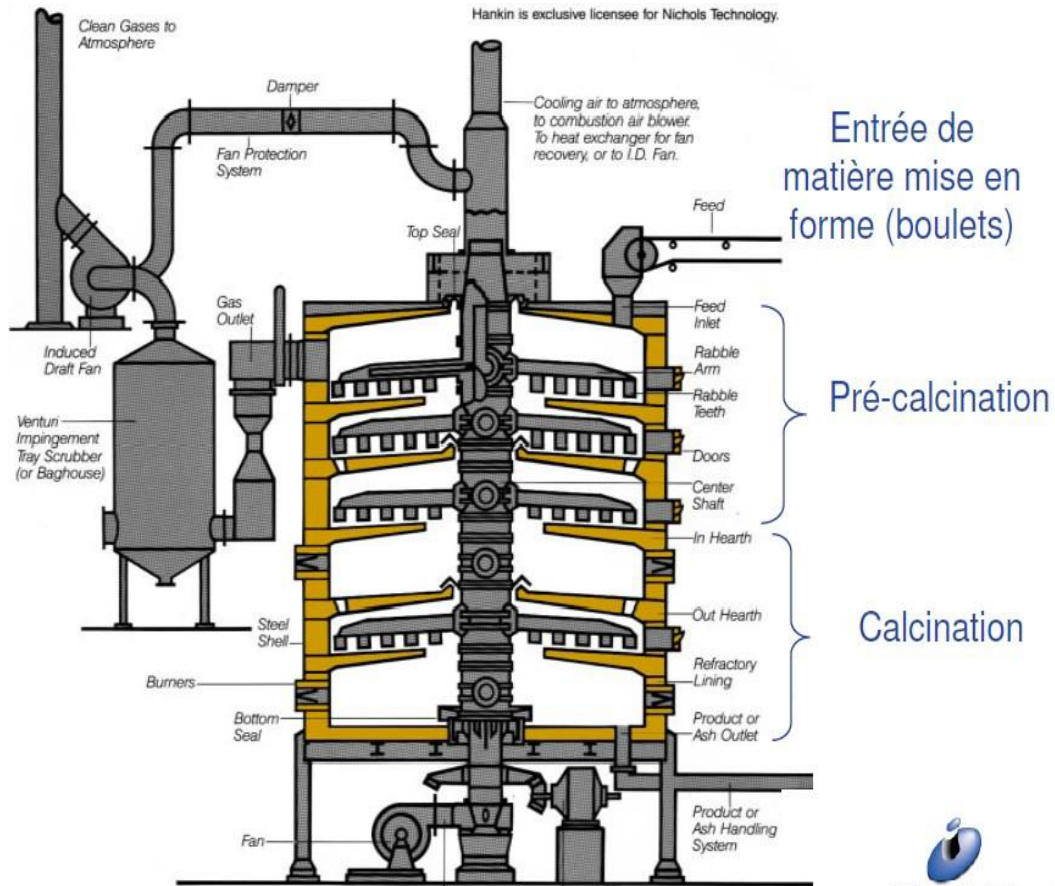


Fig.11. Four à plateaux (type Herreshoff)

5.2.1.4. Procédé de calcination flash: Four Flash

La calcination flash offre de larges possibilités dans le traitement industriel de matières minérales. La nature des poudres utilisées (taille de la particule forme, densité...), les transformations chimiques et minéralogiques subies pendant la calcination flash visant à obtenir des modifications de la structure chimique, varient considérablement et exigent des installations différentes. Contrairement aux fours traditionnels, les fours flash sont des installations qui permettent de générer des flux d'air circulant habituellement entre 10 et 20 m/s-1, permettant ainsi d'atteindre un traitement thermique de précision. Le temps de séjour des matériaux à l'intérieur de la zone de calcination est réduit a quelques secondes. (Christelle Bich) (2005) ⁸⁸

88. Christelle Bich.: « Contribution a l'étude de l'activité thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2005).

Ceci confère au précède une souplesse de réglage exceptionnelle et une excellente conduite Il existe plusieurs installations de ce type, telles que le four flash du laboratoire de l'université d'Exeter. (Davies T. W) (1984)⁸⁹, celui de Comessa, (Dunn J.G) (1999)⁹⁰, et celui de l'entreprise Malet. (Salvador S) (1995)⁹¹.Figure (Fig.12).Tous ces fours étant des fours pilotes.



Fig.12. Photo de four flash de l'entreprise Malet, (d'après Salvador S).

5.3. Propriétés physiques des métakaolins

5.3.1. La masse volumique

Les valeurs moyennes des masses volumiques des métakaolins rapportées dans la littérature sont présentées dans le tableau 2. Ces valeurs peuvent fluctuer entre (2,4 et 2,6) en fonction de la composition minéralogique de la roche mère, mais également en fonction du mode de fabrication des métakaolins.

Tableau 2: Exemples de valeurs de masses volumiques de métakaolins issues de la littérature.

Auteurs	Masses volumiques (g/m³)
(Poon et al) (2001) ⁹²	2.6
Tafraoui et al (2009) ⁹³	2.5
Mindes et al (2003) ⁹⁴	2.4

89. Davies T. W. «*Equipment for the study of flash heating of particle suspension.*», High temperature technology, vol. 2, 3, (1984), , p141-147 .

90. Dunn J.G., : «*Pilot-scale study of effect of particles on particle size on flash smiting of nickel sulphide concentrates*, vol. 100 ,(1999), p105-109

91. Salvador S. : «*Prototyping flash calciners for manufacture synthetic pouzzolana from kaolinite clay.*», Nato Asi Series Eapplies Sciences, 1995, vol. 282, p295-318.

92. Poon C.S., Lam L., Kou S.C., Wong Y.L., Wong R., : «*Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes .*», Cement and Concrete Research, , Vol. 31, 1306.(2001). p1301.

93. Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S., Vidal, T.: «*Metakaolin in the formulation of UHPC*.Construct. Build. Mater. 23(2), (2009).p 669–674

94. Mindess, S., Young, F.J. and Darwin, D.: Concrete, 2nd ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, NJ 07458, U.S.A. (2003).

5.4. Granulométrie

Les particules de métakaolin ont une granulométrie comprise entre celle des ciments et celle des fumées de silice. Les études bibliographiques concernant les granulométriques des poudres minérales ont montré que le diamètre moyen des métakaolins est de l'ordre d'un à une vingtaine de (20 μm), le métakaolin contient plus de fines que le ciment et moins que les fumées de silice. Pour cela, une substitution d'une partie du ciment par le métakaolin peut être intéressante pour améliorer le squelette et diminuer la taille des pores. (K. SALHI) (2021) ⁹⁵.

5.5. Morphologie du métakaolin

Diverses études ont été effectuées à l'aide de microscope électronique à balayage (MEB) sur la forme des particules de métakaolin montrent que les particules de métakaolin sont ordinairement proche de la morphologie de la kaolinite de départ. Figure (Fig.13). Cette dernière se présentant sous forme de feuillets hexagonaux, accolées les uns aux autres et d'une épaisseur de quelques angströms. (San Nicolas R) (2011) ⁹⁶.

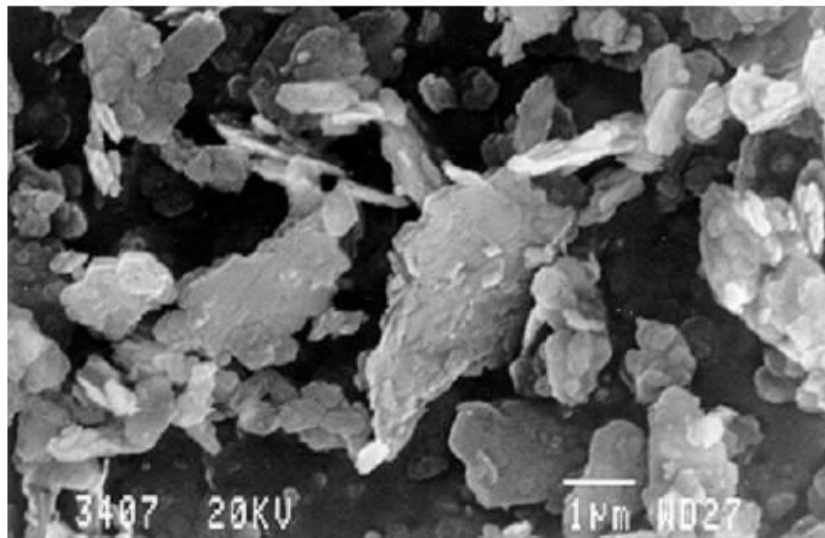


Fig.13. Observations au microscope électronique à balayage de la structure en plaquettes de métakaolin, (d'après Cyr M) ⁹⁷.

95. K. SALHI, performance des mortiers et bétons a base des ciments contenant du metakaolin algerien, these doctorat, université Biskra, (2021), p34.

96. San Nicolas R., « Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calnination flash», Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2011.

97. Cyr M, «Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires », Thèse de l'institut National des Sciences Appliquées de Toulouse et de l'Université de Sherbrooke, 1999, p283.

5.6. Surface spécifique

La surface spécifique désigne la superficie réelle de la surface développée par une particule. Elle est exprimée en (g/cm²). Les différences de valeurs de surface spécifique entre les métakaolins s'expliquent par des différences de granulométrie, de morphologie et de texture des particules. (Tableau 3).

Tableau 3 : Exemples de valeurs de masses volumiques de métakaolins issues de la littérature.

Auteur	Surface spécifique (g/cm²)
(Poon et al) ⁹⁸	1268
(Khatib et al) ⁹⁹	1200
(Courard et al) ¹⁰⁰	890

5.7. Composition chimique

Les métakaolins sont composés principalement de l'oxyde de silicium (entre 50 et 55 %) et de l'oxyde d'aluminium (entre 40 et 45 %). et d'autres composantes secondaires telles que l'oxyde ferrique, l'oxyde de calcium, l'oxyde de magnésium, l'oxyde de potassium, etc. Des exemples de compositions chimiques de métakaolin tirés de la littérature sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Composition chimique typique du métakaolin

Composition (%)	(Ambroise) (1994) ¹⁰¹	(Wild, S) (1997) ¹⁰²	(Tafraoui, A) (2009) ¹⁰³
SiO ₂	51.52	52.1	85.10
Al ₂ O ₃	40.18	41.0	35.14
Fe ₂ O ₃	1.23	4.32	1.21
CaO	2.00	0.07	1.15
MgO	0.12	0.19	0.20
K ₂ O	0.53	0.63	1.05
SO ₃	-	-	0.03
TO	2.27	0.81	-
Na ₂ O	0.08	0.26	0.07
L.O.I	2.01	0.60	1.85

98. Poon C.S., Lam L., Kou S.C., Wong Y.L., Wong R., : « Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes », Cement and Concrete Research, , Vol. 31, p1301-1306.(2001).

99. Khatib J.M., Clay R.M.: «Absorption characteristics of metakaolin Concrete.», Cement and Concrete Research. (34). 19-29 (2004).

100. Courard, L., Darimont, A., Schouterden,M., Ferauche, F.,Willem, X., Degeimbre, R., : «Durability of mortars modified with metakaolin.», Cement and Concrete Research 33,473–1479. (2003).

101. Ambroise J, Maxmilien S, Pera J: «Properties of metakaolin blended cement.». Adv Cem Based Mater 1994, p161–168.

102.Wild, S., Khatib, J.M.: «Portlandite Consumption in metakaolin cement pastes and mortars.», Cem. Concr. Res. 27(1), (1997). p.137–146

103.Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S., Vidal, T.: «Metakaolin in the formulation of UHPC.Construct. Build. Mater. 23(2), (2009).p 669–674.

5.8. Composition minéralogique

La composition minéralogique des métakaolins dépend de la composition chimique de la roche mère du matériau (kaolin) et de son parcours thermodynamique : Traitements thermiques (calcination, déshydroxylation), traitements chimiques, transport par voie humide. Le kaolin est généralement riche en kaolinite et de quartz, plus d'autres composants minéraux secondaires le feldspath, le mica et la calcite. (Badogiannis et al) (2004) ¹⁰⁴.

Les phases minéralogiques métakaolin tirés de la littérature sont présentées dans le tableau 5

Tableau 5 : Phases minéralogique des métakaolins (d'après Janotka, I) (2010)¹⁰⁵

Métakaolin	Métakaolinite	Quartz	Illite	Albite et feldspath	Muscovite
MK-1	36.00	21.85	6.93	4.23	31.00
MK-2	31.50	31.10	9.69	4.62	23.01
MK-3	40.00	18.11	6.18	3.82	31.90

6. Le ciment naturel (ciment prompt)

Le ciment prompt, également appelé ciment prompt naturel (symbolisé par les lettres CNP) ou ciment romain, est un liant hydraulique spécifique aux multiples usages. Sa composition particulière lui confère un temps de début de prise très court, suivi d'un durcissement immédiat. Ces propriétés de rapidité sont utilisées dans des applications telles que les scellements, les réparations, l'étanchéité, et le colmatage des voies d'eau. (Jacques Coret) (2003) ¹⁰⁶.

6.1. Fabrication du ciment prompt

Le ciment prompt naturel résulte de la cuisson, à température modérée (entre 800 et 1200°C), d'un calcaire argileux spécifique suivi d'un broyage très fin. Cette fabrication particulière entraîne la formation de constituants caractéristiques, avec la présence de silicates de calcium, d'aluminate de calcium et de sulfoaluminate de calcium qui est une spécificité de ce ciment prise rapide.

6.1.1. Matière première

Le matériau initial permettant la fabrication de ce ciment rapide est appelé « pierre ». C'est en fait un calcaire argileux (marne) de composition régulière, homogène, contenant 25% d'argile auquel n'est effectué aucun ajout. La composition spécifique du calcaire argileux permettant la fabrication du ciment prompt naturel.

104. Badogiannis, E., Papadakis, V.G., Chaniotakis, E., Tsivilis, S.: «Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value. Cem. Concr. Res. 34(6), (2004). p. 1035–1041.

105. Janotka, I., Puertas, F., Palacios, M., Kuliffayova, M., Varga, C.: «Metakaolin sand-blended cement pastes: rheology, hydration process and mechanical properties. Construct. Build. Mater. 24(5), 791–802 (2010).

106. Jacques Coret, *Vicat, deux siècles au service du ciment*, Paris, 2003, p81.

6.1.2. La cuisson

Pour que les phases minérales spécifiques du ciment prompt naturel se forment, la température de cuisson de la matière première doit être comprise entre 800 et 1200°C. Figure (Fig.14). Ces températures de cuisson sont bien en dessous de celle du ciment classique (1450°C). Il n'y a donc que peu de phase liquide lors de la cuisson de la pierre. La recombinaison des éléments chimiques étant beaucoup moins facile à l'état solide qu'à l'état liquide, c'est pour cela que tous les composants nécessaires à la formation des phases spécifiques doivent être présents en mélange intime dans la matière première et ceci dans des proportions bien définies. Ce qui explique la spécificité du gisement nécessaire à l'élaboration de ce ciment : la marne utilisée doit associer intimement argiles et calcaire.

Un bon ciment naturel se distingue par un mélange dans de bonnes proportions et un processus de cuisson moderne comme le four rotatif, il est possible de cuire la matière première avec des températures maîtrisées, par exemple entre 800° C et 900° C. (Cédric .A) (2007) ¹⁰⁷

107. Cédric Avenier (dir.), Bruno Rosier et Denis Sommain, Ciment naturel, Grenoble, Glénat, 2007, p175.

Cela donne un ciment certes naturel mais dont la minéralogie n'est pas représentative des ciments naturels du XIXe siècle. Ce processus de cuisson est inchangé depuis le XIXe siècle

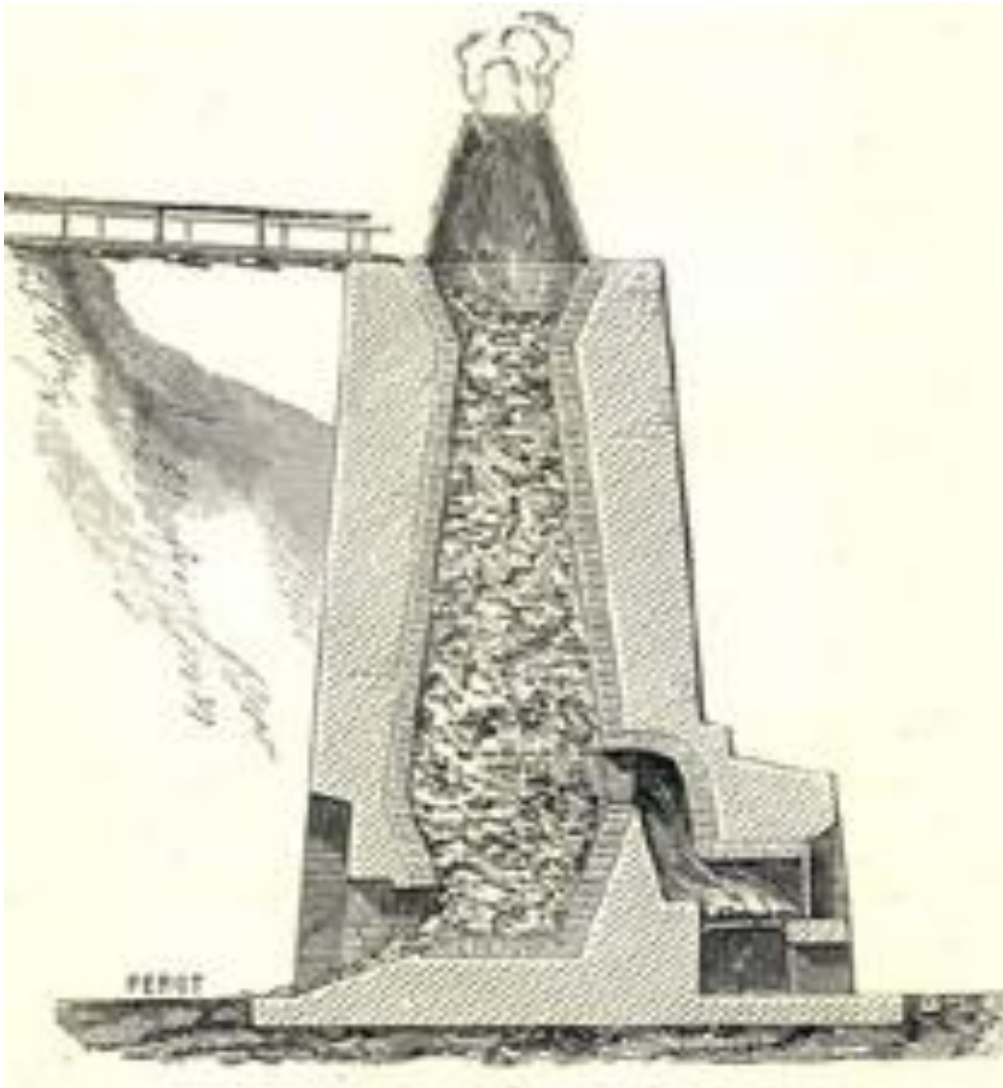


Fig.14. Four vertical.

6.1.3. Le broyage

Après une cuisson de même type que les chaux hydrauliques naturelles (NHL), la pierre contenant très peu de chaux vive contrairement à ces NHL, ne subit pas d'extinction. C'est pour cela que sa dénomination n'est pas une chaux hydraulique naturelle mais un ciment naturel. La pierre cuite est ensuite concassée puis finement moulue dans un broyeur rotatif à boulets. Figure (Fig.15)



Fig.15. Broyeur rotatif à boulets. .108

Cette matière se broie facilement et sa finesse est plus fine qu'un ciment courant.

L'étape suivante consiste à réguler les variations de qualité par une homogénéisation qui se fait par le passage à travers une batterie de silos. Chaque silo est alors rempli un par un. L'homogénéisation s'effectue en soutirant tous les silos en même temps afin d'assurer un mélange de toutes les productions. Il n'y a aucun ajout lors du processus de fabrication, c'est aussi une importante caractéristique du ciment naturel.

6.2. Caractéristiques physiques :

Lors de l'hydratation du ciment naturel Prompt, les aluminates formés à basse température sont responsables de la prise rapide (de l'ordre de 2 à 3 minutes) et de la première phase de montée en résistance durant les premières heures. L'hydratation de la bélite procurera la seconde phase de résistance qui s'exprimera sur de nombreux mois comme indiquée dans la figure (Fig.16). Cinétique de durcissement sur 10 ans).

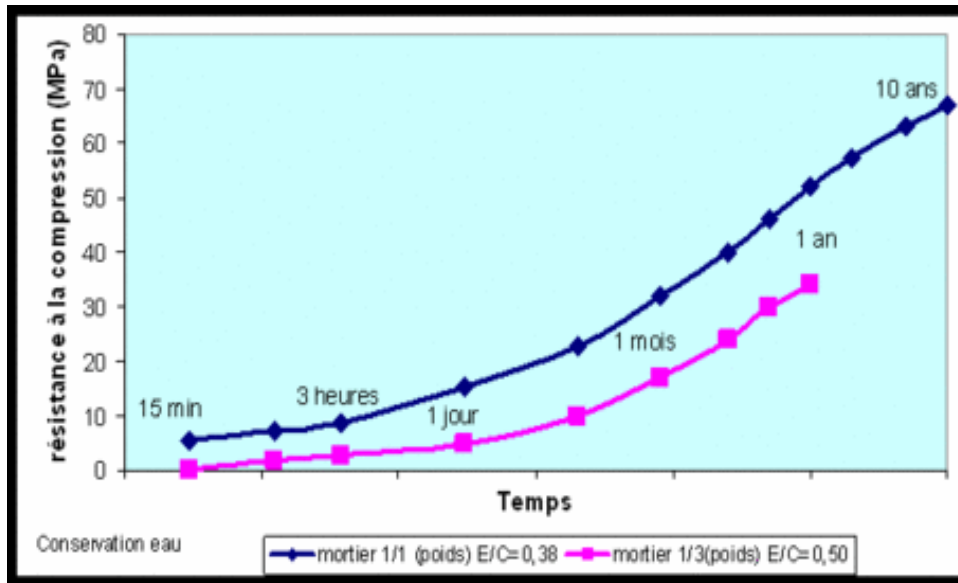


Fig.16. cinétique de durcissement sur 10 ans. .

Le ciment naturel Prompt présente la particularité de pouvoir être utilisé dans une très large plage de dosage de 10 à 50% en poids du mortier sec, voire même 100% dans le cas des coulis. La figure (Fig.17). Cinétique de durcissement en fonction du dosage et du rapport eau/ciment) donne une idée des résistances atteignables dans le cas d’une conservation dans l’eau.

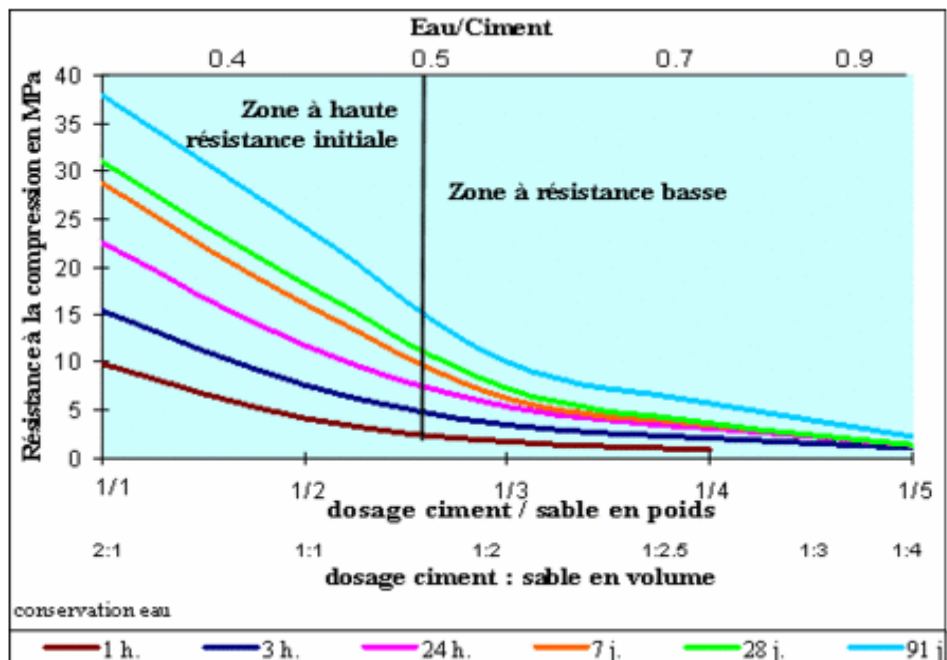


Fig.17. Cinétique de durcissement en fonction du dosage et du rapport eau/ciment.

Deux domaines sont remarquables :

- la zone à haute résistance initiale définie par un Eau/Ciment <0,50. Ces hautes performances concernent les applications de scellement, de maçonnerie rapide et d'imperméabilisation. Les résistances élevées impliquent une faible porosité. Cette zone, par ses performances aptes à répondre à des efforts structuraux, se rapproche des ciments Portland artificiels.
- la zone à basse résistance ayant un Eau/Ciment >0,50 possède des performances mécaniques et des dosages du même ordre de grandeur que ceux des mortiers de chaux hydraulique naturelle. Les caractéristiques d'absorption d'eau et de porosité sont aussi plus proches de celles que l'on peut retrouver avec les mortiers de ciment romain du XIXe siècle.

6.3. Caractéristiques chimiques

La composition chimique du ciment naturel Prompt s'inscrit dans la vaste famille des ciments naturels appelés aussi ciment romain. Figure (Fig.18)

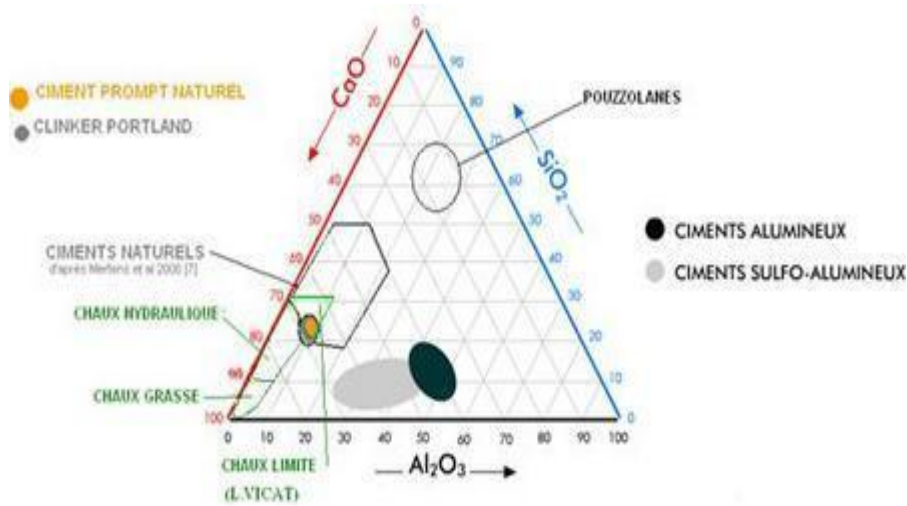


Fig.18. diagramme de la composition chimique du ciment naturel Prompt.

La couche géologique exploitée dans les carrières souterraines présente une composition chimique (Tableau 6) très constante avec un titre en carbonate (teneur en carbonate de calcium et de magnésium exprimé en CaCO3) de 72 pour 78 avec les clinkers Portland. Elle est donc proche d'un cru de clinker Portland classique et des chaux hydrauliques naturelles. De ce fait, par rapport à l'ensemble des ciments romains ayant existé, il est en limite basse en teneur en argile et relativement riche en CaO :

Tableau 6 : Caractéristiques minéralogiques des métakaolins :

PF 975 °C	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O
9.28%	18.09%	7.24%	3.2%	53.07%	3.84%	3.24%	1.16%	0.28%

L'originalité du ciment naturel prompt ne provient pas d'une composition chimique particulière mais plutôt d'une cuisson à température basse et à large spectre thermique de 600 à 1 200°C (sous le point de fusion) très légèrement supérieure à celle des chaux hydrauliques et d'un mélange intime et naturel de calcaire et d'argile. Ce mélange à l'échelle du micron est nécessaire pour la formation des minéraux lors de la cuisson car la diffusion des éléments atomiques est faible à l'état solide.

Il en résulte la formation d'une vaste gamme de minéraux très différents de ceux des ciments portland artificiels modernes mais identiques à ceux présents dans les chaux hydrauliques naturelles mais en proportion différente (Tableau 7) :

Tableau 7 : Composition chimique et minéralogique type du ciment naturel prompt

C3S	C2S	C3A	C4AF	C12A7	C4A3S	périclase	Chaux libre	calcite	sulfates	Autres dont phases amorphes
5-15%	40-60%	6 ± 2%	9 ± 2%	3 ± 1%	3 ± 1%	4 ± 1%	2 ± 2%	10 - 15%	3 ± 1%	10 -15%

- une partie de la pierre n'a pas subi une température suffisante pour se transformer, elle est simplement déshydratée, c'est la grume appelée incuite.

- une autre partie de la pierre s'est transformée pour donner des phases amorphes ou mal cristallisées dont toute une famille d'aluminates (C4AF, C3A, C12A7, C4A3S et C2AS) responsables de la prise et du durcissement rapide au cours des premières heures d'hydratation ainsi que des silicates sous forme de bélite (C2S) donnant une montée en résistance sur plusieurs mois. Un peu d'alite (C3S) est présent en faible quantité car ce minéral commence à se former vers 1 200°C. Il s'agit de la grume appelée cuite.

- il y a une fusion (clinkérisation) très partielle dans des zones très locales formant une faible quantité d'alite. Le fait que la composition chimique de la pierre servant de matière première soit proche de celle d'un cru de clinker Portland permet la formation de ce silicate de calcium bien connu. Très hydraulique, il apporte un complément de résistance à partir de quelques semaines. C'est la grume appelée surcuite. Figure (Fig.19).

Ce dernier point est très important car les fusions locales de matières sont inévitables avec le processus de cuisson en four droit. Les minéraux formés dans cette phase liquide ne doivent pas altérer le ciment naturel lors de leur hydratation. Par exemple, une matière première plus riche en argile formera dans cette phase liquide plus de minéraux alumineux dont l'hydratation est plus mal connue pouvant entraîner des problèmes sérieux de durabilité.

C'est le mélange de ces pierres cuites à différentes températures qui donne les caractéristiques du traditionnel ciment naturel.

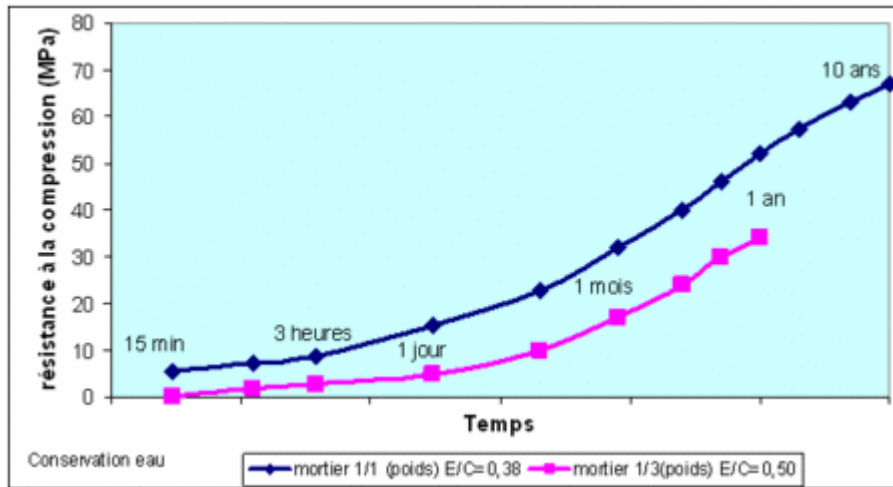


Fig.19. Cinétique de durcissement sur 10 ans.

6.4. Les utilisations des ciments naturels

Si la composition granulaire d'un béton de ciment prompt naturel est similaire à un béton courant, ses propriétés spécifiques permettent des applications diversifiées : prise et durcissement rapides pour le scellement (ciment de scellement). Figure (Fig.20). , le calfatage, la stabilisation, prise réglable pour les maçonneries rapides, les travaux entre marées, faible perméabilité pour le cuvelage, les revêtements, tenue aux eaux sulfatées pour les bâtiments agricoles, les industries agro-alimentaires, les fondations.



Fig.20. Sceller un gond au ciment naturel prompt.

Enfin, il faut noter que l'emploi historiquement le plus spectaculaire du ciment prompt est la spécificité grenobloise d'imitation de la pierre pour la réalisation d'ornements de façade (pierre factice pour le bâti ancien). (Anne. C) (2000)¹⁰⁹.

7. Conclusion

Les différents écrits historiques et les études s'y rapportant relatent la composition et les propriétés des mortiers comme des témoignages d'un savoir faire ancestral. Un savoir faire transmis à travers les siècles et reproduit dans les différentes édifications de l'antiquité à l'aire contemporaine

Les récentes études élaborées montrent que les mortiers antiques constituent des références dans la fabrication des mortiers pour les siècles qui ont succédé. Ces recherches ont permis de mettre en évidence les principaux facteurs dont dépendent les compositions des mortiers. Il s'agit de la maîtrise des techniques de fabrication et de mise en œuvre des mortiers par rapport à leurs natures et à leurs usages dans l'édifice ainsi qu'à la nature des formations géologiques du site où sont extraites les matières premières.

109. Anne Carol-Gélin, Christiane Guichard et Brigitte Riboreau, L'or gris du grand Grenoble, Lyon, Patrimoine Rhonalpin / SRI Édition, 2000, p35.

CHAPITRE 03
ALTERATIONS DES MATERIAUX
DE CONSTRUCTION
(CAS DE LA PISCINES ROMAINE)

Chapitre 03 : Altération des matériaux de construction (cas de la piscine romaine)

1. Introduction	66
2. Altérations des briques	66
2.1. Désagrégation	67
2.2. Altération chromatiques	67
2.3. Les attaques biologiques	68
3. Altérations des mortiers de chaux	68
3.1. Les causes mécaniques	68
3.2. Effet de l'humidité	68
3.3. Causes biologiques	69
3.4. Causes humaines	69
3.5. Les fissurations	69
3.6. Altérations chromatiques	69
4. Les causes d'altération des mortiers	69
4.1. Les effets visibles et mesurables	69
4.2. Un manque d'adhérence	70
4.3. Une perte de dureté	70
4.4. Une porosité importante	70
4.5. La présence de fissure	70
4.6. L'absence de cohésion	71
4.7. La présence de diverses traces	71
4.8. Dégradation générale des mortiers	71
4.8.1. Effet de l'humidité	71
4.8.2. Altération chimiques	72
4.8.3. Altération physique	72
4.8.3.1. Le gel-degel	72
4.8.3.2. L'influence des sels	73
4.8.3.3. La dilatation thermique	73
4.8.4. Altérations biologiques	73
4.8.4.1. Action de la pollution atmosphérique	75
4. Altération des pierres	75
5. Les altérations des mortiers à travers les recherches bibliographiques	76
6. Conclusion	78

1. Introduction

Les édifices historiques subissent au fil des temps de multiples agressions mécaniques, atmosphériques ou biologiques. Il en résulte différentes pathologies qui altèrent leurs maçonneries, depuis les simples salissures jusqu'aux déstabilisations structurelles pouvant mener à la ruine de l'édifice. Ces altérations détruisent l'épiderme des monuments, et à terme, elles peuvent affecter la structure porteuse et sa stabilité.

Les matériaux de construction de ces édifices à caractère historique, notamment les mortiers, les pierres et les briques sont sujets à des processus de dégradation de différentes natures. L'altération des matériaux archéologiques est un processus complexe qui résulte de la combinaison de mécanismes de dégradation chimiques, physiques et mécaniques. Ce processus est le résultat de plusieurs facteurs:

- Les différentes altérations atmosphériques et environnementales à savoir : la pluie, le vent, le soleil, les cycles gel-dégel
- La qualité et la composition des matériaux et leurs modes de fabrication
- Les attaques biologiques des matériaux (présence de champignons).
- Les actions de l'homme

Ces altérations peuvent être définies comme une forme de dégradation du matériau de construction qui varie de la décoloration à la perte complète de sa cohésion¹⁰⁰. Elles peuvent être destructives et affecter aussi bien la brique que le mortier de pose ou l'enduit jusqu'à l'altération complète de la maçonnerie.

2. Altérations des briques

Les pathologies de la brique résident dans l'altération de sa surface, de son aspect, dans l'augmentation de sa porosité et sa friabilité, jusqu'à la désagrégation¹¹⁰.

Les briques en terre cuite peuvent être affectées par un certain nombre d'altérations et de dégradations semblables à celles qu'on retrouve dans la pierre. La principale cause des différents désordres est la présence d'eau sous toutes ses formes. Elle peut se manifester en surface du fait des intempéries telles que pluies, ruissèlement, phénomène de gel et dégel mais aussi à l'intérieur des structures ou même à l'intérieur du matériau du fait de la condensation de l'humidité ou de sa remontée dans les murs par capillarités. Cette eau peut provoquer une dissolution interne des briques qui perdent leur résistance mécanique.¹¹¹

110. R.P.J. Van Hees, L.Binda, I.Papayanni and E.Toumbakari, Characterization and damaged analysis of old mortars, RILEM TC 167-COM: « Characterization of old mortars with respect to their repair », in Materials and structures, Vol 37, November 2004, pp 644-648.

111. Ministère de la culture et de la communication, Direction de l'architecture et du patrimoine, Mission ingénierie et référence technique, Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, Juin 2006, p34

Ce phénomène est qualifié selon Gilles Fauck ¹¹² « d'effets électrolytique », il atteste que les argiles qui sont des silicates d'alumine, en présence d'eau acide ou chargée de sels perdent leurs ions alumines, ce qui désagrège l'intérieur de la brique et lui donne un aspect cartonneux.

Les altérations les plus fréquentes qu'on peut relever sur les briques et de même sur les maçonneries réalisées avec ce matériau sont :

2.1. La désagrégation

C'est une désagrégation des grains. Les particules du matériau ne sont plus liées. C'est la dégradation la plus dangereuse, elle se manifeste selon différentes formes. Elles apparaissent à la base des murs, dans les zones soumises à des remontées capillaires. Gilles fauck ¹¹³ explique que ce phénomène est dû à la cristallisation de l'halite (un chlorure de sodium) présente dans la composition de la brique qui provoque des pressions engendrant son éclatement.

2.2. Altérations chromatiques

Il s'agit de l'accumulation superficielle de matériaux exogènes formant une couche peu cohérente, et d'épaisseur variable ainsi qu'une modification d'un ou plusieurs des paramètres caractérisant la couleur de la brique ¹¹⁴.

Parmi ces altérations, nous comptons, les efflorescences qui sont des amas de cristaux blancs dont l'aspect est poudreux, aciculaire (en forme d'aiguilles) ou filamenteux, elles sont localisés en surface et dont l'origine est les sulfates (sels solubles) qui peuvent être contenu dans les mortiers de jointoiement qui migrent vers la brique ¹¹⁵. Ainsi que les encroûtements qui sont des couches superficielles compactes et dures. Elles sont généralement de couleur blanc sale, ce sont des dépôts de calcite en surface dans des parties ayant reçu de l'eau qui a percolé à travers la maçonnerie (eau non canalisée) ¹¹⁶.

Dans certains cas on peut trouver des encroûtements noirs dus à la pollution et aux salissures qui finissent par se déposer sur certains supports.

112. Gilles fauck, pathologies de la brique : des maux communs avec la pierre, les cahiers techniques du bâtiment, 1997.

113. Gilles fauck, pathologies de la brique : des maux communs avec la pierre, les cahiers techniques du bâtiment, 1997. p 2

114. ICOMOS-ISCS, Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, 2008. p 50-52

115. ICOMOS-ISCS, Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, 2008. p 56.

2.3. Les attaques biologiques

L'atmosphère saturée d'humidité favorise les attaques biologiques dont les origines sont les plantes et les microorganismes tels que les bactéries, cyanobactéries, les algues, les moisissures et lichens (symbioses des trois derniers) ¹¹⁶. Ces altérations peuvent avoir différents aspects en fonction de la plante ou du micro organisme

Incriminé ¹¹⁷

- Les taches noires attestent de la présence de champignons microscopiques qui se développent en surface de la brique.
- Les taches verdâtres indiquent que les mousses se développent en surface grâce à la présence de l'eau et de matière nutritive produite grâce à une colonisation bactérienne.
- Les taches jaunes sont des lichens qui en présence d'eau colonisent les briques.
- Les taches rouges sont dues à la présence d'algues lichénoïdes.
- Les salpêtres qui sont liés à la présence des bactéries nitrifiantes dans l'environnement de la structure maçonnée, ils proviennent d'une cristallisation de nitrates (d'ammonium, de calcium ou de potassium) à la surface de la maçonnerie.

3. Altérations des mortiers de chaux

Le mortier utilisé aussi bien pour l'hourdage ou comme enduit, constitue la partie la plus stratégique et la plus vulnérable de la maçonnerie, son altération et la rupture de sa continuité met en péril l'ensemble de la maçonnerie. Les causes de pathologies des mortiers peuvent être de 3 ordres ¹¹⁸ :

3.1. Les causes mécaniques : des contraintes dues à des tassements différentiels, ou séismes, qui peuvent dépasser la résistance du mortier et le fissurer ainsi que l'incrustation de la végétation à l'intérieur des joints.

3.2. Effet de l'humidité :

La chaux de nature basique, sont sensibles à l'action des acides, ce qui se traduit par des chaînes de décomposition qui produisent des sels, dont certains (les sulfates) cristallisent en produisant un certains nombre d'altération comme les gonflements.

116. ICOMOS-ISCS, Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, 2008. p 70.

117. Gilles fauck, pathologies de la brique : des maux communs avec la pierre, les cahiers techniques du bâtiment, 1997. p 3

118. Ministère de la culture et de la communication, Direction de l'architecture et du patrimoine, Mission ingénierie et Référence technique, Manuel de sensibilisation à l restauration de la maçonnerie, Juin 2006, p34

3.3. Causes biologiques : la capacité des micro-organismes, bactéries, levures et champignons à transformer de l'azote atmosphérique en acide nitrique, ou des pyrites en acide sulfurique. La multiplication de ces phénomènes provoque des altérations parfaitement observables.

3.4. Causes humaines : Les actions de l'homme tels que des interventions de restauration maladroites comme l'utilisation de matériaux incompatibles ou bien des actions mécaniques malheureuse ou l'exécution de travaux inappropriés (installation de câbles , coffret électrique) peuvent engendrer une détérioration prématurée du bâtiment ¹¹⁹.

L'ensemble de ces causes induisent des pathologies qui couvrent un large domaine de désordres qui sont similaires à ceux qui affectent la brique. On peut en citer :

3.5. Les fissurations : qui peuvent avoir différentes manifestation tels que les lézardes, les fissures, les microfissures et le faïençage. Elles sont induites par plusieurs facteurs notamment des erreurs de fabrication ou de mise en œuvre, comme un séchage trop rapide de l'enduit. L'eau qui s'évapore trop vite, n'a pas le temps de participer à la carbonatation de l'enduit dans sa phase de prise aérienne. Les vibrations liées aux tremblements de terre, les incendies, le gel font aussi partie des causes de fissuration.

3.6. Altérations chromatiques : L'altération chromatique résulte de la modification fâcheuse d'un aspect physique de la maçonnerie. On y recense les salissures résultant souvent de la pollution, les encroûtements, les efflorescences, les spectres et les nuances de couleurs. Elles peuvent être d'origine chimique, biologique ou humaine. Elles sont liées principalement aux facteurs environnementaux et à l'action du temps ou à celle de l'homme.

4. Les causes d'altération des mortiers :

Elles sont dues aux pathologies courantes des mortiers qui constituent un large domaine de variétés. Les traitements associés impliquent de connaître les causes et d'en observer les effets. L'origine des causes de dégradations des mortiers à la chaux est le résultat des effets du vieillissement accéléré ou aux défauts de la mise en œuvre.

4.1. Les effets visibles et mesurables

Seul l'observation du support de mortier ou d'un badigeon, permet d'identifier une dégradation puis d'élaborer un remède, il convient d'examiner dans un premier temps les effets visibles, par fois mesurables de ces pathologies, on distingue :

119. R.P.J. Van Hees, L.Binda, I.Papayanni and E.Toumbakari, Characterization and damaged analysis of old mortars, RILEM TC 167-COM: « Characterization of old mortars with respect to their repair », in Materials and structures, Vol 37, November 2004, pp 644-648

4.2. Un manque d'adhérence

Le manque d'adhérence se traduit par décollement en plaques, un gonflement ou un cloquage à la surface. Pour les mortiers, il est conseillé d'effectuer systématiquement un sondage pour identifier la bonne tenue du revêtement en (sonnant à l'aide des doigts ou d'un outil, si l'mortier est bien accroché, il rendra le son de son support).



Fig.21 .Manque d'adhérence des mortiers

Les décollements sont souvent accompagnés des fissures, il faut alors sonder l'mortier d'une part et la fissure d'autre part et constater, s'il sonne creux, le manque d'adhérence s'observe par la formation d'écaille que l'on soulève avec l'angle.

4.3. Une perte de dureté

On évalue la dureté des mortiers en testant le revêtement avec un objet métallique pointu (clou, tournevis), si l'mortier a perdu de sa dureté, le clou s'enfonce ou raye la surface. Pour les peintures à la chaux, la dureté s'apprécie en grattant à l'angle, un badigeon apparaît plus clair dans la partie dégradée

4.4. Une porosité importante :

Pour évaluer la porosité du support, il suffit le mouiller, en faisant couler de l'eau sur le mur et en mesurant le temps d'absorption, sur support vertical, la hauteur de ruissellement est facile à apprécier, si l'eau est pompée rapidement, le support est trop absorbant.

4.5. La présence de fissure :

Visible à l'œil nu, elles apparaissent fine ou large unique ou en réseau.

L'humidification du mur peut être un moyen de mieux localiser les fissures qui l'on peut classer en quatre types :

- 1- **Le faïençage** : caractérisé par un réseau reconnaissable de petites fissures linéaires superficielles inscrites dans une surface d'environ 20 cm².

- 2- **Les microfissures** : elles sont des ouvertures discontinues d'une largeur inférieure à 0,2mm
- 3- **Les fissures** : elles sont plus larges que les microfissures (0,2 -2mm)
- 4- **Les lézards** : elles affectent l'mortier mais aussi le support et leurs largeurs sont supérieures à 2mm.



Fig.22. Présence de fissure dans le mortier

4.6. L'absence de cohésion :

Elle se manifeste à l'œil nu par un effet de farinage du support, la vérification de la cohésion de l'mortier ou de la peinture s'opère au toucher. Le simple frottement de la main suffit à constater le phénoménale grain de l'mortier roule sous le doigt. Le badigeon farine.

4.7. La présence de diverses traces :

De nombreuses traces peuvent apparaître sur la surface d'un mortier, d'une peinture parmi lesquelles figurent les auréoles, les efflorescences

4.8. Dégradation générale des mortiers :

Bien qu'elles sont différentes, mais elles ont un même effet qui est la dégradation du mortier en particulier est celles des monuments en générale qui sont affaiblis par l'usure du temps et les agents atmosphériques tel que :

4.8.1. Effet de l'humidité

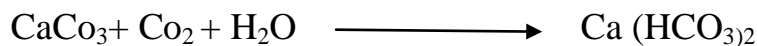
L'humidité est un élément déterminant dans la pathologie des enduits à la chaux. Elle a quatre origines différentes. Ces dégâts sont multiples et doivent être traités. On distingue : (humidité de sol, humidité due aux précipitation, humidité de l'enduit lui même et l'humidité due à l'eau de condensation.une présence excessive d'humidité dans les enduits amoindrie certaines de leurs caractéristiques (perte de la propriété à l'écrasement et de résistance

mécanique en générale, autrement l'humidité rend les enduits sensibles au gel (l'eau augmente de volume, sous l'action du gel) .on distingue trois types d'altérations :

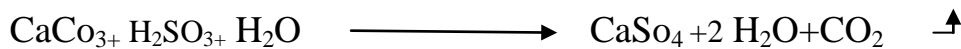
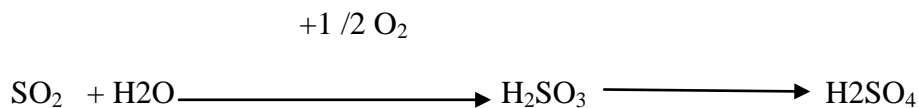
4.8.2. Altération chimiques :

Dans le cas d'une eau pure, celle-ci a le pouvoir de dissoudre la chaux de 1,3 à 1,6 g/l.

Le mortier perd de façon permanent une partie de ses performances, il en est de même avec une eau acide, les produit acides qui migrent dans les maçonneries sont : le gaz carbonique(CO₂) qui favorise la dissolution des calcaires en formant un bicarbonate de calcium très soluble



Le dioxyde de soufre : SO₂ qui entraine la formation de sulfate de calcium :



Ces acides attaquent les constituants alcalins pour donner des carbonates de chaux de teintes blanches, des sulfates de chaux de couleur nitrates de chaux d'aspect verdâtres.

(si l'eau contient des sulfates (eau séléniteuse), il se forme entre la chaux et les sulfates des sels de candelot (etringite), ceux-ci très sensibles a l'humidité ambiante (variation de volume), entraine une dégradation du mortier.

4.8.3. Altération physique

L'humidité contenue dans le mortier et la cause d'altération physique provoquée par plusieurs facteurs, parmi lesquels :

4.8.3.1. Le gel

L'action du gel exerce une forte pression sur les parois internes des pores et qui se manifeste par les décollements des plaques minces.

4.8.3.2. L'influence des sels :

L'humidité et la chaleur sont deux facteurs qui permettent le déroulement d'une réaction dans un milieu pollué, la ou l'air est mélangé avec des particules du gaz échappé des véhicules ou des stations thermiques, le contact de ces derniers forment certains sels.

4.8.3.3. La dilatation thermique :

Les écarts thermiques provoquent une expansion et une contraction variable selon la nature des minéraux qui composent la couche. Il se crée des tensions internes par différentes dilatations entre les cristaux dont les orientations sont quelquefois opposées et leurs coefficients de dilatations thermiques différentes entre le support et l'enduit.

4.8.4. Altérations biologiques :

La formation de matière organique (bactéries, cryptogames, algues, champignons, végétation), est aussi a l'origine de la dégradation du mortier par consommation des minéraux qu'il contient, ainsi que la poussée engendrée par les volumes des racines qui aboutissent à l'éclatement des mortier et les parements. Pour les plantes mêmes mortes, elles causent des dégradations importantes sur les parements.

Les matériaux sont décomposés sous l'action des microbes. Cette décomposition est accompagnée de libération de gaz, par les eaux de pluies provoquant la dégradation des matériaux.

La fig. montre l'organigramme de Décomposition des dépôts biologiques sur la surface de matériaux

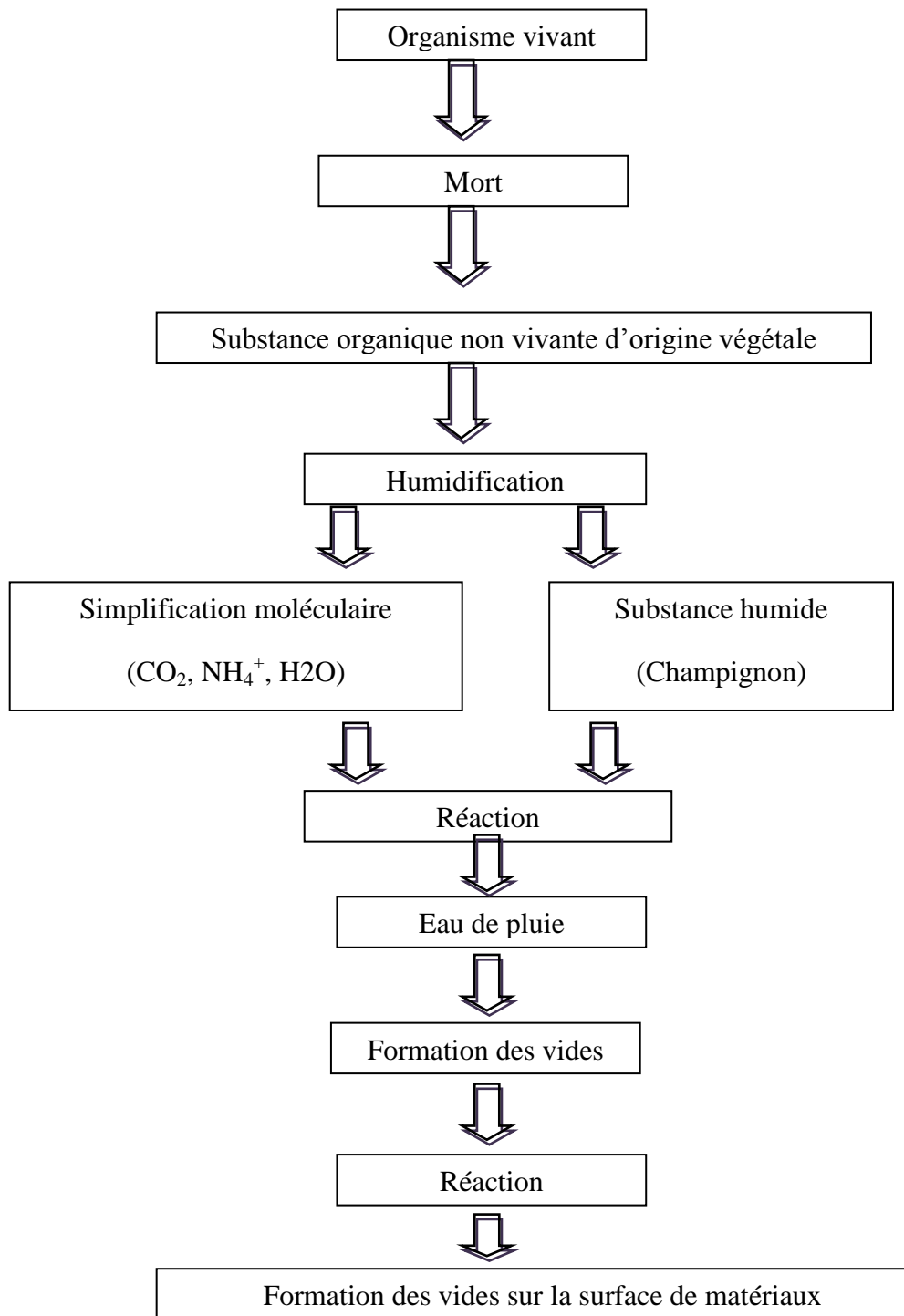


Fig.23. Décomposition des dépôts biologiques sur la surface de matériaux

4.8.4.1. Action de la pollution atmosphérique :

Les agents polluants les plus dangereux sont l'anhydride sulfureux et l'anhydride carbonique. il n'est pas encore établi d'une façon tranchée que les oxydes d'azotes soient aussi nocifs. la transformation de l'anhydride sulfureux SO_2 en acide sulfureux H_2SO_3 en présence de l'humidité ou de l'eau agit directement sur la structure de la couche de mortier

La solution acide en contact de calcaire constituant le sulfate de calcium $CaSO_4$. par temps sec, il se produit un transfert de la solution vers l'extérieur. figure (Fig.24). L'eau s'évapore et les sels solubles se déposent sur la surface. la répétition de ce cycle, engendre la fragilité des enduits et la formation de la croute sur la surface appelé le sulfine.



Fig. 24. Action de la pollution atmosphérique

4. Altération des pierres

Toute modification chimique ou physique des propriétés intrinsèques de la pierre, conduisant à une perte de valeur, de qualité ou à une entrave à son utilisation. Les différentes altérations que subi les pierres sont :

- Les fissures
- Les éclatements
- Les fragmentations
- . Les alvéolisations
- Dégâts mécaniques
- Trace d'impact
- Incision :
- Rayure (ou éraflure)
- Altération chromatique
- Colonisation biologique
- Les algues
- Les lichens

- Les mousses
- Les plantes

5. Les altérations des mortiers à travers les recherches bibliographiques récentes.

Introduction

Des nouvelles investigations ont été menées sur les mortiers de chaux telles que rapporté dans différents travaux issus de la littérature scientifique .C'est en fait depuis les dernières années que les liants dits chaux-pozzolane sont perçus comme des matériaux modernes. Cela est montré à travers des travaux de recherche exposés dans des workshops à l'instar de (HMC (2010)¹²⁰, HMC (2013)¹²¹, et HMC (2016)¹²²).

En effet, il a été confirmé par les résultats des travaux de (Eva Vejmelkova et al, (2012)¹²³, E.R. Grist (2015)¹²⁴, A. Gameiro et al (2014)¹²⁵). Que l'ajout du métakaolin à la chaux, provoquent des écarts considérables dans les propriétés physiques et mécaniques des mortiers obtenus.

Par ailleurs, d'autres investigations expérimentales ont été effectuées sur des nouvelles gammes de mortiers à base de chaux aérienne, avec l'utilisation d'un super plastifiant et le métakaolin (M. Perez-Nicolas et al, (2016)¹²⁶, J.I. Alvarez-Galindo, (2016)¹²⁷. Leurs résultats ont montré que le super plastifiant était à peine adsorbé sur les particules de chaux et les cristaux de C-S-H, ce qui conduit à la présence de molécules libres de superplastifiant dans la dispersion. Cela réduit également la quantité d'eau ajoutée lors de malaxage et améliore la structure interne et par conséquent, l'augmentation des résistances mécaniques.

120. Proceedings RILEM TC 203-RHM final workshop. in 2nd Conference on historic mortars and RILEM TC 203-RHM final workshop HMC2010, Prague, Czech Republic. RILEM Publications. (2010).

121. Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13, University of the West of Scotland, . Glasgow. (2013).

122. Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference - HMC 2016. Santorini, Greece.

123. E. Vejmelková, M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner, R. Černý, Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar. *Cem. Concr. Compos.*, 34(4) (2012) 486-492.

124. E.R. Grist, K.A. Paine, A. Heath, J. Norman, H. Pinder, Compressive strength development of binary and ternary lime–pozzolan mortars. *Materials & Design* (1980-2015), 52 (2013) 514-523.

125. A. Gameiro, A. Santos Silva, P. Faria, J. Grilo, T. Branco, R. Veiga, A. Velosa, Physical and chemical assessment of lime–metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio. *Cem. Concr. Compos.*, 45 (2014) 264-271.

126. M. Perez-Nicolas, A. Duran-Benito, R. Sirera-Bejarano, I. Navarro-Blasco, J.M. Fernandez-Alvarez, J.I. Alvarez-Galindo. The use of a lignosulfonate superplasticizer in repair air lime-metakaolin mortars. in Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference HMC2016, Section X-Repair mortars for historic masonry. Aristotle University of Thessaloniki. (2016), 375-382.

127. J.I. Alvarez-Galindo, J.M. Fernandez-Alvarez, I. Navarro-Blasco, M. Perez-Nicolas, R. Sirera-Bejarano, A. Duran-Benito. Behaviour of air lime-metakaolin mortars modified with polynaphthalene sulfonate as superplasticizer. in Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference HMC2016, Section X-Repair mortars for historic masonry. Aristotle University of Thessaloniki. (2016), 383-390

On peut également citer les travaux de (C. Borges et al). (2010)¹²⁸. Une caractérisation des mortiers de deux monuments historique: la forteresse de Santa Marta à Cascais, près de la côte atlantique, et du mur de défense de la ville de Lisbonne, dans laquelle les mortiers de chaux ont été utilisés dans des conditions environnementales sévères.

Leurs résultats ont montré que les mortiers qui ont été exposés à un environnement maritime sévère avec les énormes entrées de sel conservent une durabilité remarquable, qui pourrait être liée à la combinaison de sel avec les composés de calcium-silicates et de calcium-aluminium formé dans de vieux mortiers en présence d'eau.

On peut également citer les travaux de (Jason Bolton et al, (2010)¹²⁹. Qui a été porté sur l'altération du mortier de chaux médiéval et son interaction avec l'environnement. Leurs résultats ont montré aussi que l'humidité est l'agent clé de la décomposition des mortiers, alors que l'attaque par le sel est relativement rare,

Des recherches de (Jan Elsen et al (2010)¹³⁰ ont été concentrées sur le développement de mortiers à propriétés pouzzolaniques par le remplacement de la pouzzolane avec une pouzzolane produite localement. Le champ d'application de ce type de mortiers était principalement des structures en contact avec l'eau, Les résultats ont montré que les mortiers sont durs, solides et ont généralement une bonne durabilité à la fois comme mortiers de maçonnerie ou comme enduits.

D'autres travaux de (Maria. T, et al (2013)¹³¹. Ou le processus d'hydratation de la pâte de pouzzolane de chaux a été suivi. La méthode s'est révélée être un outil sensible pour sonder le développement des pores capillaires, formé lors de l'hydratation des mélanges chaux-pouzzolane. la méthode à pour objectif la surveiller l'évolution de la microstructure et qui constitue un outil prometteur pour les personnes impliquées dans conservation du patrimoine architectural pour évaluer avec précision sur le terrain la durabilité et la durée de vie des mortiers à la chaux et à la pouzzolane.

128. C. Borges, A. Santos Silva, R. Veiga , Mortiers anciens sous l'action du milieu marin: une caractérisation physico-chimique.(2010) . p 59.

129. Jason Bolton. 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop 22-24 September 2010, Prague, Czech Republic

130. Jan Elsen , Koenraad Van Balen and Gilles Mertens, Hydraulicity in Historic Lime Mortars 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop 22-24 September 2010, Prague, Czech Republic. p159

131. Maria Tziotziou, Eleni Karakosta, Ioannis Karatasios, Michalis Fardis, Pagona Maravelaki-Kalaitzaki, Application of 1H NMR in the Hydration Monitoring of Lime-Pozzolan Mortars. Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13, University of the West of Scotland, . Glasgow. (2013).

Par ailleurs, d'autres investigations expérimentales ont été effectuées sur des nouvelles gammes de mortiers à base de chaux aérienne

On peut également citer les travaux de (Lukáš Balík et al (2016) ¹³²) qui ont évalué les mortiers de chaux avec l'ajout pouzzolanique et le métakaolin appliqués comme enduits sur la maçonnerie originale, Les résultats ont indiqué que ces mortiers sont appropriés pour être utilisés dans les travaux de restauration de bâtiments, car ces mortiers seront capables d'assurer l'intégrité et la durabilité de la maçonnerie ancienne.

Récemment, une étude (M.A.O. Mydin) (2018)¹³³, est consacrée à l'effet de l'albumine d'œuf (ajout organique utilisé comme adjuvant naturel) sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers de chaux. Les résultats obtenus indiquent que la résistance à la compression et à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage d'albumine d'œuf ajouté à la chaux. Un autre travail de (Eleni Aggelakopoulou et al) (2019) ¹³⁴, a été porté sur la porosimétrie, et l'absorption d'eau par capillarité ou par immersion totale dans l'eau des mortiers élaborés par la chaux en pâte et d'autres élaborés par la chaux en poudre. Les résultats ont montré que les mortiers en poudre de chaux présentent une distribution des pores unimodale, tandis que les mortiers en pâtes de chaux en présentent un bimodale.

6. Conclusion

Les édifices historiques subissent au fil des temps de multiples agressions mécaniques, atmosphériques ou biologiques. Il en résulte différentes pathologies qui altèrent leurs maçonneries, depuis les simples salissures jusqu'aux déstabilisations structurelles pouvant mener à la ruine de l'édifice. Ces altérations détruisent l'épiderme des monuments, et à terme, elles peuvent affecter la structure porteuse et sa stabilité.

Les matériaux de construction de ces édifices à caractère historique, notamment les mortiers sont sujets à des processus de dégradation de différentes natures. L'altération des matériaux archéologiques est un processus complexe qui résulte de la combinaison de mécanismes de dégradation chimiques, physiques et mécaniques.

132. Tamara M. de A Bonilla, Ana Florinda Ferreira, Aline F. Nóbrega, Mortiers à la chaux-métakaolin appliqués sur le palais Soledade, Recife, Brésil, Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference - HMC 2016. Santorini, Greece. (2016).

133. M.A.O. Mydin, Physico-mechanical properties of lime mortar by adding exerted egg albumen for plastering work in conservation work. J. Mater. Environ. Sci., 9(2) (2018).p. 376-384.

134. E. Aggelakopoulou, A. Bakolas, A. Moropoulou, Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. Constr. Build. Mater., 225 (2019) 633-641.

Ces altérations peuvent être définies comme une forme de dégradation du matériau de construction qui varie de la décoloration à la perte complète de sa cohésion. Elles peuvent être destructives et affecter aussi bien la brique que le mortier de pose ou l'enduit jusqu'à l'altération complète de la maçonnerie.

Partie II : Partie expérimentale

Le vieux mortier restant sur les bâtiments historiques est une source importante de la connaissance qui peut être employée dans le travail de restauration. Afin de concevoir à une restauration avec le mortier de propriété et composition semblable au mortier original. Dans ce travail, nous présentant Les différentes méthodes d'analyses et de caractérisations des constituants des mortiers anciens de la piscine romaine de Guelma. Ainsi que la formulation et la caractérisation des mortiers au laboratoire pour les utilisés dans la restauration de la piscine et autres site qui ont le même environnement. Comme l'illustre la figure (Fig.3)

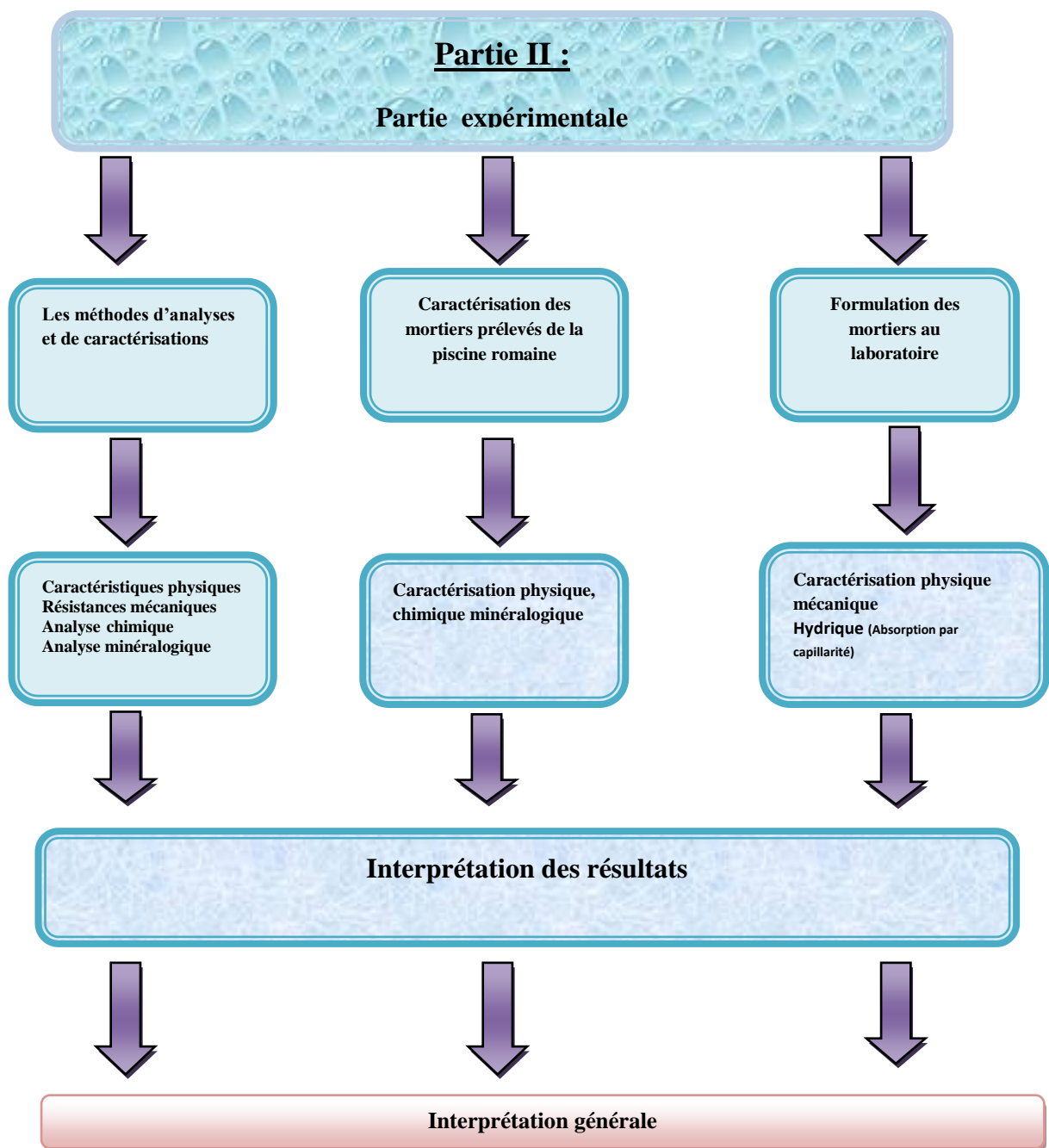


Fig.3. Plan de travail de la partie II

Deuxième partie: Partie expérimentale

Chapitre 01 : Les méthodes d'analyses et de caractérisations

1. Introduction	86
2. Caractéristiques physiques	87
2.1. La masse volumique	87
2.1.1. La masse volumique absolue	87
2.1.2. La masse volumique apparente	88
2.2. Le potentiel hydrogène pH	89
2.3. Teneur en CaO libre	89
2.4. L'absorption d'eau par immersion totale	90
2.5. La porosité ouverte.	90
2.6. L'absorption d'eau par capillarité	91
2.7. Analyse granulométriques par tamisage	92
3. Résistances mécaniques	92
3.1. Résistances mécaniques à la flexion	92
3.2. Résistances mécaniques à la compression	93
4. L'analyse chimique par fluorescence X, (XRF)	94
5. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX)	95
6. Conclusion	97

Chapitre 02 : Histoire, état de conservation et caractéristiques des matériaux de la piscine

1. Introduction	100
2. Situation géographique de la ville de Guelma	100
3. Histoire et archéologie de la ville de Guelma	101
3.1. Préhistoire	101
3.2. La ville de Guelma de l'époque romaine au XIXe siècle	101
3.3. La ville de Guelma à la Période française de 1870 à 1962	102
4. Patrimoine architectural et environnemental de la ville de Guelma	102
4.1. Le théâtre romain de Guelma	102
4.2. Les vestiges antiques de Thibilis (Sellaoua Announa)	103
4.3. La Piscine romaine Héliopolis	103
5. Etat de conservation de la piscine romaine	104
5.1. L'effondrement des murs	105
5.2. Les pertes de masse	105
5.3. La perforation	106
5.4. Les plantes poussant	106
5.5. Les fissures	106
5.6. Travaux et interventions effectués sur la piscine	107
6. Caractérisation des échantillons	107
6.1. Protocole de prélèvement des échantillons de la piscine	107
6.2. Description des échantillons	108
6.3. Caractérisation des échantillons	109
6.3.1. Caractérisation minéralogique par diffraction X (DRX)	110
6.3.2. Caractérisation chimique par fluorescence X	114

6.3.3. Caractéristiques physiques	115
6.3.3.1. La masse volumique	115
6.3.3.1.1. La masse volumique spécifique	115
6.3.3.1.2. La masse volumique apparente	116
6.3.3.2. L'humidité	116
6.3.3.3. Le potentiel hydrogène (pH)	119
6.3.3.4. Teneur en CaO libre	119
6.3.3.5. L'Absorption d'eau	121
7. Interprétation des résultats	122
8. Conclusion	122

Chapitre 03: Elaboration des mortiers

1. Introduction	127
2. Les matières premières utilisées pour l'élaboration des mortiers	129
2.1. Description des matières premières	129
Le liant	129
Les agrégats	129
Addition minérale	129
La brique pillée	129
La pouzzolane	129
Le ciment naturel	129
Le métakaolin	129
L'adjuvant	130
L'eau de gâchage	130
3. Caractérisation matières premières utilisées pour l'élaboration des mortiers	132
3.1. Détermination des masses volumiques réelles	132
3.2. Les humidités des matières premières utilisées pour les mortiers	132
3.3. Analyse granulométrique des sables utilisées.	133
3.3.1. L'analyse granulométrique par tamisage du sable jaune	133
3.3.2. L'analyse granulométrique par tamisage du sable noir.	134
3.4. Détermination de module de finesse des sables utilisées.	134
4. Formulation des mortiers	135
4.1. Mélange des matériaux	135
4.2. L'étalement au cône	136
4.3. Rapport E/C et classe d'étalement.	136
4.4. Confection des mortiers.	137
5. Variantes de mortiers de restauration formulés	138
5.1. La première variante des mortiers (Ajout de la brique pilée et l'huile d'olive)	139
5.1.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	140
5.1.1.1 Caractérisation physique	141
5.1.1.2. Caractérisation mécanique	147
5.1.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	147
5.1.1.2.2. Résistance mécanique à la compression.	149
5.1.1.3. Caractérisation hydrique	151
5.1.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité	151
5.2. La deuxième variante des mortiers (Ajout de la pouzzolane).	154
5.2.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	155
5.2.1.1. Caractérisation physique.	157
5.2.1.2. Caractérisation mécanique.	162
5.2.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	162

5.2.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	164
5.2.1.3. Caractérisation hydrique	165
5.2.1.3. Absorption d'eau par capillarité	165
5.3. La troisième variante de mortier (Ajout de la pouzzolane et brique pillée).	169
5.3.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	171
5. 3.1.1. Caractérisation physique.	172
5. 3.1.2. Caractérisation mécanique.	177
5. 3.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	177
5.3.1.2. 2. Résistance mécanique à la compression	179
5.3.1.3. Caractérisation hydrique	181
5. 3.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité	181
5.4. La quatrième variante de mortier ((Ajout de métakaolin).	185
5.4.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés..	187
5.4.1. 1. Caractérisation physique.	187
5.4.1. 2. Caractérisation mécanique.	193
5.4.1. 2.1. Résistance mécanique à la flexion.	193
5.4.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	194
5.4.1.3. Caractérisation hydrique	197
5.4.1. 3.1. Absorption d'eau par capillarité	197
5.5. La cinquième variante de mortier (Ajout de ciment naturel).	201
5.5.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés..	204
5.5.1. 1. Caractérisation physique.	204
5.5.1.2. Caractérisation mécanique	210
5.5.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	210
5. 5.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	212
5.5.1.3. Caractérisation hydrique	213
5.5.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité	213

**CHAPITRE 01
METHODES D'ANALYSES ET
DE CARACTERISATIONS**

Chapitre 01 : Les méthodes d'analyses et de caractérisations

1. Introduction	86
2. Caractéristiques physiques	87
2.1. La masse volumique	87
2.1.1. La masse volumique absolue	87
2.1.2. La masse volumique apparente	88
2.2. Le potentiel hydrogène pH	89
2.3. Teneur en CaO libre	89
2.4. L'absorption d'eau par immersion totale	90
2.5. La porosité ouverte.	90
2.6. L'absorption d'eau par capillarité	91
2.7. Analyse granulométriques par tamisage	92
3. Résistances mécaniques	92
3.1. Résistances mécaniques à la flexion	92
3.2. Résistances mécaniques à la compression	93
4. L'analyse chimique par fluorescence X, (XRF)	94
5. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX)	95
6. Conclusion	97

1. Introduction

Les méthodes de caractérisation sont nombreuses et généralement normalisées. Le choix des normes est lié au type de matériaux à étudier, ou bien aux propriétés à déterminer. Elles peuvent différer d'un pays à l'autre mais elles sont très strictes tant avec les conditions expérimentales à respecter, qu'avec le nombre d'échantillons à tester ou la forme et la taille qu'ils doivent respecter. Par ailleurs, Le choix du « cortège analytique » est dicté par la problématique soulevée, les objectifs recherchés et l'objet à étudier.

La méthode de caractérisation à adopter, nous permis d'aborder les matériaux selon différentes échelles. Cette méthode se base sur des analyses physiques, chimiques et minéralogiques. Les avantages de cette méthode sont que les différentes observations offrent directement un grand nombre d'informations, sur la texture et les composants de l'échantillon. Le couplage de ces observations avec des techniques d'analyse physico-chimiques, nous permis d'identifier des éléments non observables et de contrôler et valider en partie les premières observations.

2. Caractéristiques physiques

2.1. La masse volumique

2.1.1. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue (masse spécifique) est définie comme étant le quotient de la masse sèche de l'échantillon sur le volume occupé par la matière solide, sans tenir compte des pores et des capillaires. Elle est désignée par M_s . La figure (Fig.25) présente l'usage et la mesure de la masse des pycnomètres utilisés. Selon la méthode normalisée (NF P18-558).



Fig. 25. La détermination de la masse volumique absolue. (M. Belaidi)

Le calcul de la masse volumique absolue a été réalisé en appliquant la formule suivante :

$$M_s = \frac{(M_2 - M_1) \cdot \rho}{[M_4 + (M_2 - M_1)] - M_3}$$

Où :

M_1 : la masse du pycnomètre vide (g)

M_2 : la masse du pycnomètre + l'échantillon (g)

M_3 : la masse du pycnomètre + l'échantillon+ toluène (g)

M_4 : la masse du pycnomètre+ toluène (g)

M_s : la masse volumique absolue (masse spécifique)

ρ : la densité du solvant 0.86 g/cm³

2.1.2. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente est définie comme le rapport de la masse sèche de l'échantillon par son volume en tenant compte des pores et des capillaires. Elle est désignée par M_v . Dans notre travail, elle est obtenue en suivant la méthode hydrostatique d'un échantillon paraffiné. la figure (Fig.26) présente les principales étapes de cette méthode.



Fig. 26. La détermination de la masse volumique apparente. (M. Belaidi)

Le calcul a été fait en appliquant la formule suivante :

$$M_v = \frac{M_s}{\frac{M(s+p) - M(s+p)L}{1} - \frac{M_p}{\rho}}$$

Où :

M_s : masse de l'échantillon sec (g)

$M(s+p)$: masse de l'échantillon paraffiné pesé à l'air (g)

$M(s+p)L$: masse de l'échantillon paraffiné pesé sous l'eau (g)

M_p : masse de la paraffine $M_p = M(s+p) - M_s$ (g)

M_v : masse volumique apparente des échantillons (g/cm³)

ρ : Densité de la paraffine = 0,9 g/cm³

La densité d'eau = 1 g/cm³

2.2. Le potentiel hydrogène pH

Le potentiel hydrogène, plus connu sous le nom de "pH", permet de savoir l'acidité ou la basicité d'un corps ou d'une solution. il est déterminé à l'aide d'un « pH mètre », figure (Fig.27)



Fig.27. Calcul de pH à l'aide d'un pH mètre. (M. Belaidi)

2.3. Teneur en CaO libre

La teneur en CaO libre a été déterminée par la méthode de Saccharose. La figure (Fig.28) Présente les principales étapes réalisées.

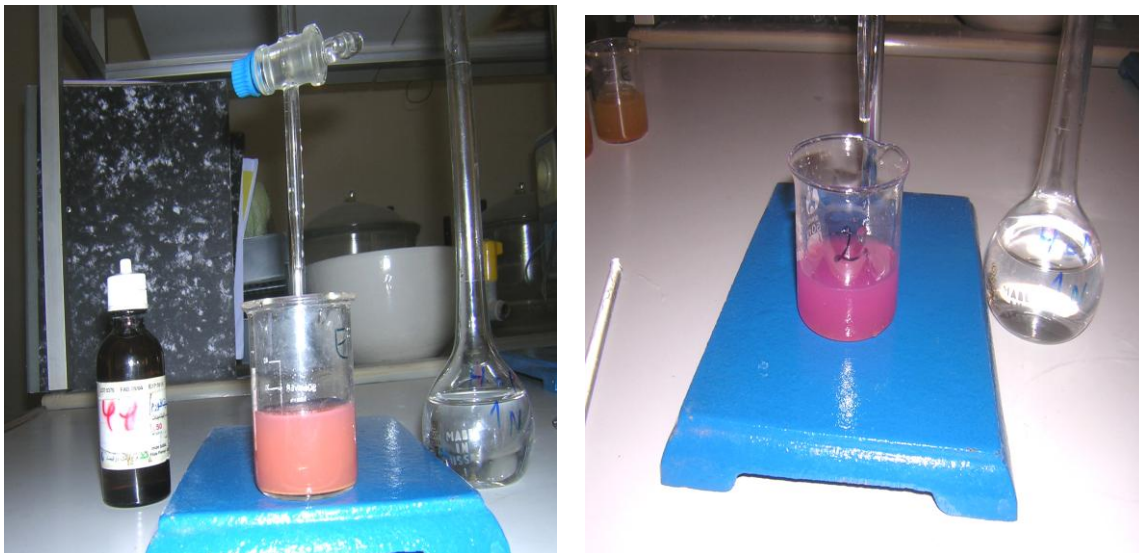


Fig.28. détermination de la teneur en CaO libre par la méthode de Saccharose. (M. Belaidi)

Les méthodes d'analyses et de caractérisations

Le calcul a été obtenu en appliquant la formule suivante :

$$\text{CaO}_L = \frac{0.02804 \times V}{G} \times 100\%$$

Où :

V : volume de la solution (Hcl) à 1N versée (ml)

G : prise d'essai des échantillons égale à 0.25g

0.02804: Coefficient.

2.4. L'absorption d'eau par immersion totale.

L'essai consiste à déterminer la capacité des mortiers à absorber l'eau après immersion totale des éprouvettes d'essais dans un bac d'eau jusqu'à la saturation. Trois éprouvettes d'essais 4 cm x 4 cm x 16 cm de chaque composition ont été préparées et conservées, après démoulage, à l'air libre pendant 28 jours. Ensuite étuvées à 105°C jusqu'à masse constante puis immergées complètement dans l'eau jusqu'à l'obtention de la masse constante. Elle est réalisée selon la norme *NF P18 554*.

La masse totale de l'eau absorbée est alors évaluée en fonction de la masse de l'éprouvette sèche suivant l'expression suivante :

$$Ab(\%) = \frac{Md - Ms}{Ms} \times 100$$

Avec :

Ms : La masse de l'échantillon sec

Md : masse de l'échantillon saturé d'eau.

2.5. La porosité ouverte (Po).

La porosité ouverte est déterminée par la proportion de vides (pores) du matériau, reliés entre eux et donc accessibles à l'eau, Généralement exprimée par un pourcentage en volume (%). Elle représente le volume des pores ouverts par rapport au volume total de l'échantillon.

Le calcul de la porosité ouverte se fait à la base de la formule suivante :

$$Po(\%) = \frac{M2 - M1}{M2 - M3} \times 100$$

Avec :

M1 : Pesée de l'échantillon cuit, séché jusqu'à la masse constante

M2 : Pesée de l'échantillon après ébullition et séchage à l'air libre

M3 : Pesée de l'échantillon saturé sous l'eau.

2.6. L'absorption d'eau par capillarité

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité dénommé couramment « Sorptivité » ou encore « Absorptivité » est un 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 ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques 4 cm x 4cm x 16 cm préalablement séchées dans une étuve à 105°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 d'immersion partiel constant de 5 mm (Fig.29). Les éprouvettes d'essai ont été par ailleurs couvertes d'un film en plastique pour assurer une remontée d'eau unidirectionnel et pour empêcher l'échange hydrique avec le milieu ambiant.



Fig.29. Essai de l'absorption par capillarité. Laboratoire centrale de l'ENGOA. (M. Belaidi).

La sorptivité est déterminée par le modèle mathématique développé par (Hall et al)¹¹³, C'est en fait la pente de la droite de la courbe caractérisant l'évolution du volume d'eau absorbée par capillarité dans les premiers moments de l'essai en fonction de la racine carrée du temps,

L'expression s'écrit :

$$i = S\sqrt{t}$$

i : Taux d'absorption d'eau (g/cm²), Il a la dimension d'une longueur et correspond au volume cumulé absorbé par unité de surface absorbante.

S : Sorptivité du matériau (mm/min^{1/2}).

2.7. Analyse granulométriques par tamisage

L'analyse granulométrique traduit la distribution pondérale des grains par classe granulaire définit deux dimension d'ouverture de mailles carrées avec des teneurs déterminées de tamisât et de refus.

Elle est faite à l'aide d'une tamiseuse,et selon la norme (NF EN 933-1), 500g de masse de chaque type de sable passe par une série de tamis normalisé présenté dans la figure (Fig.30).



Fig.30. Tamiseuse. (M. Belaidi).

3. Les résistances mécaniques

3.1. La résistance mécanique a la flexion

Les essais de la résistance mécanique à la flexion sont conduits conformément à la norme (NF P18-407). Les éprouvettes soumises à cet essai sont des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm. Le dispositif utilisé est un dispositif de flexion 3 points. (Fig.31).



Fig.31.Essai de flexion 3 points sur les éprouvettes 4x4x16 cm. (M. Belaidi).

3.2. La résistance mécanique a la compression :

Les essais de la résistance mécanique à la compression du mortier ont été effectués selon la norme NF P18-406. Chaque éprouvette donne un résultat de flexion et deux de compression. Chaque résistance à la compression correspond à la moyenne de deux mesures. . (Fig.32).



Fig.32.Essai de compression sur les éprouvettes 4x4x16 cm. (M. Belaidi).

4. L'analyse chimique par fluorescence X, (XRF)

La composition chimique élémentaire des matériaux est une analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X selon le principe de la norme *NF P 15-467*, ainsi que la perte au feu selon les modalités de la norme *EN 1744-1*. (Fig.33)

C'est une méthode d'analyse élémentaire qui donne la constitution des matériaux au et non sa structure. Elle permet de déceler la nature des ions, atomes, éléments ou molécules contenant dans le cristal. Elle utilise l'effet Compton l'absorption d'un rayonnement X au sein de la matière provoque l'excitation des atomes qui émettent en rayonnement secondaire dit de « Fluorescence ». Dont les raies caractéristiques ont des longueurs d'onde de plus grande dimensions que le rayon incident, les longueurs d'ondes et les intensités étant bien déterminées, pour chaque atome, peuvent servir d'identification de la nature des atomes.

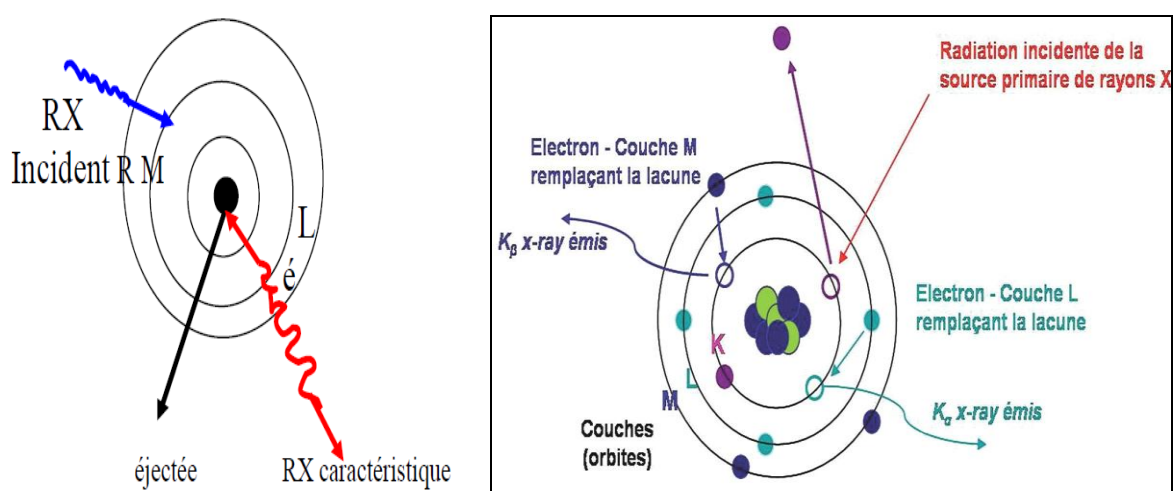


Fig.33.Principe de la fluorescence X.

- Principe

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, Les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique. (Fig.34)



Fig.34. Un spectromètre de fluorescence X

5. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) :

Les rayons X sont à la base de différentes techniques d'analyse comme la radiographie, la spectroscopie et la diffractométrie. Ces radiations électromagnétiques ont une longueur d'onde de l'ordre de l'Ångström ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

La matière touchée par les RX, émet une radiation secondaire, dite *radiation diffusée*, de même longueur d'onde (λ), que la radiation incident (*diffusion cohérente*), une faible partie de l'intensité subit une modification de la longueur d'onde par effet Compton (*diffusion incohérente*). Le phénomène de diffusion s'analyse très simplement en fonction de l'angle et la direction d'observation par rapport au faisceau incident. (Fig.35)

- Principe de la méthode

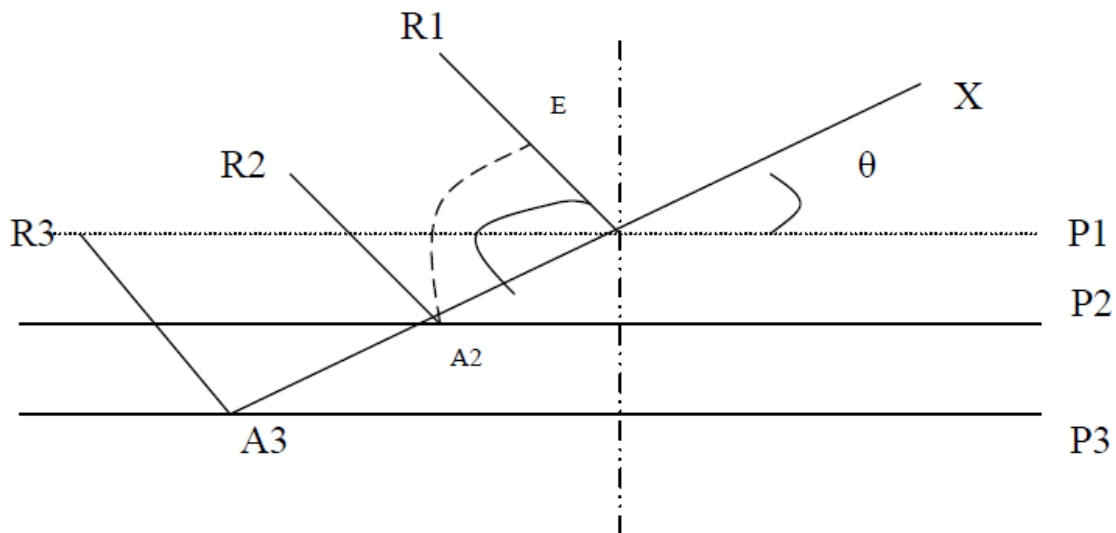
- L'analyse aux RX, permet de déterminer la composition minéralogique de la fraction Fine ($=2\mu\text{m}$) des roches sédimentaires représentée généralement pour les matériaux cristallins
- Cette technique est basée sur la diffusion d'un rayon X monochromatique par les plans réticulaires des cristaux contenus dans l'échantillon selon la loi de BRAGG :

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

Avec n =nombre entier, λ = longueur d'onde utilisée en Å, θ = l'angle de diffraction en degré, d =distance réticulaire (Å)

Les méthodes d'analyses et de caractérisations

- Soit un faisceau monochromatique de longueur d'onde λ
- Tombant sur un système de plans réticulaires d'écart (d) sous un angle (θ)
- Un rayon R1 se réfléchit sur premier plan réticulaire (P1) en A1 (suivant les lois Habituelles en optique : angle d'incidence = angle de réflexion)
- Comme les rayons X sont extrêmement pénétrants, la partie restante pénètre dans le cristal et se réfléchit à sur tour de la même manière sur les plans réticulaire parallèles rencontrés successivement
- Pour les longueurs d'onde utilisées, les phénomènes de réfractions sont négligeables
- On peut donc admettre que le rayon qui pénètre dans le cristal n'est pas dévié et conserve sa même vitesse
- Il en résulte que tous les rayons réfléchis seront parallèles entre eux.



$$n \lambda = 2d \sin(\theta) \quad \alpha = n \lambda \quad \sin(\theta) \leq 1 \quad n \leq \frac{2d}{\lambda}$$

Fig.35. Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés D'une distance d.

Dans un même composé, plusieurs familles de plan peuvent être présentes. C'est pour cette raison qu'un balayage angulaire assez large est effectué. La variation de l'angle permet de déterminer les angles pour lesquels n est entier dans l'équation de Bragg.

L'angle étant ainsi connu et la longueur d'onde étant prédéterminée et constante, il est alors possible de déterminer la distance réticulaire.

Les méthodes d'analyses et de caractérisations

L'intensité relative des pics de diffraction est calculée en divisant l'intensité absolue d'un pic par l'intensité absolue du pic le plus intense puis convertie en pourcentage. Les valeurs d'intensité absolue ne sont généralement pas utilisées car elles varient avec les paramètres instrumentaux et expérimentaux.

Le spectre de diffraction est spécifique et unique à une seule phase, même si des phases ont la même composition chimique. La position des pics ainsi que leurs intensités relatives sert à des comparaisons dans des bases de données menant ainsi à l'identification de la ou des phases présentes.

La première étape consiste à chercher des spectres compatibles dans des bases de données. Une comparaison est ensuite faite entre les résultats expérimentaux et le spectre de référence. La dernière étape consiste en l'identification des phases en acceptant ou non la comparaison.

6. Conclusion

Il existe aujourd'hui une multitude de techniques et de combinaisons possibles de méthodes d'analyses qui peuvent être utilisées pour l'étude et la caractérisation des matériaux. Ces méthodes de caractérisation sont nombreuses et généralement normalisées. Le choix des normes est lié au type de matériaux à étudier, ou bien aux propriétés à déterminer.

La méthode de caractérisation à adopter, nous a permis d'aborder les matériaux selon différentes échelles. Cette méthode se base sur des analyses physiques mécaniques, chimiques et minéralogiques. Les avantages de cette méthode sont que les différents résultats offrent directement un grand nombre d'informations, sur sa composition, sa texture ainsi que son comportement dans les différents environnements.

**CHAPITRE 02
HISTOIRE, ETAT DE
CONSERVATION ET
CARACTERISTIQUES DES
MATERIAUX DE LA PISCINE**

Chapitre 02 : Histoire, état de conservation et caractéristiques des matériaux de la piscine

1. Introduction	100
2. Situation géographique de la ville de Guelma	100
3. Histoire et archéologie de la ville de Guelma	101
3.1. Préhistoire	101
3.2. La ville de Guelma de l'époque romaine au XIXe siècle	101
3.3. La ville de Guelma à la Période française de 1870 à 1962	102
4. Patrimoine architectural et environnemental de la ville de Guelma	102
4.1. Le théâtre romain de Guelma	102
4.2. Les vestiges antiques de Thibilis (Sellaoua Announa)	103
4.3. La Piscine romaine Héliopolis	103
5. Etat de conservation de la piscine romaine	104
5.1. L'effondrement des murs	105
5.2. Les pertes de masse	105
5.3. La perforation	106
5.4. Les plantes poussant	106
5.5. Les fissures	106
5.6. Travaux et interventions effectués sur la piscine	107
6. Caractérisation des échantillons	107
6.1. Protocole de prélèvement des échantillons de la piscine	107
6.2. Description des échantillons	108
6.3. Caractérisation des échantillons	109
6.3.1. Caractérisation minéralogique par diffraction X (DRX)	110
6.3.2. Caractérisation chimique par fluorescence X	114
6.3.3. Caractéristiques physiques	115
6.3.3.1. La masse volumique	115
6.3.3.1.1. La masse volumique spécifique	115
6.3.3.1.2. La masse volumique apparente	116
6.3.3.2. L'humidité	116
6.3.3.3. Le potentiel hydrogène (pH)	119
6.3.3.4. Teneur en CaO libre	119
6.3.3.5. L'Absorption d'eau	121
7. Interprétation des résultats	122
8. Conclusion	122

1. Introduction

Le vieux mortier restant sur les bâtiments historiques est une source importante de la connaissance qui peut être employée dans le travail de restauration. Afin de concevoir à une restauration avec le mortier de propriété et composition semblable au mortier original. Dans ce travail, la caractérisation et l'identification des différents constituants des mortiers anciens de la piscine romaine de Guelma, a été effectuée par les méthodes chimiques, minéralogiques et physiques à savoir : la fluorescence X, la diffraction aux rayons X (DRX), la détermination de la masse spécifique et la masse volumique, l'humidité, l'absorption, le pH, et la teneur en CaO libre. Ces différents types d'analyse et observations ont été réalisés sur trois mortiers prélevés des différents endroits de la piscine, ce qui nous a fourni des données utiles pour la caractérisation des matériaux de sources et l'étude de leurs changements ou leurs dégradations.

2. situation géographique de la ville de Guelma :

Guelma, La ville numide s'appelait Malacca et fut importante sous le règne de Massinissa. Des inscriptions libyques trouvées à Guelma prouvent que la région a été civilisée bien avant l'arrivée des Carthaginois ou les Romains, des mentions latines attestent que Guelma portait déjà le nom de « Calama », bien que ce nom soit probablement d'origine phénicienne. L'histoire de Guelma est riche en événements, et son territoire est parsemé de sites d'une étonnante originalité. Guelma se situe au cœur d'une grande région agricole à 290 m d'altitude, entourée de montagnes (Maouna, Dbegh, Houara), ce qui lui donne le nom de ville assiette, sa région bénéficie d'une grande fertilité grâce notamment à la Seybouse et d'un grand barrage qui assure un vaste périmètre d'irrigation. La Wilaya de Guelma se situe au Nord-est du pays et constitue, du point de vue géographique, un point de rencontre, voire un carrefour entre les pôles industriels du Nord (Annaba et Skikda) et les centres d'échanges au Sud (Oum El Bouaghi et Tébessa). Elle occupe une position médiane entre le Nord du pays, les Hauts plateaux et le Sud. La wilaya de Guelma s'étend sur une superficie de 3.686,84 Km².

La wilaya de Guelma est limitrophe aux Wilayas de : Annaba, au Nord,

El Taref, au Nord-est,

Souk Ahras, à l'Est,

Oum El-Bouaghi, au Sud, Constantine, à l'Ouest,

Skikda, au Nord-ouest.

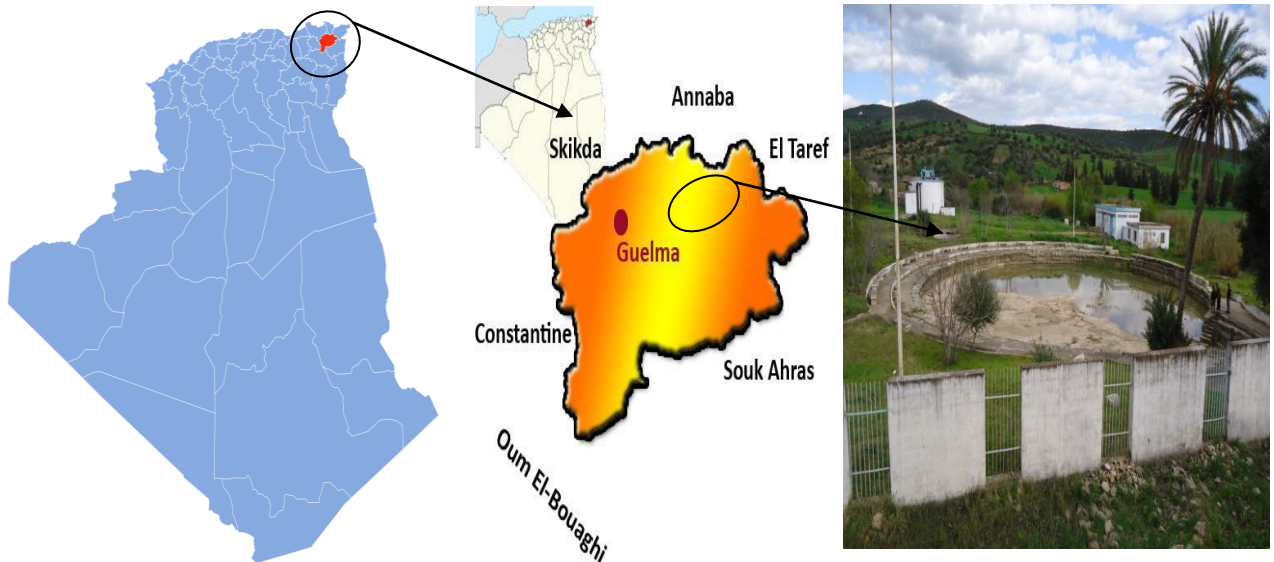


Fig.36. Situation géographique de la piscine romaine de Guelma. (M. Belaidi)

3. Histoire et archéologie de la ville de Guelma

3.1. Préhistoire

La région était habitée et possède une nécropole, les Vestiges de Roknia composée de plus de 3 000 dolmens ¹³⁵.

3.2. La ville de Guelma de l'époque romaine au XIXe siècle

La ville numide s'appelait Malacca et fut importante sous le règne de Massinissa. Des inscriptions libyques trouvées à Guelma prouvent que la région a été civilisée bien avant l'arrivée des Carthaginois ou des Romains ; des mentions latines attestent que Guelma portait déjà le nom de « Calama », bien que ce nom soit probablement d'origine phénicienne. L'histoire de Guelma est riche en événements, et son territoire est parsemé de sites.

Salluste rapporte les récits des batailles que Jugurtha y livra en 110 av. J.-C. aux troupes romaines; il aurait vaincu, non loin de la ville de Guelma, précisément dans la mystérieuse Suthul, le général romain Postinius Albinus. L'antique Calama devint un centre urbain important au cours du premier siècle de notre ère. Calama est élevée au rang de municipes sous l'empereur Trajan et patronnée par Vibia Aurelia Sabina, dernière fille de Marc Aurèle, et sœur fictive de l'empereur Septime Sévère lorsque ce dernier se proclama fils adoptif de Marc Aurèle (fin du IIe siècle) (1961) ^{136,137}.

135. http://www.guelma.org/francais/index2.php?rub=sejour&srub=promenades_guelma&goto=necropoles_dolmeniques_Guelma [archive]

136. Attesté par les inscriptions latines, Le Corpus Inscriptionum Latinarum, Volume III, collections louvre. (1658) .p 962

137. Hans-Georg Pflaum, « Les gendres de Marc-Aurèle », Journal des savants, 1961, N°1. p. 38.

Calama fut avec Sitifis (Sétif) et Hippo-Reggius (Annaba), un des greniers de Rome au cours des 2^{ème} et 3^{ème} siècles apr. J.-C., attestant sa prospérité sous la période des Sévères.

Au cours de l'époque chrétienne (IV et V siècles), Calama a eu comme évêque Possidius qui était aussi biographe de saint Augustin et appartenait à la province ecclésiastique de Numidie. D'ailleurs Saint-Augustin et Donatus évoquent la prospérité de cette ville. Dès l'invasion des Vandales qui détruisit la ville, Possidius alla se réfugier à Hippo-Reggius et Calama tomba au pouvoir de Genséric. Après la reconquête de l'Afrique du Nord par les Byzantins, Solomon, général de Justinien, y fit construire une forteresse entre 539 et 544.

Vint ensuite l'époque de la civilisation arabo-musulmane, Calama est appelée désormais « Guelma ». Selon Ibn Khaldoun, des tribus arabes, en particulier les Banu Hilal, s'étaient déjà installées au cours du IX^e siècle dans cette région attractive.

L'époque ottomane, quant à elle, n'a pas connu de changements radicaux dans le paysage socioculturel de la ville. Cependant, elle a laissé aussi des traces, ne serait-ce que par quelques noms de famille qu'on retrouve aujourd'hui.

3.3. La ville de Guelma à la Période française de 1870 à 1962

Guelma est conquise en 1834 par les Français. Le maréchal Bertrand Clauzel, frappé par l'importance stratégique du site, y établit un camp permanent en 1836. C'est l'origine de la ville actuelle qui, dès lors, accueille plusieurs générations de colons et de pieds-noirs.

4. Patrimoine architectural et environnemental de la ville de Guelma

4.1. Le théâtre romain de Guelma

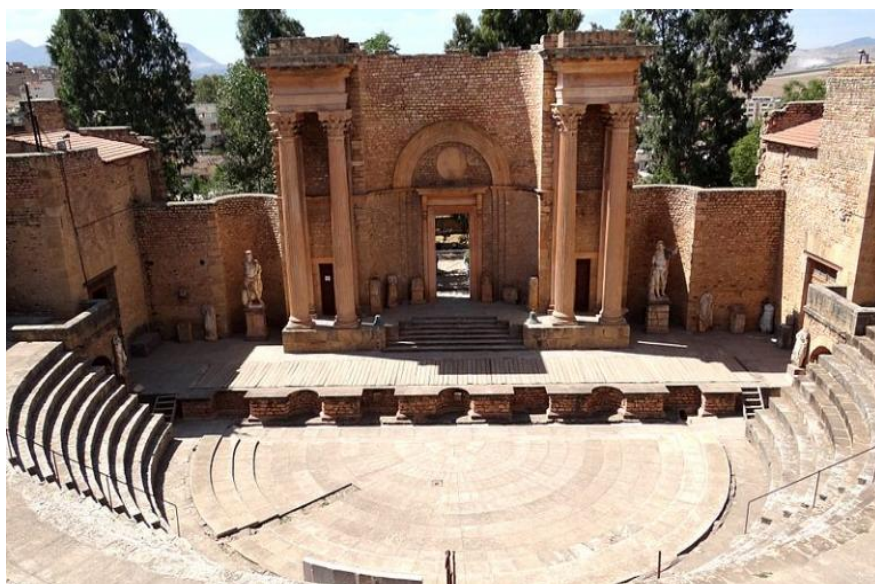


Fig.37. Le théâtre romain de Guelma. ¹³⁸

Le théâtre romain de Guelma est un théâtre antique situé à Guelma, fut édifié au début du III^e siècle, grâce au financement d'une prêtresse du culte impérial. Complètement détruit, il a été rebâti au début du XX^e siècle, ce qui explique son excellent état. Aujourd'hui, le théâtre abrite le musée romain de Guelma.

4.2. Les vestiges antiques de Thibilis (Sellaoua Announa)

Thibilis est une ville numide dans la commune de Sellaoua Announa, région de Guelma ex Calama, au nord-est de l'actuelle Guelma, elle a connu une forte implantation romaine puis byzantine. La cité dépendait de la colonie romaine de Cirta puis devient un municipes autonome.



Fig.38. Arc de triomphe (état de 1893).¹³⁹

4.3. La Piscine romaine Héliopolis

Son eau de source naturelle, de température égale à 29,3°C, qui jaillissait en alimentant son bassin circulaire de 36 m de diamètre, est à sec depuis des lustres. La piscine antique de Hammam Bradaâ date de l'époque romaine, les bords du bassin et sa base ont été construits dans sa pure tradition, c'est-à-dire en pierre de taille. Nous en devons le déblayement et la restauration au début de l'année 1900 à l'archéologue Joly, qui était alors également maire de la ville de Guelma. A ce jour, aucune datation n'a pu être établie par les archéologues locaux par manque de repères. Seule la littérature mentionne succinctement la présence de deux inscriptions libyques.

139. www.delcampe.net



Fig.39. La Piscine romaine Héliopolis. ¹⁴⁰

5. Etat de conservation de la piscine

La piscine romaine de Hammam Bradaâ, située à la commune d'Héliopolis, chef-lieu de la ville de Guelma, est un grand bassin circulaire de 35 m de diamètre avec une grande bordure en pierres de taille d'une largeur d'un mètre (Fig.40). Avant les travaux d'hydraulique renforçant l'alimentation urbaine, le site recevait, dans 2 petits hémicycles, l'eau tiède ayant une température de 30°, pour celui à l'ouest, et l'eau froide pour celui se trouvant un peu plus au nord. L'écoulement du trop-plein allait alimenter un petit ruisseau par l'ouverture du sud est, en direction des jardins d'Héliopolis.



Fig.40. La piscine Romaine de Guelma. (M. Belaidi).

140. www.delcampe.net

5.1. L'effondrement des murs

La façade intérieure de la piscine ne semble pas être en dégradation avancée. La plupart des pierres sont en bon état, à l'exception l'effondrement d'une petite partie du mur situé dans la partie nord de la piscine. (Fig.41).



Fig.41. Photo d'effondrement d'une partie situé au nord est d'un mur de la piscine (M. Belaidi).

5.2. Les pertes de masses

D'une manière générale le site est totalement abandonné, on remarque clairement le décollement de mortier ainsi que l'arrachement de certaines parties de pierres des murs de la piscine. (Fig.42, 43).



Fig.42. Perte de masse des pierres et mortier d'un mur intérieur de la piscine. (M. Belaidi).



Fig.43. Perte de masse des pierres à l'intérieur du mur de la piscine. (M. Belaidi).

5.3. La perforation

On remarque clairement des trous de taille de quelques centimétrique, qui s'étend en profondeur. Sur plusieurs parties des mortiers et des murs. (Fig.44).



Fig.44. Perforations des pierres du mur intérieur de la piscine. (M. Belaidi).

5.4. Les plantes poussantes

Les espaces de la piscine contiennent plusieurs plantes qui la colonisent. Ces plantes qui sont maintenu sur le fond de la piscine et certaines parties des murs. (Fig.45).



Fig.45.Plantes poussant sur pierres du mur intérieur et fond de la piscine. (M. Belaidi).

5.5. Les fissures

Des fissures verticales importantes d'ouverture de plusieurs millimètres. Traversant complètement la pierre, et qui a causé la perte d'une grande partie du mortier. (Fig.46)



Fig.46. Fissuration de mortier de jointement du mur extérieur de la piscine. (M. Belaidi).

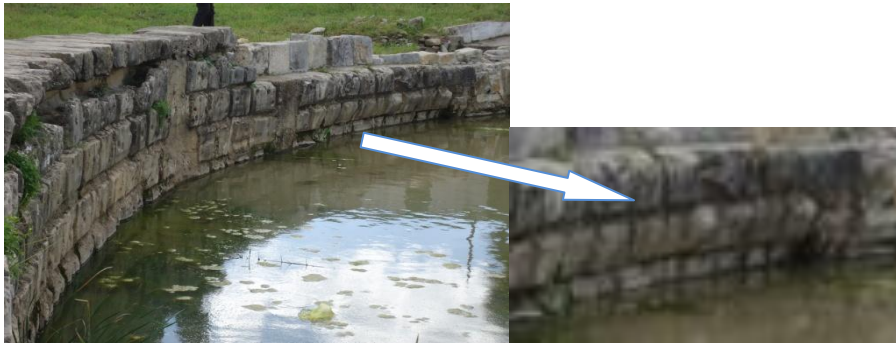


Fig.47.Fissuration de mortier de pose du mur intérieur de la piscine. (M. Belaidi).

5.6. Travaux et interventions effectués sur la piscine

En 2008 -2009, une intervention sur la piscine romaine avec des couches de ciments (bétons) apparaissent clairement sur la surface du fond de la piscine. Selon les paroles de certaines personnes trouvées sur place, qui nous ont informés que c'est une intervention locale pour sa restauration entre 2008 et 2009.

A la fin de l'année 2011 des fouilles archéologiques ont été entamés à proximité de la piscine, mais aucun rapport n'a été trouvé pour ces fouilles.

Des interventions des travaux de désherbage et nettoyage ont été effectués dans et autour de la piscine vers 2011, dans le cadre d'une sortie scientifique universitaire.

6. Caractérisation des échantillons

6.1. Protocole de prélèvement des échantillons de la piscine

- **Echantillon (M01)**

C'est un mortier de pose prélevé du mur situé au coté sud est de la piscine, comme il est illustré dans la figure (Fig.48) C'est un mortier de couleur jaune beige, avec la présence de grains de chaux, C'est un matériau dur au toucher et présente à l'œil nu un certains nombre de pores.



Fig.48. Localisation de l'échantillon (M01) prélevé de la piscine romaine de Guelma. (M. Belaidi).

- **Echantillon (M02)**

C'est un ensemble de fragment de mortier de pose prélevé du mur situé au coté nord ouest de la piscine. Comme il est illustré dans la figure (Fig.49). C'est un mortier de couleur jaune beige, avec la présence de grains de chaux, il est dur au toucher et présente à l'œil nu un certains nombre de pores.



Fig.49. Localisation de l'échantillon (M02) prélevé de la piscine romaine de Guelma. (M. Belaidi).

- **Echantillon (M03)**

C'est un mortier de joint prélevé du mur situé au coté nord est de la piscine, comme il est illustré dans la figure (Fig.50). C'est un mortier de couleur jaune beige, avec la présence de grains de chaux, il est dur au toucher et présente à l'œil nu un certains nombre de pores.



Fig.50. Localisation de l'échantillon (M03) prélevé de la piscine romaine de Guelma. (M. Belaidi).

6.2. Description des échantillons




Les observations générales des échantillons sont montrés dans le tableau 02. Les échantillons, pesant approximativement 20-30 g, ont été soigneusement enlevés et transféré au laboratoire. Dans ce travail nous avons procédé au prélèvement de 03 échantillons de différents endroits, le premier échantillon (M01) est un mortier de pose prélevé du mur situé au coté sud est de la piscine, le deuxième (M02) c'est un ensemble de fragment de mortier de pose prélevé du mur

Histoire, état de conservation et caractéristiques des matériaux de la piscine

situé au coté nord ouest de la piscine, et le troisième (M03) c'est un mortier de jointement prélevé du mur situé au coté nord est de la piscine.

La description des échantillons de mortiers prélevés de différents endroits de la piscine romaine de la ville de Guelma est présentée dans le Tableau.8

Tableau.8. Tableau descriptive des échantillons des mortiers prélevés de la piscine romaine de la ville de Guelma

Echantillon	Photos	Description		
		Couleur	Forme	Grosseur des grains Observations
Mortier (M01)		Jaune à beige	Forme géométrique quelconque	-Mortier dur au toucher, -Apparition des grains à taille mince et de couleur différente (rouge, gris, jaune) -Grains fins de chaux - Présence de pores.
Mortier (M02)		Jaune à beige	Forme géométrique quelconque	-Mortier dur au toucher, -Apparition des grains à taille mince et de couleur différente (rouge gris) -Grains fins de chaux -Présence de pores
Mortier (M03)		Jaune à beige	Forme géométrique quelconque	-Mortier dur au toucher, -Apparition des grains à taille mince et de couleur différente (rouge gris) -Grains fins de chaux -Présence de pores

6.3. Caractérisation des échantillons

Comme il s'agit de matériaux archéologiques (mortier ancien), la quantité de matériau doit pouvoir être restreinte au minimum et représentative et les techniques doivent être les moins destructives possible. la figure (Fig.51) montre l'organigramme des étapes principales de caractérisation des échantillons prélevés de la piscine romaine

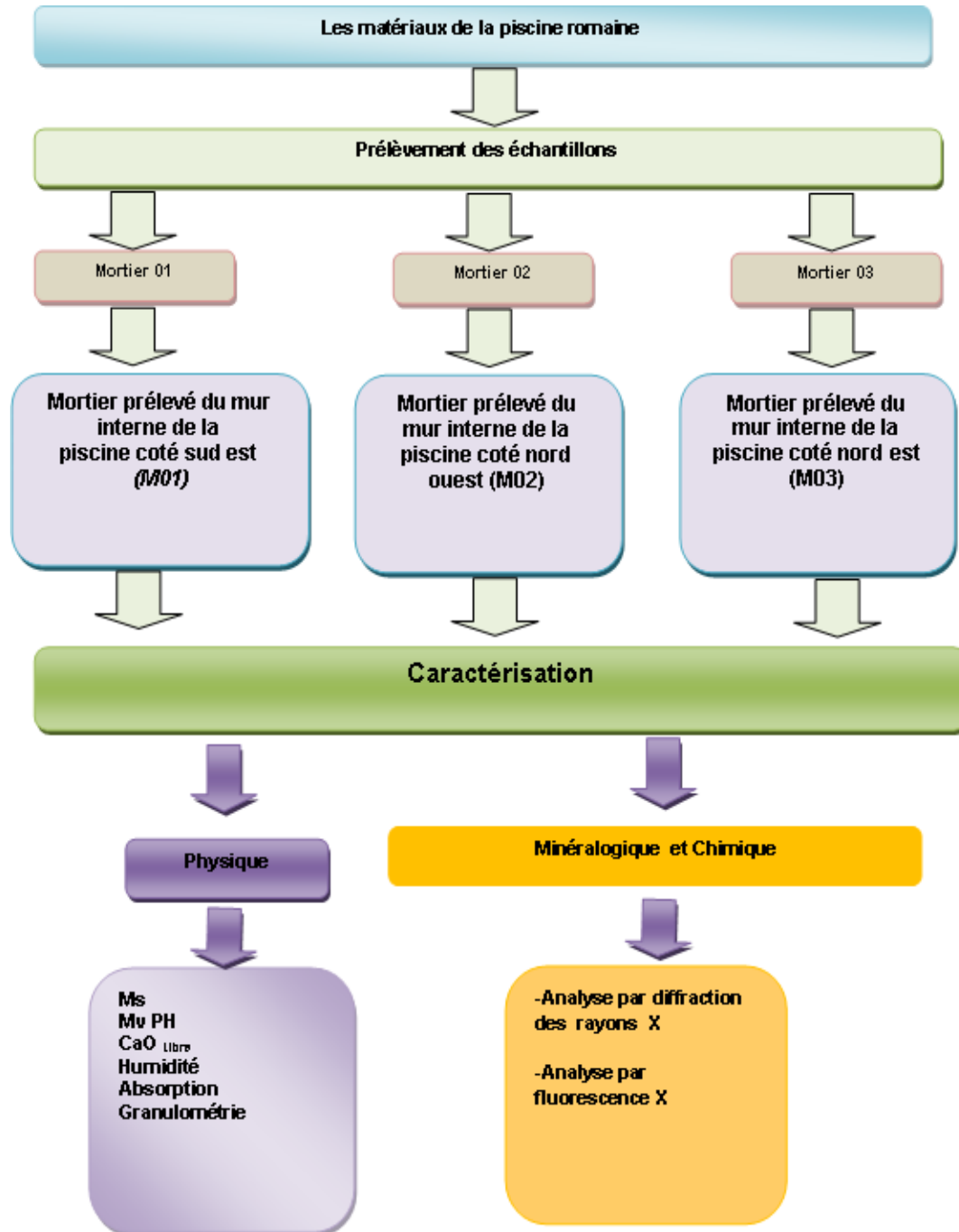


Fig.51. Organigramme des étapes principales de caractérisation des échantillons prélevés de la piscine romaine.

6.3.1. Caractérisation minéralogique par diffraction X (DRX)

Des analyses par spectrométrie de fluorescence des rayons X ont été effectuées sur des poudres fines de mortier obtenues par broyage, ensuite passé à travers un tamis d'ouverture de 80 μ m. L'identification de la composition a été exécutée par un logiciel. L'analyse chimique sur des échantillons de mortiers prélevés de différent endroit de la piscine romaine de

Histoire, état de conservation et caractéristiques des matériaux de la piscine

Guelma, a été réalisée au niveau du centre études technologiques pour l'industrie des matériaux (CETIM) Boumerdes. Les résultats d'analyse minéralogique réalisée par rayons X des échantillons de mortiers prélevés sont présentés dans le tableau 9.

Tableau.9. La composition minéralogique des mortiers de piscine romaine de la ville de Guelma

Minéraux	Composition minéralogique (%)		
	M01	M02	M03
Quartz (SiO ₂)	65	64	65
Albite (Na ₂ AlSi ₆ O ₁₆)	04	3,5	-
Orthoclase (K ₂ AlSi ₆ O ₁₆)	01.5	01.5	-
Gypse (CaSO ₄ 2H ₂ O)	0.5	0.5	-
Calcite (CaCO ₃)	22.5	23.5	35
Dolomite (CaMg (CO ₃) ₂)	6,5	05	-
Kaolinite	-	2	
Total	100	100	100

- **Echantillon (M01)** : La composition minéralogique révèle que les principaux composants pour cet échantillon sont la calcite et le quartz avec d'autres minéraux qui rentre directement dans la composition de la matière première à savoir la dolomie les feldspaths et l'albite (tableau 3 et figure. 52). On relève une teneur de calcite qui est égale à 22,5 % et une valeur de quartz égale à de 65 %. Le mélange de mortier s'est fait dans un rapport chaux/Quartz égale à 2,88, soit 3 parts de sable pour une part de chaux (3 :1).

La présence de dolomie montre que la chaux est de nature dolomitique et la présence des feldspaths et l'albite, montre l'ajout de l'argile calcinée ce qui donne le nature pouzolanique au mortier et lui confère le caractère hydrofuge, mortier typique de l'époque romaine utilisé dans les milieux humides.

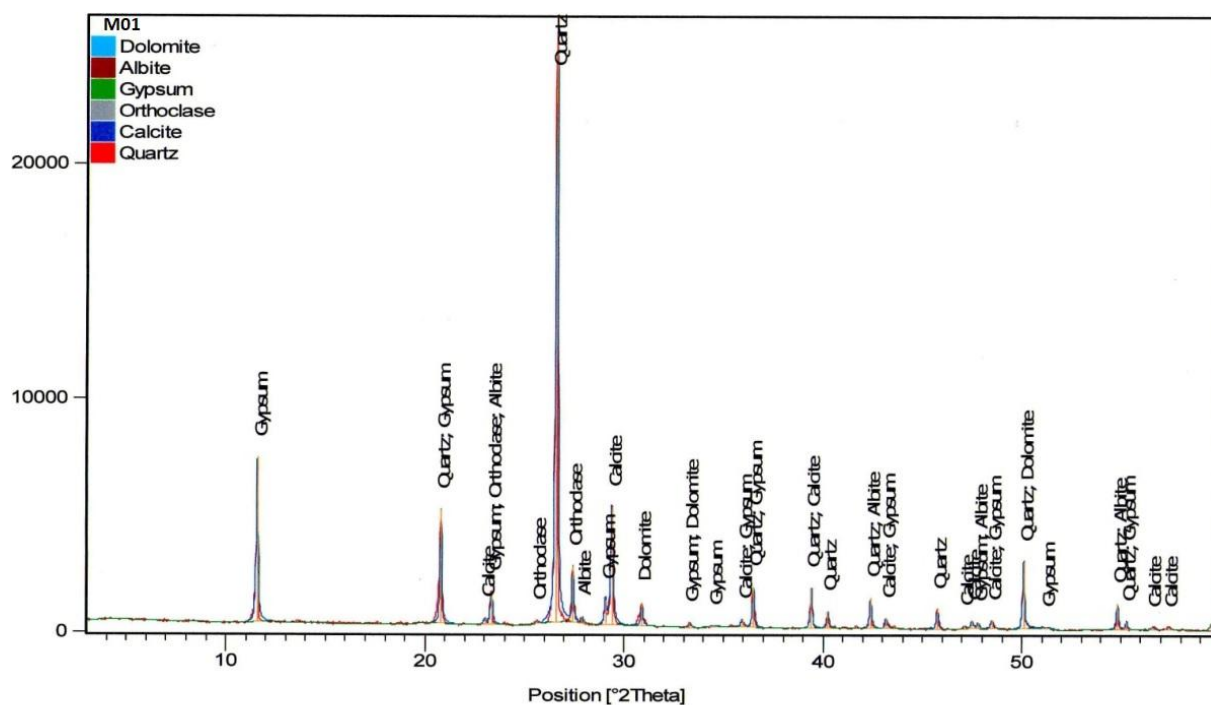


Fig.52 .Le diagramme RX de l'échantillon de mortier (M01) prélevé de la piscine romain.

-Echantillon (M02) : On relève une composition minéralogique similaire au mortier (M01).

La composition minéralogique révèle que les principaux composants pour cet échantillon sont la calcite et le quartz avec d'autres minéraux qui rentre directement dans la composition de la matière première à savoir la dolomie les feldspaths et l'albite (tableau 3 et figure. 53). On relève une teneur de calcite qui est égale à 23,5 % et une valeur de quartz égale à de 64 %. Le mélange de mortier s'est fait dans un rapport chaux/Quartz égale à 2,72, soit 2 parts et demi a 3 part de sable pour une part de chaux (3 :1).

La présence de dolomie montre que la chaux est de nature dolomitique et la présence des feldspaths et l'albite, montre l'ajout de l'argile calcinée ce qui donne la nature pouzolanique au mortier et lui confère le caractère hydrofuge, mortier typique de l'époque romaine utilisé dans les milieux humides.

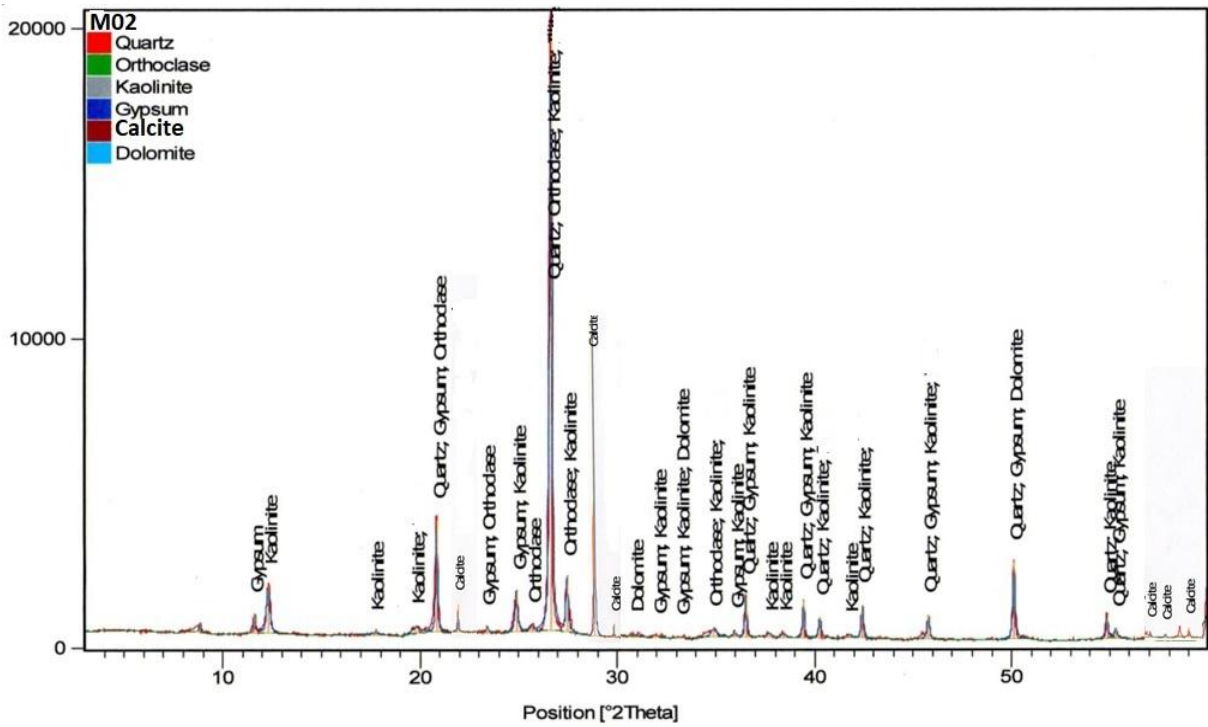


Fig.53. Le diagramme RX de l'échantillon de mortier (M02) prélevé de la piscine romaine

-Echantillon (M03) : La composition de cet échantillon est différente de (M01 et M02) L'analyse minéralogique montre que l'échantillon du mortier est composé principalement de la chaux et du sable. (Tableau 3 et figure 54)

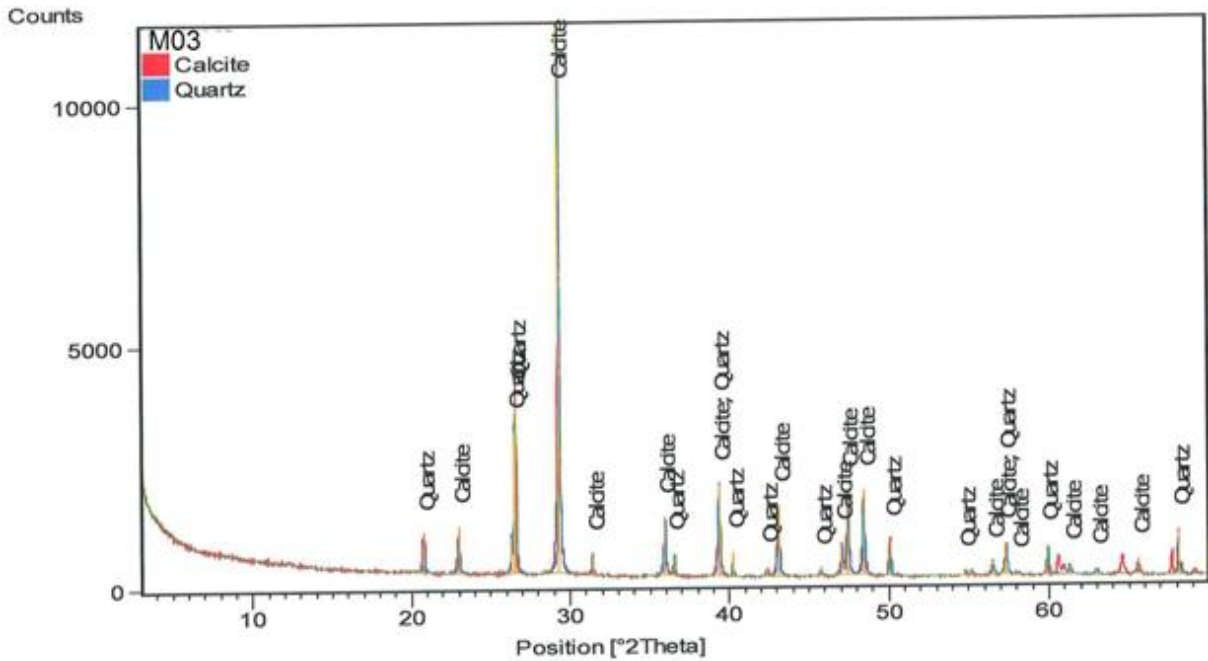


Fig.54. Le diagramme RX de l'échantillon de mortier (M03) prélevé de la piscine romaine

On enregistre une valeur de calcite qui est égale à 35 % et une valeur de quartz égale à de 65 %. Le mélange de mortier s'est fait dans un rapport Calcite/Quartz égale à 1.85, soit 2 parts de sable pour une part de chaux (2 :1). Ce mortier ne montre pas le caractère hydrofuge

6.3.2. Caractérisation chimique par fluorescence X

L'analyse chimique a été réalisée pour l'ensemble des échantillons de mortiers, Il s'agit d'une analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X selon le principe de la norme *NF P 15-467*.

Cet essai à été réalisée au niveau du centre études technologiques pour l'industrie des matériaux (CETIM) Boumerdes. Les résultats d'analyse chimique réalisée par spectrométrie de fluorescence des rayons X sont présentés dans le tableau 10.

Tableau.10. Composition chimique des échantillons de mortiers prélevés de la piscine romaine de la ville de Guelma.

Echantillon	PF	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	SO₃	K₂O	Na₂O	P₂O₅	TiO₂	ΣTotal
Mortier (M01)	31.27	27.62	3.66	32.39	3.38	0.50	0.49	0.39	0.12	0.18	100
Mortier (M02)	32.33	26.54	3.28	33.29	3.25	0.26	0.49	0.36	0.09	0.11	100
Mortier (M03)	35.63	21.78	1.20	40.20	0.62	0.14	0.15	0.05	0.1	0.13	100

Ces résultats montrent que le plus important composant dans les différents échantillons de mortiers est CaO avec des teneurs de 31.27 % pour (M01) 32.33 % pour (M02) et 35.63 % pour (M03). Les teneurs en SiO₂ sont aussi importantes, avec des valeurs pour les trois mortiers (M01), (M02) et (M03) égales respectivement à 27.62 %, 26.54 % et 21.78 %. Nous relevons aussi des taux significatifs d'Al₂O₃ avec des valeurs pour les trois mortiers (M01), (M02) et (M03) égales respectivement à 3.66 %, 3.28 % et 1.20 %. , avec un % de MgO pour les trois mortiers (M01), (M02) et (M03) égales respectivement à 3.38%, 3.25% et 0.62%. Ces résultats confirment les résultats des radiogrammes et du tableau de la composition minéralogique

En conclusion, les analyses minéralogiques et chimiques, montrent que le mortier romain est composé des matières premières suivantes : chaux + sable + ajout (brique pillée) ou autres

matières pouzolaniques, la chaux est de nature dolomitique, ce qui confère aux mortiers le caractère hydrofuge, composition typique des mortiers romains utilisés dans des environnements humides.

6.3.3. Caractéristiques physiques

Les échantillons du mortier prélevés de la piscine romaine de Guelma, ont fait l'objet de plusieurs essais physiques. Ces différents essais ont porté sur la détermination de : Les masses volumiques apparentes et spécifiques, la porosité ouverte, l'absorption d'eau, le taux d'humidité, les taux de chaux libre présents dans les échantillons ainsi que le potentiel d'hydrogène pH. L'ensemble de ces essais ont été réalisés conformément aux normes.

6.3.3.1. La masse volumique

6.3.3.1.1. La masse volumique spécifique

La masse volumique spécifique est définie comme étant le quotient de la masse sèche de l'échantillon sur le volume occupé par la matière solide, sans tenir compte des pores et des capillaires, Elle est désignée par (M_s). Selon la méthode normalisée (*NF P18-558*), et comme le montre la fig.55.

Le calcul de la masse volumique absolue a été réalisé en appliquant la formule suivante :

$$M_s = \frac{(M_2 - M_1) \cdot g}{[M_4 + (M_2 - M_1)] - M_3}$$

Où :

M_1 : la masse du pycnomètre vide (g)

M_2 : la masse du pycnomètre + l'échantillon (g)

M_3 : la masse du pycnomètre + l'échantillon+ toluène (g)

M_4 : la masse du pycnomètre+ toluène (g)

M_s : la masse volumique absolue (masse spécifique)

g : la densité du solvant 0,86 g/cm³



Fig.55. Les étapes de mesure de la masse volumique spécifique avec un pycnomètre. (M. Belaidi).

Les résultats obtenus de la masse volumique spécifique, sont reportés dans le tableau 11. Et illustrés dans la fig.56.

Tableau. 11. Les masses volumiques spécifiques des échantillons de mortiers prélevés

Echantillon	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	M ₄ (g)	Ms (g/cm ³)
M01	9,54	10,93	15,21	14,46	2,31
M02	10,19	11,98	16,139	15,05	2,43
M03	10,19	11,42	15,78	15,05	2,47

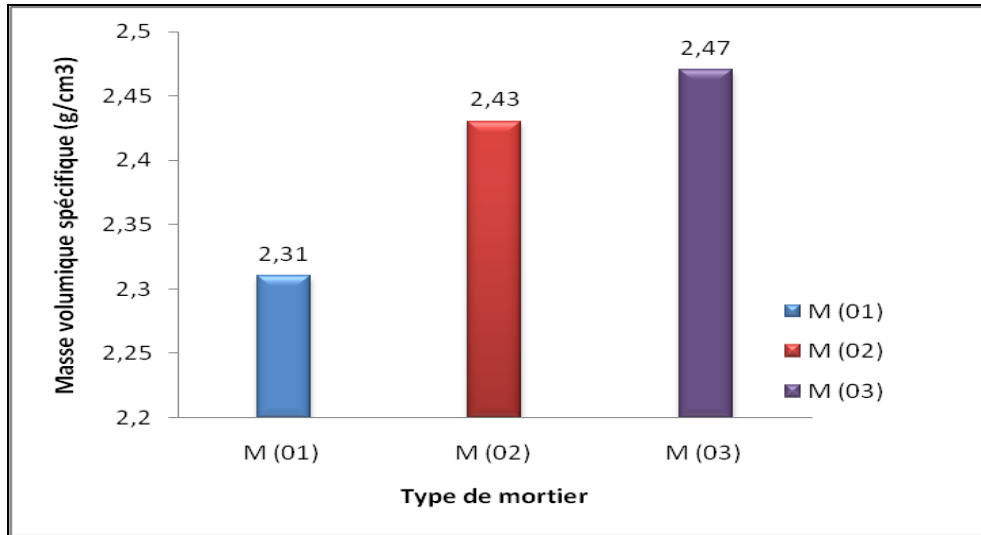


Fig.56. Histogramme des masses volumiques spécifiques des mortiers.

De ces résultats, il ressort que la masse volumique spécifique des trois mortiers varie entre 2.31 à 2.47 (g/cm³), avec une valeur moyenne égale a 2,40 g / cm³.

6.3.3.1.2. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente est définie comme le rapport de la masse sèche de l'échantillon par son volume en tenant compte des pores et des capillaires, Elle est désignée par (Mv), Dans notre travail, elle est obtenue en suivant la méthode hydrostatique d'un échantillon paraffiné, comme le montre la Fig.57.

Le calcul a été fait en appliquant la formule suivante :

$$Mv = \frac{Ms}{\frac{M(s+p) - M(s+p)l}{1} - \frac{Mp}{\rho}}$$

Où :

- Ms : masse de l'échantillon sec (g)
- M_(s+p): masse de l'échantillon paraffine pesé a l'air (g)
- M_{(s+p)L}: masse de l'échantillon paraffine pesé sous l'eau (g)
- M_p: masse de la paraffine M_p= M_(s+p)- Ms (g)
- Mv: masse volumique apparente des échantillons (g/cm³)

ρ : Densité de la paraffine = 0,9 g/cm³

La densité d'eau = 1 g/cm³

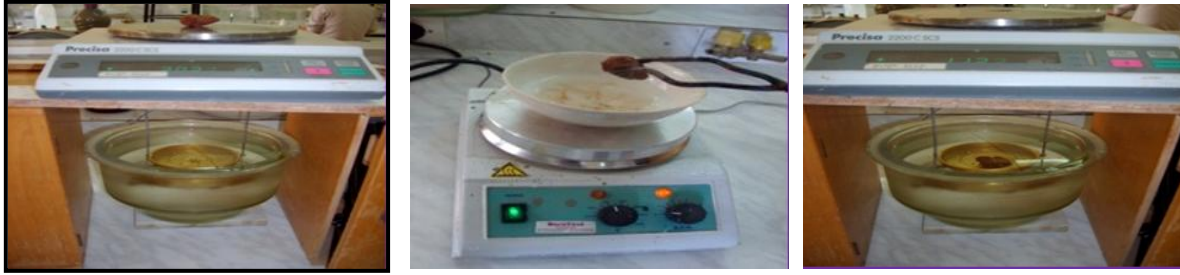


Fig.57. Les étapes de mesure de la masse volumique apparente. (M. Belaidi).

Les résultats obtenus de la masse volumique apparente, sont reportés dans le tableau.12. Et illustrés dans la Fig.58.

Tableau.12. Les masses volumiques apparentes des échantillons de mortier prélevés

Echantillons	Ms (g)	M _(s+p) (g)	M _{(s+p) L} (g)	Mv (g/cm ³)
M01	7,286	8,295	4,282	1,77
M02	14,625	16,464	8,696	1,88
M03	8,456	11,307	4,945	1,75

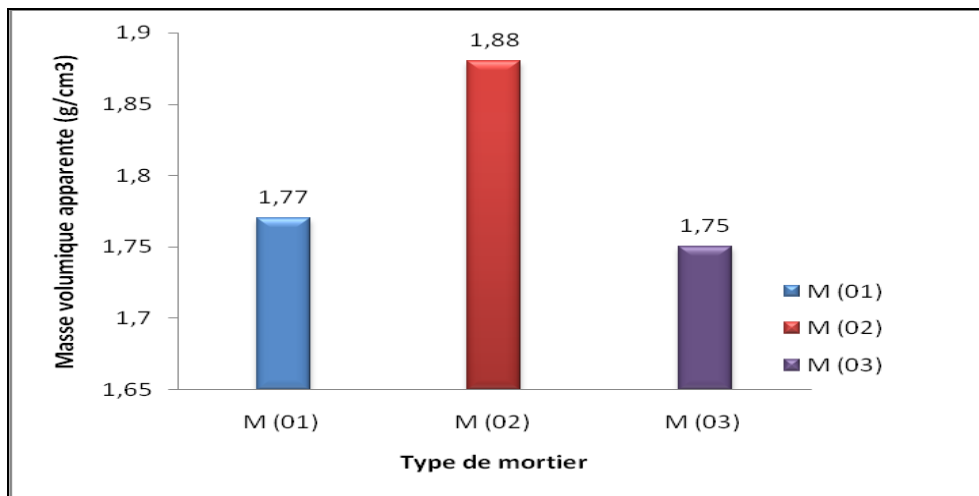


Fig.58. Histogramme des masses volumiques apparentes des mortiers.

De ces résultats, il ressort que la masse volumique apparente des trois mortiers varie entre 1,75 à 1,88 (g/cm³), avec une valeur moyenne égale à 1,80 (g/cm³).

6.3.3.2. L'humidité

L'humidité des échantillons de mortier prélevés de la piscine est déterminée par la méthode de séchage dans l'étuve jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Selon la norme (NF P94-050). Et comme le montre la Fig.59. Le calcul de l'humidité a été fait en appliquant la formule suivante :

$$H\% = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_0} \times 100\%$$

Où :

M_0 : masse de la capsule vide (g)

M_1 : masse de la capsule + l'échantillon humide (g)

M_2 : masse de la capsule + l'échantillon sec (g)

H : l'humidité de l'échantillon (%)



Fig.59. Etuve de séchage. (M. Belaidi).

Les résultats obtenus des humidités, sont reportés dans le tableau13. Et illustrés dans la Fig.60.

Tableau. 13. Résultats de l'humidité des échantillons de mortier prélevés

Echantillons	M_0 (g)	M_1 (g)	M_2 (g)	H (%)
M01	10,42	7,342	7,286	0,75
M02	10,13	14,739	14,625	0,23
M03	10,51	8,613	8,456	0,85

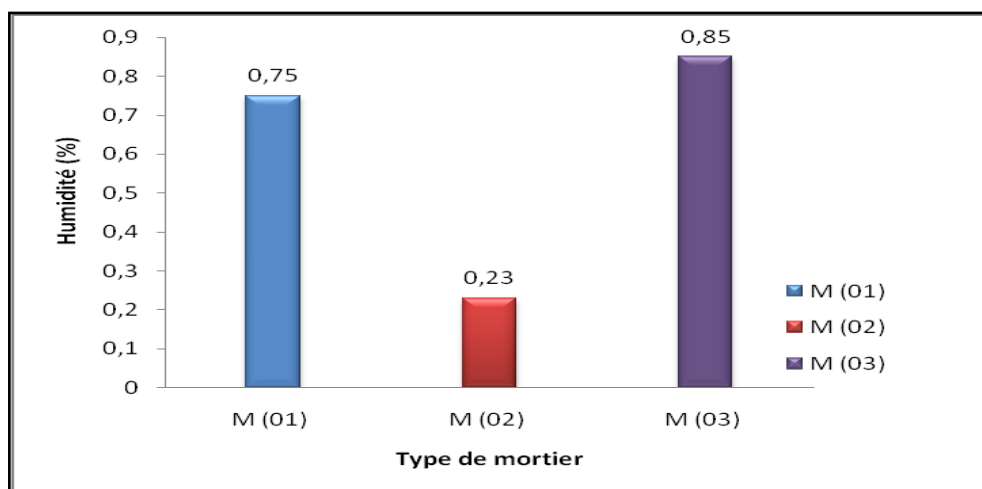


Fig.60. Histogramme des humidités des mortiers.

De ces résultats, il ressort que la plus petite valeur de l'humidité est enregistrée dans le mortier (M02), elle est égale à 0.23 %, alors que la plus grande valeur de l'humidité est enregistrée dans le mortier (M03), elle est égale à 0.85 %, le mortier (M01) à enregistré une valeur de l'humidité qui est égale à 0.75 %.

6.3.3.3. Le potentiel hydrogène (pH)

Le potentiel hydrogène, plus connu sous le nom de "pH", permet de savoir l'acidité ou la basicité d'un corps ou d'une solution, La détermination du "pH» des échantillons seront prélevés de la piscine romaine sera faite à l'aide d'un "pH mètre", comme le montre la Fig.61.



Fig.61. "pH" mètre. (M. Belaidi).

Les résultats obtenus des pH, sont reportés dans le tableau 14.

Tableau.14. Résultats de PH des échantillons de mortier prélevés

Echantillon	pH
M01	9,34
M02	9,03
M03	9,00

Les résultats reportés dans le tableau. 8, montrent bien que les valeurs des pH pour tous les mortiers varient entre (9,00 et 9,34), cela explique le caractère basique des mortiers élaborés.

6.3.3.4. Teneur en CaO libre

La teneur en CaO libre a été déterminée par la méthode de saccharose. Selon la norme (NF EN 459-2). Comme le montre la Fig.62.

Le calcul a été obtenu en appliquant la formule suivante :

$$\text{CaO}_L = \frac{0.02804 \times V}{G} \times 100\%$$

Où :

V : volume de la solution Hcl à 1N versée (ml)

G : prise d'essai des échantillons égale à 0,25g

0,02804: Coefficient

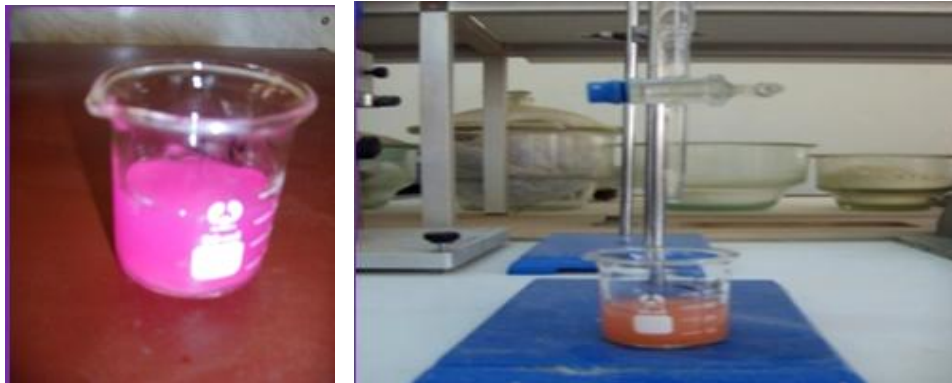


Fig.62. Détermination de la teneur en CaO libre méthode analytique. (M. Belaidi).

Les résultats obtenus de la teneur en CaO_L , sont reportés dans le tableau. 15. Et illustrés dans la Fig.63.

Tableau 15. Résultats de CaO libre

N°	Echantillon	V _{HCL} (ml)	teneur en CaO_L (%)
01	M01	0,2	2,24
02	M02	0,2	2,24
03	M03	0,2	2,24

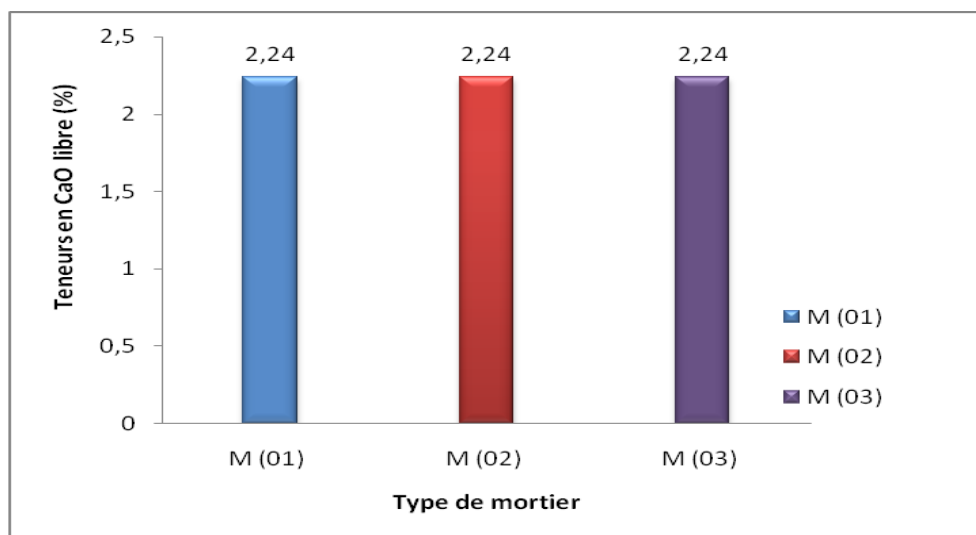


Fig.63. Histogramme des teneurs en CaO libre des mortiers.

Les résultats révèlent la présence de chaux libre (CaO_L) dans l'ensemble des échantillons, dont les teneurs sont égales pour les trois mortiers est égale à 2,24 %, ce qui reflète la présence de grains de calcite.

6.3.3.5. L'Absorption d'eau

L'absorption d'eau des échantillons de mortier prélevés de la piscine est déterminée par la méthode de d'émersion des échantillons dans l'eau pendant 24 heures jusqu'à la saturation. Selon la norme (NF P18 554).

Le calcul de l'humidité est fait en appliquant la formule suivante :

$$AB (\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_2} \times 100\%$$

Où :

M₁: masse de l'échantillon sec (g).

M₂: masse de l'échantillon humide (g).

AB: l'humidité de l'échantillon (%).

Les résultats obtenus de l'absorption d'eau, sont reportés dans le tableau. 16. Et illustrés dans la fig.64.

Tableau .16. Résultats de l'absorption d'eau des échantillons de mortier prélevés

Echantillons	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Absorption (%)
M01	7,342	7,286	11,49
M02	14,739	14,625	11,7
M03	8,613	8,456	23,82

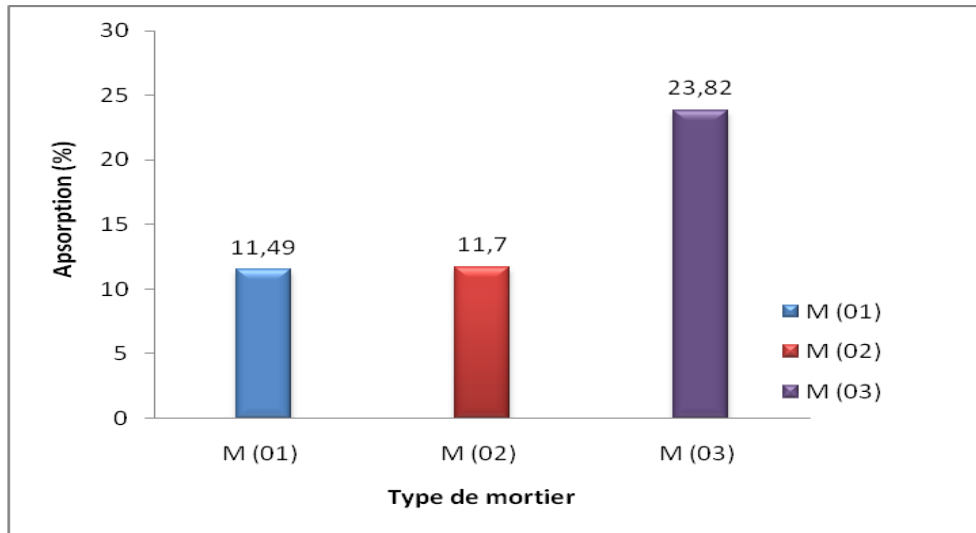


Fig.64. Histogramme des absorptions d'eau des mortiers.

On trouve aussi que la valeur de l'absorption de mortier (M03) est 23.82 (%), ce qui est plus que le double par rapport aux valeurs des mortiers (M01) et (M02) respectivement 11.49 et 11.70 (%).

Les résultats obtenus des caractéristiques physiques sont reportés dans le tableau 17.

Tableau.17. Tableau récapitulatif des résultats physiques

Echantillon	Masse volumique Apparente (g/cm ³)	Masse volumique spécifique (g/cm ³)	Absorption d'eau Ab (%)	Humidité H (%)	Chaux libre CaO(%)	Potentiel Hydrogène pH
M01	1,77	2,31	11,49	0,75	2,24	9,34
M02	1,88	2,43	11,7	0,23	2,24	9,03
M03	1,75	2,47	23,82	0,85	2,24	9,00

7. Interprétation des résultats

L'ensemble des trois échantillons (M01), (M02) et (M03) ont des valeurs d'absorption d'eau égales respectivement à 11,49 %, 11,7 % et 23,82 %. Ces résultats confirment bien les résultats des analyses minéralogiques à savoir les échantillons (M01 et M02), qui ont un caractère hydrofuge par rapport à l'échantillon M03

Par ailleurs, le (pH) de l'ensemble des échantillons est basique qui varie entre 9,00 et 9,34, ce qui est en accord avec le caractère alcalin des minéraux qui composent les mortiers comme la calcite, la dolomie.

L'analyse chimique fait ressortir dans la composition des différents échantillons de mortiers, une grande proportion de (SiO₂), dont l'origine est majoritairement le sable quartzueux. Il y'a aussi des proportions importantes de chaux, ce qui signifie l'existence de carbonate de calcium (CaO) dans les mortiers.

On relève aussi des quantités significatives d'oxyde d'alumine (Al₂O₃), alors que les autres composants Fe, Na et K, sont présents en quantités minimales. Ce qui signifie la présence de d'argile calcinée ou de la brique pilée dans la composition des mortiers.

L'analyse DRX des mortiers, identifie les phases minéralogiques. Les minéraux les plus présents sont le quartz (Silice) et la calcite (carbonate de calcium).

8. Conclusion

- La piscine de Guelma se trouve dans un état de conservation désastreuse.
- Les paramètres principaux responsables de la dégradation de la piscine de Guelma sont : l'abandon du site, les interventions non adéquates, l'altération des matériaux par vieillissement et l'action des paramètres extérieurs.

Histoire, état de conservation et caractéristiques des matériaux de la piscine

- L'analyse minéralogique et chimique, montrent que la composition des matières premières des mortiers est : chaux++ sable+ ajout pouzzolanique.
- La chaux est de nature dolomitique avec un ajout composé d'argile calcinée (ou briques pillées) ce qui confère le caractère hydrofuge au mortier de la piscine.

**CHAPITRE 03
ELABORATION ET
CARACTERISATION
DES MORTIERS FORMULES
AU LABORATOIRE**

Chapitre 03: Elaboration des mortiers

1. Introduction	127
2. Les matières premières utilisées pour l'élaboration des mortiers	129
2.1. Description des matières premières	129
Le liant	129
Les agrégats	129
Addition minérale	129
La brique pillée	129
La pouzzolane	129
Le ciment naturel	129
Le métakaolin	129
L'adjuvant	130
L'eau de gâchage	130
3. Caractérisation matières premières utilisées pour l'élaboration des mortiers	132
3.1. Détermination des masses volumiques réelles	132
3.2. Les humidités des matières premières utilisées pour les mortiers	132
3.3. Analyse granulométrique des sables utilisées.	133
3.3.1. L'analyse granulométrique par tamisage du sable jaune	133
3.3.2. L'analyse granulométrique par tamisage du sable noir.	134
3.4. Détermination de module de finesse des sables utilisées.	134
4. Formulation des mortiers	135
4.1. Mélange des matériaux	135
4.2. L'étalement au cône	136
4.3. Rapport E/C et classe d'étalement.	136
4.4. Confection des mortiers.	137
5. Variantes de mortiers de restauration formulés	138
5.1. La première variante des mortiers (Ajout de la brique pilée et l'huile d'olive)	139
5.1.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	140
5.1.1.1 Caractérisation physique	141
5.1.1.2. Caractérisation mécanique	147
5.1.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	147
5.1.1.2.2. Résistance mécanique à la compression.	149
5.1.1.3. Caractérisation hydrique	151
5.1.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité	151
5.2. La deuxième variante des mortiers (Ajout de la pouzzolane).	154
5.2.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	155
5.2.1.1. Caractérisation physique.	157
5.2.1.2. Caractérisation mécanique.	162
5.2.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	162
5.2.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	164
5.2.1.3. Caractérisation hydrique	165
5.2.1.3. Absorption d'eau par capillarité	165
5.3. La troisième variante de mortier (Ajout de la pouzzolane et brique pillée).	169
5.3.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	171
5.3.1.1. Caractérisation physique.	172
5.3.1.2. Caractérisation mécanique.	177
5.3.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	177
5.3.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	179

5.3.1.3. Caractérisation hydrique	181
5. 3.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité	181
5.4. La quatrième variante de mortier ((Ajout de métakaolin).	185
5.4.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés..	187
5.4.1. 1.Caractérisation physique.	187
5.4.1. 2.Caractérisation mécanique.	193
5.4.1. 2.1.Résistance mécanique à la flexion.	193
5.4.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	194
5.4.1.3. Caractérisation hydrique	197
5.4.1. 3.1.Absorption d'eau par capillarité	197
5.5. La cinquième variante de mortier (Ajout de ciment naturel).	201
5.5.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.	204
5.5.1. 1.Caractérisation physique.	204
5.5.1.2. Caractérisation mécanique	210
5.5.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.	210
5. 5.1.2.2. Résistance mécanique à la compression	212
5.5.1.3. Caractérisation hydrique	213
5.5.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité	213

1. Introduction

Suite aux différents travaux précédents portés sur l'étude des enduits de restauration à base de chaux réalisés par (M. Belaidi)¹⁴¹ et d'autres sur les mortiers réalisés par (R. Zeroual)¹⁴², et à la base des recettes de mortiers transmises par la tradition orale et celles qu'on retrouve dans la théorie et les documents historiques. Et les nouvelles investigations menées sur ces types de mortiers telles que rapportées dans le travail de (M. Hamiane et al)¹⁴³. Nous avons élaboré nos formulations dont la composition est de trois volumes d'agrégats pour un volume de chaux (3 : 1).

Partant sur l'idée que ces proportions permettent d'avoir des mortiers à l'épreuve du temps, on s'est limité à cette composition pour la formulation du mortier témoin. Néanmoins, en ce qui concerne le dosage en eau, nous avons choisi de travailler avec une consistance fixe. Ce qui entraîne un dosage en eau variable pour chaque formulation. Pour cela, la consistance des mortiers d'étude a été réalisée sur la table à secousses pour un étalement de $150 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ce qui correspond à une consistance plastique. La figure (Fig.2.12) présente les étapes de détermination du dosage en eau.

On présente aussi dans cette partie, les différentes méthodes expérimentales sur lesquelles va être basé ce travail expérimental, afin d'aboutir à l'effet de la substitution de certains ajouts (la brique pilée, le métakaolin, le ciment naturel, la pouzzolane et autres ajouts naturels) sur les propriétés des mortiers de chaux. L'étude de cette influence passe par une série de caractérisation.

Les formules retenues seront réalisées avec cinq (05 variantes) selon le type d'ajout. Des mélanges de mortiers contenant 10, 20, 30, 40 et 50 % de l'ajout par substitution à la chaux aérienne ont été préparés. Afin d'améliorer la fluidité des mélanges, un superplastifiant - Médaflow 30- et de l'huile d'olive ont été incorporés.

Les principales étapes de formulation et de caractérisations sont exposées dans la figure (Fig.65).

141. M. Belaidi, Etude caractérisation et élaboration d'un Enduit de chaux pour l'utiliser dans la restauration des monuments archéologiques (Citadelle d'Alger comme exemple),

142. R. Zeroual Etude caractérisation et élaboration d'un mortier de chaux pour l'utiliser dans la restauration des monuments archéologiques (Citadelle d'Alger comme exemple),

143. M. Hamiane et al , HMC 2013 Characterisation of historic mortars, case of Roman, Byzantine and Ottoman periods in Algeria

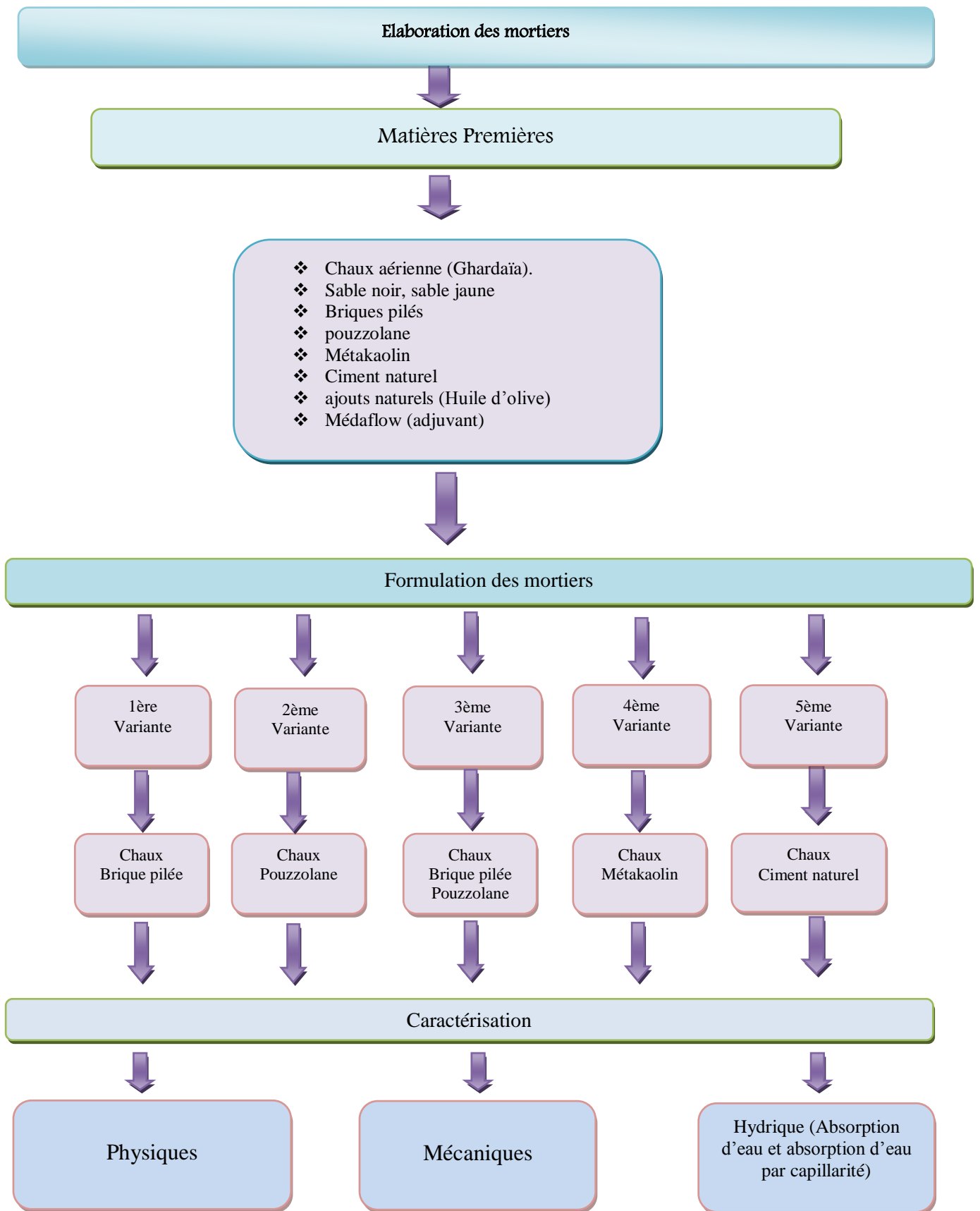


Fig.65. Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation des mortiers.

2. Les matières premières utilisées pour l'élaboration des mortiers

2.1. Description des matières premières

Les matières premières utilisées sont :

- **Le liant** : Il est constitué de pâte de chaux, obtenue après extinction de la chaux vive. La chaux utilisée est une chaux aérienne de construction en poudre de la région de Berriane, wilaya de Ghardaïa, Sud de l'Algérie.

- Les agrégats

Deux types de sables ont été employés dans cette recherche : Un sable noir de rivière d'une densité de 1480 Kg/m³ qui présente des grains de taille inférieurs à 5 mm, et un sable fin de couleur jaune d'une densité de 1510 Kg/m³ qui présente des grains de taille inférieurs à 1 mm. La Fig.2.3. Montre l'analyse granulométrique des deux sables, déterminée selon la norme EN NF P18-560.

- Addition minérale

- **La brique pillée**

C'est une poudre obtenue par le concassage et le broyage de la brique cuite, elle a le caractère pouzzolanique.

- **La pouzzolane**

C'est la pouzzolane utilisée dans la fabrication de ciment dans la cimenterie de zahana à l'est de l'Algérie, elle est tamisée sur un tamis de (80 µm) pour récupérer uniquement le tamisât, tout ce qui ne passe pas à travers le tamis à subir un autre broyage.

- **Le ciment naturel**

Le ciment naturel ou le ciment prompt de type Vicat ajouté en différents pourcentage a la poudre de chaux aérienne utilisé.

- **Le métakaolin**

Le kaolin qui a servi à l'obtention du métakaolin Obtenue par Broyage puis calcination de Kaolin provient de la région de Jijel (Nord Est de l'Algérie), le kaolin ne présente aucun potentiel pouzzolanique. Le métakaolin, nom donné au kaolin après calcination se caractérise par une réaction pouzzolanique améliorant les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers. Afin de tirer profil de la réaction pouzzolanique du métakaolin, le kaolin à 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 à été tiré des travaux de Rabehi. (Rabehi et al, (2013))¹⁴⁴.

144: Rabehi (Rabehi et al, 2013).

L'auteur 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, tout ce qui ne passe pas à travers le tamis à subir un autre broyage.

- L'adjuvant









L'adjuvant employé est un superplastifiant de nom commercial MEDAFLOW 30. et de l'huile d'olive comme adjuvant naturel.

- L'eau de gâchage

L'eau employée pour le gâchage des mortiers est l'eau potable de robinet.

La description des différentes matières premières utilisées pour l'élaboration des mortiers est reportée dans le Tableau 18.

Tableau.18. Les matières premières utilisées pour la formulation des mortiers

N°	Matière	Etapes de préparation	photo
01	La chaux	C'est la chaux aérienne en poudre de la région de Berriane qui a été éteinte dans des bidons d'eau et sécher par la suite, on a utilisé de la chaux en patte.	
02	Le sable noir	Sable de rivière de couleur noire, de la région de Baghlia (Tizi Ouzou) avec granulométrie inférieure à (5 mm)	
03	Le sable jaune	Sable fin avec une couleur jaune de la région de Boussaâda (Msila) et granulométrie inférieure à (1 mm).	
04	La pouzzolane	Concassage puis broyage de la roche de pouzzolane jusqu'à l'obtention d'une finesse inférieure ou égale à (80 µm)	
05	Le métakaolin	Broyage puis calcination de Kaolin de la région de Jijel, la poudre obtenue est d'une finesse inférieure à (80 µm)	
06	Huile d'olive	L'huile d'olive est utilisée dans ce travail comme adjuvant naturel hydrofuge,	
07	Le Médaflow (30)	Le Médaflow (30) est utilisé dans ce travail comme adjuvant artificiel hydrofuge.	
08	Le ciment naturel	Le ciment naturel est utilisé dans ce travail comme ajout à différents pourcentages de la masse de chaux.	

3. Caractérisation matières premières utilisées pour l’élaboration des mortiers

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d’un mortier joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures.

3.1. Détermination des masses volumiques réelles

La masse volumique a été déterminée conformément à la norme NF EN 196-1. En utilisant un entonnoir porcelaine placé au-dessus d’un récipient



*Fig.66. l’appareillage de la masse volumique apparente.
(M. Belaidi).*

Les masses volumiques apparentes de cette étude sont présentées dans le tableau 19.

Tableau 19. Masse volumique apparente des matières premières et ajouts utilisés

Matière première	Matières premières	Masses volumiques (g/cm ³)
01	Chaux aérienne	2,10
02	Sable noire	2,33
03	Sable jaune	2,21
04	Brique pillée	1,29
05	Pouzzolane	1,25
06	Ciment naturel	2,28
07	métakaolin	2,05

3.2. Les humidités des matières premières utilisées pour l’élaboration des mortiers

Le calcul du taux d’humidité a été réalisé, selon la formule suivante :

$$H\% = \frac{M1 - M2}{M2 - M0} \times 100\%$$

Où :

M_0 : masse de la capsule vide (g).

M_1 : masse de la capsule + l'échantillon humide (g).

M_2 : masse de la capsule + l'échantillon sec (g).

Les humidités des matières premières utilisées pour l'élaboration des mortiers dans cette étude sont présentées dans le tableau 20.

Tableau 20. Les humidités des matières premières et ajouts utilisés

	Matières premières	H(%)
01	Chaux aérienne	1,38
02	Sable noire	0,52
03	Sable jaune	0,66
04	Brique pillée	0,22
05	Pouzzolane	0,38
06	Ciment naturel	0,13
07	métakaolin	1,56

3.2. Analyse granulométrique des sables utilisées.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs. L'essai a été réalisé selon la norme (NF P18-560).

3.3.1. L'analyse granulométrique par tamisage du sable jaune

Le tableau 21. Présente les résultats d'analyse granulométrique par tamisage de sable jaune

Tableau 21. L'analyse granulométrique par tamisage du sable jaune

Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumules(g)	Refus cumules (%)	Tamisât cumulés (%)
0,5	3	0,6	99,4
0,315	37	7,4	92,6
0,25	105	21	79
0,16	336	67,2	32,8
0,125	420	84	16
0,08	475	95	5
0,063	498	99,6	0,4
Fond de tamis	500	100	0

3.3.2. L'analyse granulométrique par tamisage du sable noire.

L'analyse granulométrique par tamisage de sable noire ,1000 g de masse de ce sable passe par une série de tamis normalisé, les résultats de cette analyse sont donnés dans le tableau 22.

Tableau 22. L'analyse granulométrique par tamisage du sable noire.

Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés(g)	Refus cumulés (%)	calculé (%)
6,3	21	2,1	97,9
5	37	3,7	96,3
3,15	116	11,6	88,4
2,5	183	18,3	81,7
1,25	422	42,2	57,8
0,63	674	67,4	32,6
0,5	736	73,6	26,4
0,315	875	87,5	12,5
0,16	970	97	3
0,125	980	98	2
0,08	990	99	1
0,063	998	99,8	0,2
fond de tamis	1000	100	0

3.4. Détermination de module de finesse des sables utilisées.

La norme XP P 18-540 définit le module de finesse d'un sable, qui caractérise sa granularité, comme le 1000 de la somme des refus, exprimés en pourcentage, sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5,0 mm.

Le module de finesse du sable utilisé est MF = 2,5. (la somme calculée)

Les résultats de l'analyse des modules de finesse des sables utilisés sont donnés dans le tableau 23.

Tableau 23. Le module de finesse des sables utilisés.

Type de Sable	Module de finesse	Classe de sable
Noire	3,21	Sable grossier
jaune	0,92	Sable fin

Les résultats d'analyses granulométriques des différent sables (jaune, noir) sont représentés par la Fig.67. L'ordonnée présente le pourcentage des tamisât et le diamètre des mailles est représenté par l'axe des abscisses en valeur logarithmique.

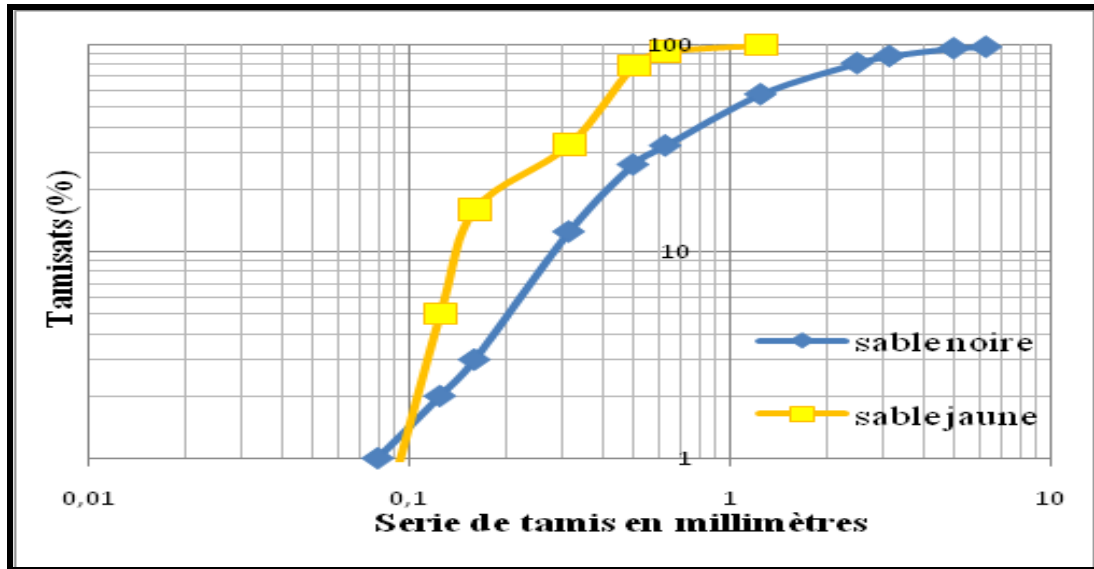


Fig.67. Analyses granulométriques des différents sables (jaune, noir).

4. Formulation des mortiers

4.1. Mélange des matériaux

Ce travail étant principalement expérimental. Il a été pour objet de cette étape préliminaire de définir une méthodologie de formulation et de conservation des échantillons. En effet, lors de la première étape, il est constaté que la préparation des échantillons pouvait interférer dans les résultats obtenus pour les différentes propriétés étudiées. Les étapes à suivre consistent à introduire le mélange dans un malaxeur rotatif électrique (Fig.78.) pendant 30 secondes, ensuite introduire régulièrement le sable et le liant (la chaux + ajout) pendant les 30 secondes suivantes en y ajoutant une quantité d'eau et l'adjuvant prescrite pour l'essai. La procédure est arrêtée après 01 min 30s du début de malaxage. Puis enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient.



Fig.68. Malaxeur rotatif des mortiers. Laboratoire centrale de l'ENGOA.

4.2. L'étalement au cône

L'étalement au cône consiste à faire un essai d'affaissement sur une quantité de pâte sur une table de secousses comme indiqué sur la (Fig.69. (a)). Le cône qui sera utilisé pour mesurer le diamètre d'étalement, a une forme tronconique avec un diamètre de 100 mm à la base et 70 mm en haut et une hauteur de 60 mm, surmonté de sa rehausse (entonnoir). Il a été placé sur plateau de la table d'étalement plane en acier et rempli de pâte, ensuite il sera levé vers le haut pour laisser la pâte s'étalée sur la table (Fig.69. (b)). Le diamètre est mesuré lorsque l'étalement de pâte s'arrête (Fig.69. (c)), après 15 secousses pour un temps de 15 secondes environ. La valeur d'étalement sera mesurée et notée pour les formulations réalisées.

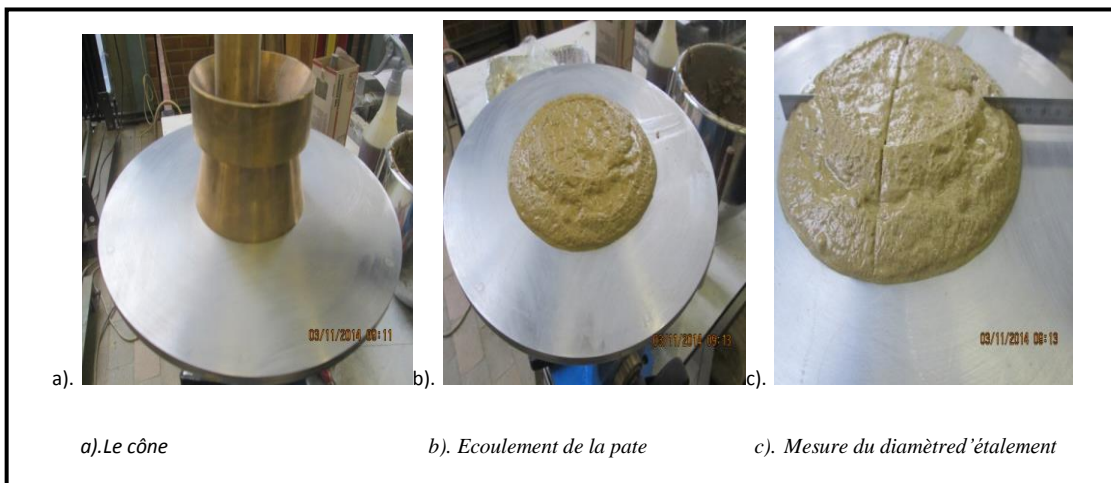


Fig.69.Essai d'étalement au cône. (M. Belaidi).

4.3. Rapport E/C et classe d'étalement.

Les mortiers de chaux sont souvent décrits comme très maniables, Seule la classe d'étalement donne une indication quantifiable de l'ouvrabilité, Bien que l'ouvrabilité d'un mortier varie en fonction des granulats ainsi que du type et de la quantité de chaux, cette caractéristique dépend essentiellement de la teneur en eau du mortier.

La classe d'étalement a été déterminée en fonction du rapport E/C. Plusieurs études de référence considèrent la classe d'étalement du mortier frais plutôt que le rapport E/C. En pratique, il est plus facile de travailler avec le rapport E/C. En effet, c'est une donnée d'entrée de la composition du mortier alors que la classe d'étalement est une donnée mesurée après mélange des ingrédients, Cependant, lors de cette campagne expérimentale, on va considérer que les mortiers avaient une bonne ouvrabilité pour un rapport E/C variant de 1,2 à 1,5.

4.4. Confection des mortiers.

Les éprouvettes ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) doivent être coulées immédiatement après la préparation du mortier. La (Fig. 70) montre les différentes étapes de préparation des mortiers de chaux.

Le moule et sa hausse fermement fixés sur la table à chocs, on introduit ensuite à l'aide d'une cuillère, la première couche de mortier dans les trois compartiments du moule, directement à partir du récipient de malaxeur. (Fig. 70, (b)).



Fig.70. Opération de moulage des éprouvettes. (M. Belaidi).

Étaler la couche uniformément en utilisant une spatule, ensuite, serrer la première couche de mortier par 60 chocs, Introduire la seconde couche de mortier, niveler avec la spatule et serrer à nouveau par 60 chocs. Retirer avec précaution le moule de la table à chocs et ôter la hausse. Enlever immédiatement l'excès de mortier avec la règle métallique plate disposée sur champ, par de lents mouvements transversaux de scie, une fois dans chaque direction. Lisser la surface des éprouvettes en utilisant la même règle tenue presque à plat. (Fig. 70, (c)).

Le démoulage des barreaux est réalisé avec toutes les précautions requises (Fig. 70, (f)), il s'opère après 24 heures du collage, conformément à la norme, Le stockage des éprouvettes s'effectue dans un environnement d'une température de 25°et une humidité relative de 50 %.

5. Variantes de mortiers de restauration formulés

Dans la littérature, plusieurs exemples de matériaux avec des propriétés hydrauliques sont rapportés, obtenus par cuisson à des températures spécifiques du calcaire mélangé à des minéraux argileux (ajoutés délibérément ou non) ou en mélangeant de la chaux éteinte avec des substances capables de fournir des propriétés pouzzolanique au mortier, comme le métakaolin, la pouzzolane naturelle ou la brique pillée. (S. Kramar et al. 2011) ⁹⁹.

Pour connaitre l'effet des ajouts pouzzolaniques sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers, nous avons élaboré nos mortiers selon 5 variantes différentes avec différente ajouts.

Le tableau 24 présente les caractéristiques des différentes variantes

Tableau 24 : Caractéristiques des différentes variantes des mortiers

Variantes	composition	Type d'ajout	Caractéristiques réalisés
V1	Chaux + brique pillé	2 (%) Médaflow (30) Huile d'olive	-Masses volumiques - pH
V2	Chaux+ brique + pouzzolane	2 (%) Médaflow (30)	- Humidité -porosité ouverte
V3	Chaux+ pouzzolane	2 (%) Médaflow (30)	-Absorption par immersion -Absorption par capillarité
V4	Chaux+ métakaolin	2 (%) Médaflow (30)	-Résistances mécaniques
V5	Chaux + ciment naturel	2 (%) Médaflow (30)	

5.1. La première variante des mortiers (Ajout de la brique pilée et l'huile d'olive).

Les mortiers réalisés sont illustrés dans l'organigramme Fig.71.

Fig.71. Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation de la première variante des mortiers (Ajout de la brique pilée et l'huile d'olive).

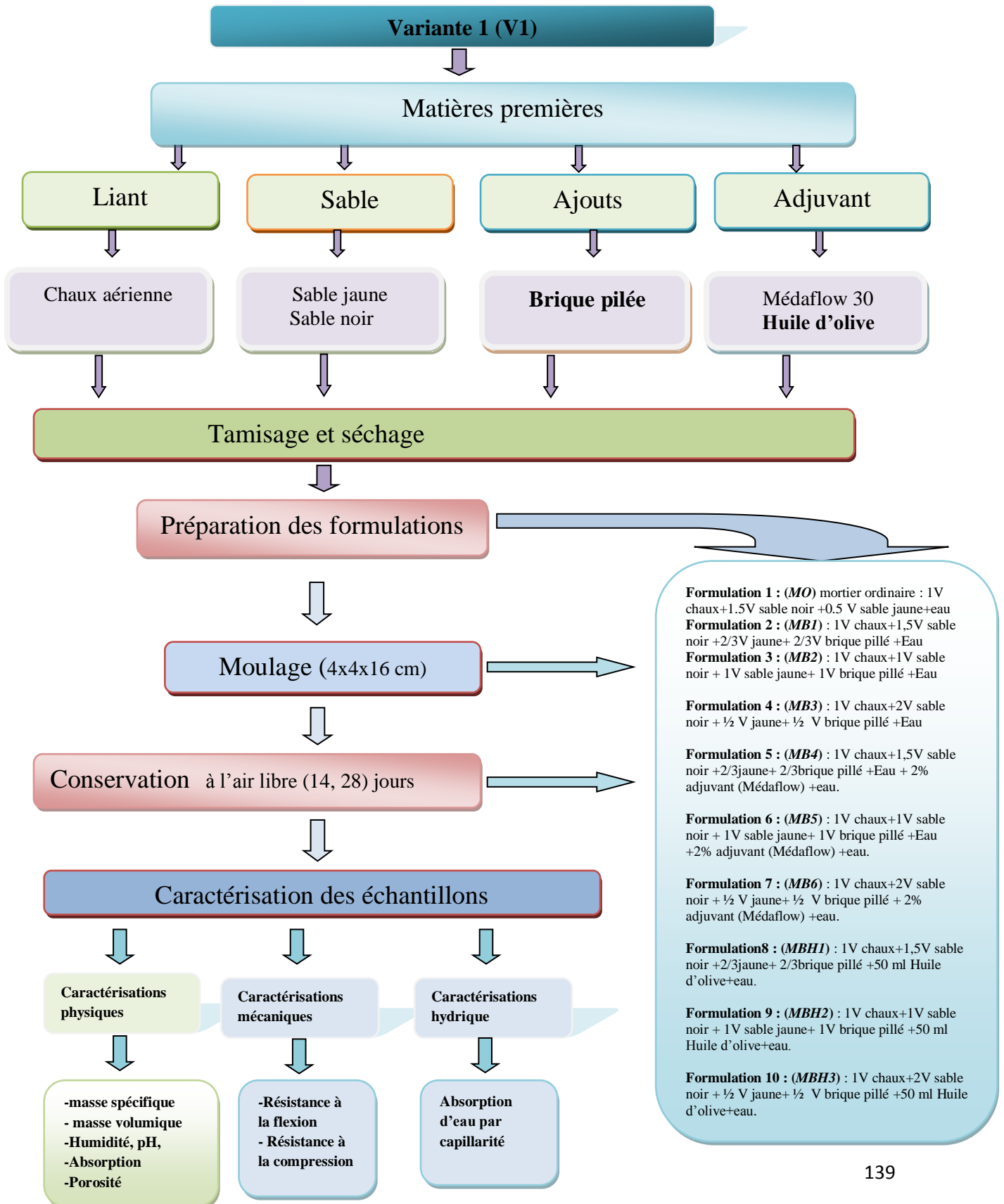


Tableau 25. Composition de la première variante des mortiers à étudiés (ajout de la brique pilée et l'huile d'olive).

Nom de formulation	Formulation	Chaux (g)	Brique pilée (g)	Sable noir (g)	Sable jaune (g)	Eau (ml)	Adjuvant (% de masse de chaux)	Huile d'olive (ml)
<i>MO</i>	1V chaux+1,5V sable noir + 0,5 jaune+ 2% +Eau	450	0	1285	428	675	0	0
<i>MB1</i>	1V chaux+1,5V sable noir +2/3jaune+ 2/3brique pillé +Eau	450	678	1285	642	760	0	0
<i>MB2</i>	1V chaux+1V sable noir + 1V sable jaune+ 1V brique pillé +Eau	450	904	857	856	760	0	0
<i>MB3</i>	1V chaux+2V sable noir + ½ V jaune+ ½ V brique pillé +Eau	450	452	1714	451	600	0	0
<i>MB4</i>	1V chaux+1,5V sable noir +2/3jaune+ 2/3brique pillé +Eau + adjuvant	450	678	1285	642	700	2	0
<i>MB5</i>	1V chaux+1V sable noir + 1V sable jaune+ 1V brique pillé + adjuvant	450	904	857	856	685	2	0
<i>MB6</i>	1V chaux+2V sable noir + ½ V jaune+ ½ V brique pillé +Eau + adjuvant	450	452	1714	451	525	2	0
<i>MBH7</i>	1V chaux+1,5V sable noir +2/3jaune+ 2/3brique pillé +Eau huile d'olive	450	678	1285	642	660	0	50
<i>MBH8</i>	1V chaux+1V sable noir + 1V sable jaune+ 1V brique pillé + huile d'olive	450	904	857	856	645	0	50
<i>MBH9</i>	1V chaux+2V sable noir + ½ V jaune+ ½ V brique pillé + huile d'olive	450	452	1714	451	505	0	50

Les masses des constituants présentés dans le tableau ci-dessus sont données en volume.

Les masses nécessaire de chaque constituant dans la formulation des mortiers seront déterminées en fonction de la masse volumiques de constituant lui-même pour arriver à la quantité plus exacte de chaque composant dans chaque formulation, Le calcul sera fait avec la formule suivante :

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (\text{g} / \text{cm}^3).$$

5. 1.1. Caractérisation des échantillons de mortiers de la première variante.

Cette partie est consacrée aux essais physique et mécanique réalisé sur les mortiers étudiés à l'état durci. Toutes les procédures d'essais ont été exposées en détails dans la partie précédente.

5. 1.1.1. Caractérisation physique

La caractérisation physique a été faite à la base de différents essais qui consistent en le calcul des masses volumiques spécifiques et apparentes, l'absorption d'eau, la porosité ouverte, l'humidité, et le potentiel d'hydrogène .L'ensemble de ces essais ont été menés conformément aux méthodes et normes en vigueur.

Les valeurs moyennes des propriétés physiques après 28 jours de durcissement sont rapportées dans le tableau 26.

Tableau 26 : Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers formulés.

Echantillons formulés	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Porosité ouverte Po (%)	Absorption d'eau (%)	Humidité H (%)	Potentiel D'Hydrogène pH
MO	2,05	1,77	24,38	16,85	6,80	11,00
MB1	2,05	1,69	29,31	17,34	1,01	10,20
MB2	1,93	1,71	28,69	16,82	1,11	10,33
MB3	2,33	1,75	26,40	15,04	0,99	10,01
MB4	1,52	1,77	24,71	13,92	0,91	10,16
MB5	1,25	1,80	23,71	13,14	1,01	10,80
MB6	1,75	1,82	22,47	12,36	0,92	11,00
MBH1	1,00	1,53	8,13	5,29	0,87	09,50
MBH2	1,30	1,52	7,22	4,72	1,16	09,00
MBH3	1,05	1,55	7,67	4,94	1,70	09,02

La figure (Fig.72). Illustre l'effet du taux de substitution de la brique pillée sur la masse volumique absolue des mortiers formulés.

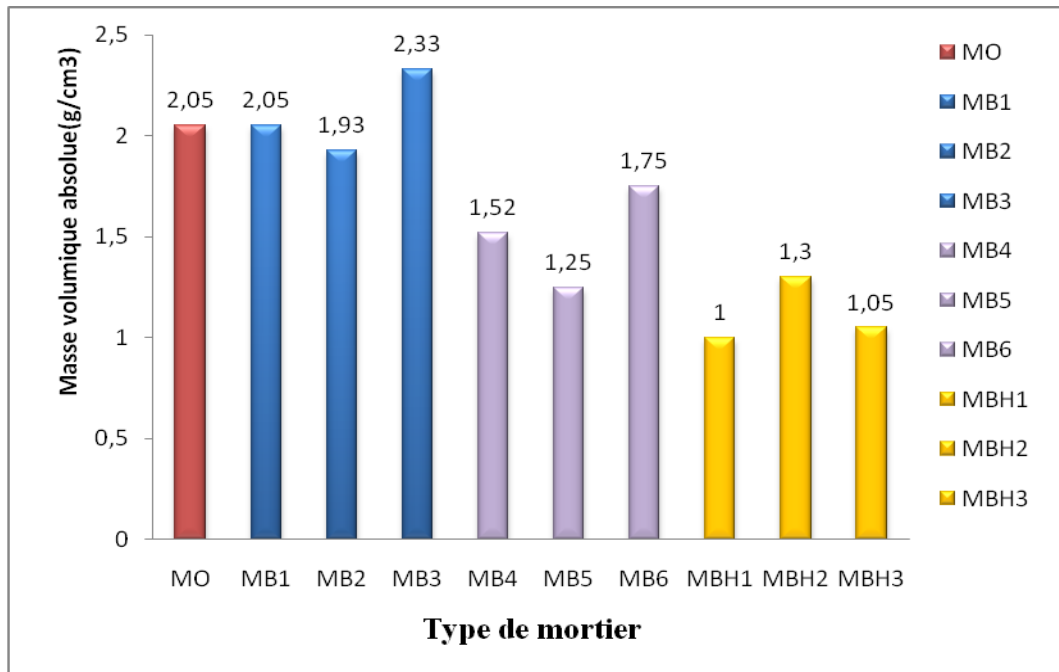


Fig.72. Les masses volumiques absolues des mortiers formulés.

On constate d’après la Fig. 72. Et le tableau 18. Que la substitution de la chaux aérienne par de la poudre de brique pillée mise en œuvre a une influence sur les masses volumiques absolues des mortiers étudiés.

Les résultats montrent que l’échantillon témoin qui ne contient aucun ajout et dont la composition est le sable et la chaux a une valeur de masse volumiques absolue de 2,05 (g/cm^3) égale a la valeur d’échantillon (MB1) mortier avec substitution de 2/3 de volume d’agrégats par la brique pillée. On constate aussi que les mortiers non adjuvantés (MB1, MB2 et MB3) présentent les plus hautes valeurs des masses volumiques absolues respectivement (2,05, 1,93 et 2,33 (g/cm^3)).

On peut noter que l’ajout de l’adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MB4, MB5 et MB6) à induit une diminution des masses volumiques absolues respectivement (1,52, 1,25 et 1,75 (g/cm^3)).

Les résultats montrent aussi que l’ajout de l’huile d’olive aux mortiers (MBH1, MBH2 et MBH3) est également manifeste, à induit une diminution clair des masses volumiques absolues respectivement (1,00, 1,3 et 1,05 (g/cm^3)).

La Fig.73. Illustre l’effet du taux de substitution de la brique pillée sur les masses volumiques apparentes des mortiers d’étude.

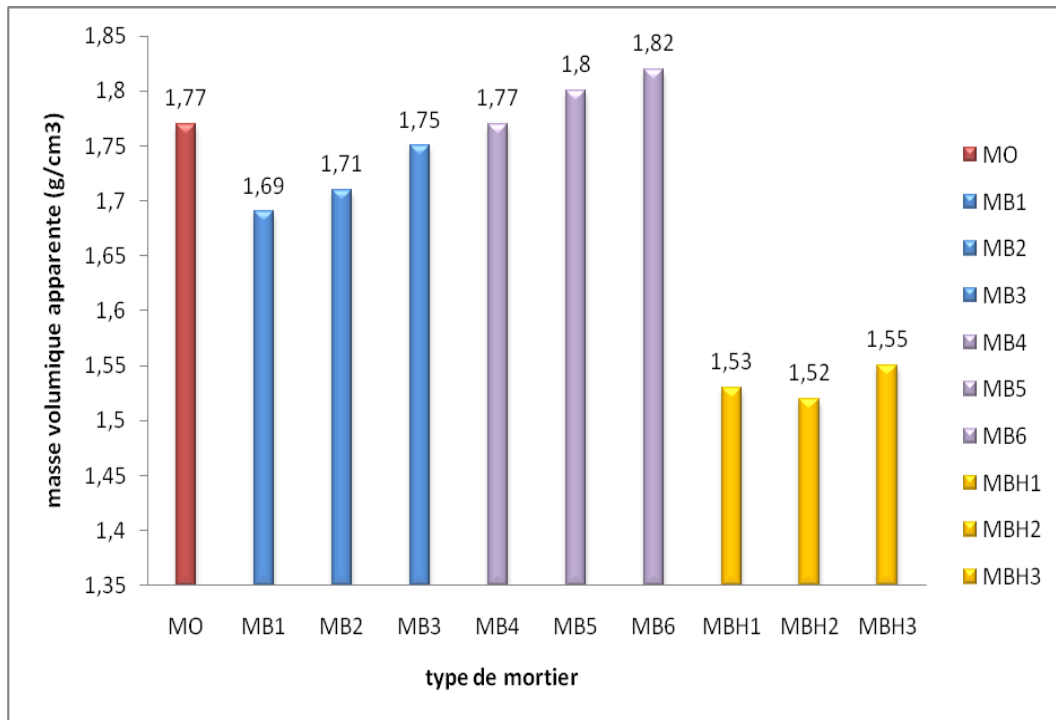


Fig.73. Les masses volumiques apparentes (M_v) des mortiers formulés.

Les résultats font ressortir comme la montre la figure (Fig.73), et le tableau 18, que la substitution de la chaux aérienne par de la poudre de brique pillée mise en œuvre, influence aussi les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.

Les résultats montrent que l'échantillon témoin qui ne contient aucun ajout et dont la composition est le sable et la chaux a une valeur de masse volumiques apparente de 1,77 (g/cm^3) égale à la valeur d'échantillon ($MB4$) mortier avec substitution de 2/3 de volume d'agrégats par la brique pillée avec l'ajout de 2 % d'adjuvant.

On peut noter que l'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers ($MB4$, $MB5$ et $MB6$) à induit une augmentation des masses volumiques apparentes par rapport au mortier témoin et aux mortiers non adjuvantés ($MB1$, $MB2$ et $MB3$).

On outre, l'ajout de l'huile d'olive aux mortiers ($MBH1$, $MBH2$ et $MBH3$) est également manifeste, à induit une diminution clair des masses volumiques apparentes respectivement (1,53, 1,52 et 1,55 (g/cm^3)).

La Fig.74. Illustre les valeurs des humidités des mortiers élaborés avec la substitution d'agrégats par la brique pillée à différents volumes.

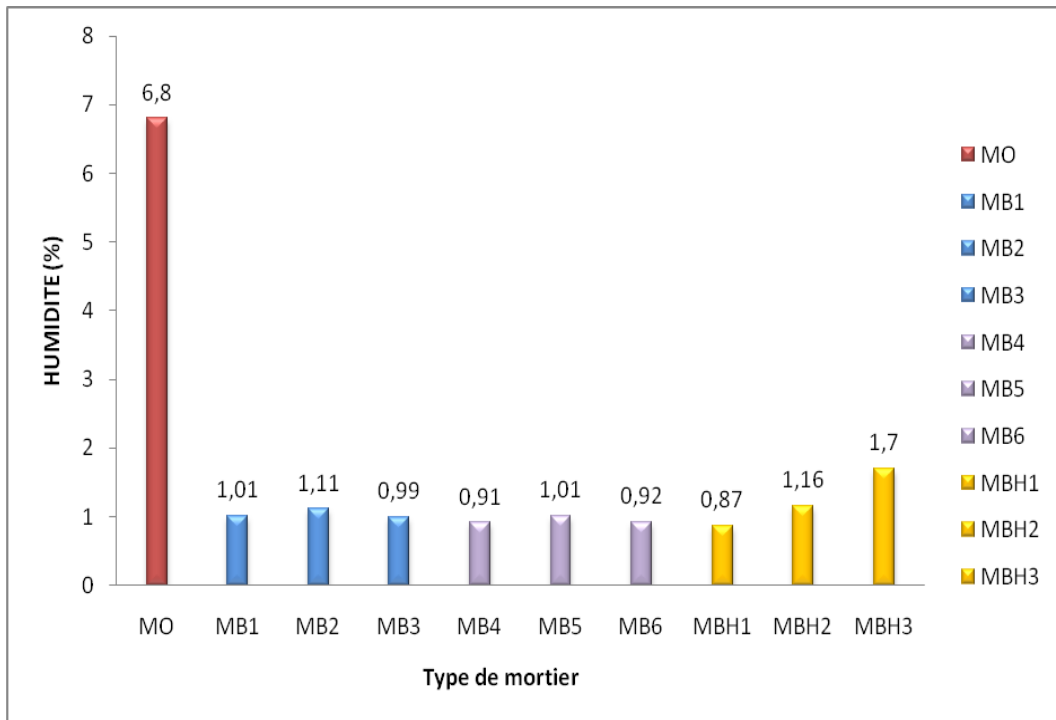


Fig.74. Les humidités des mortiers formulés.

Les résultats reportés dans le tableau 18, montrent bien que les valeurs des humidités pour tous les mortiers varient entre (0,87 et 1,7 %), valeurs petites par rapport au mortier témoin qui est égale à 6,8 %. Cela est expliqué par le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés, quelque soit le volume de la brique pillée substitué et le type d'ajouts ajouté.

La Fig.75. Illustre les valeurs des pH des mortiers élaborés avec la substitution d'agrégats par la brique pillée à différents volumes.

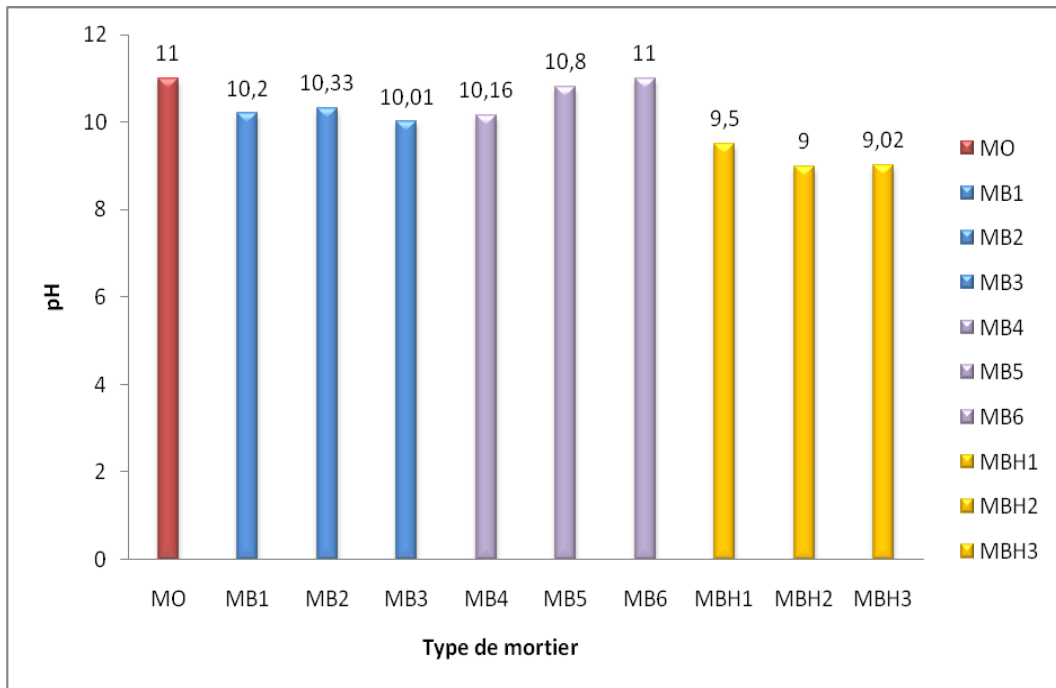


Fig.75. Les potentiels hydrogènes (pH) des mortiers formulés.

Les résultats reportés dans le tableau 18, montrent bien que les valeurs des pH pour tous les mortiers varient entre (9.00 et 11), cela explique le caractère basique des mortiers élaborés.

La Fig. 86. Illustre les valeurs des porosités ouvertes des mortiers élaborés avec la substitution d'agrégats par la brique pillée à différents volumes.

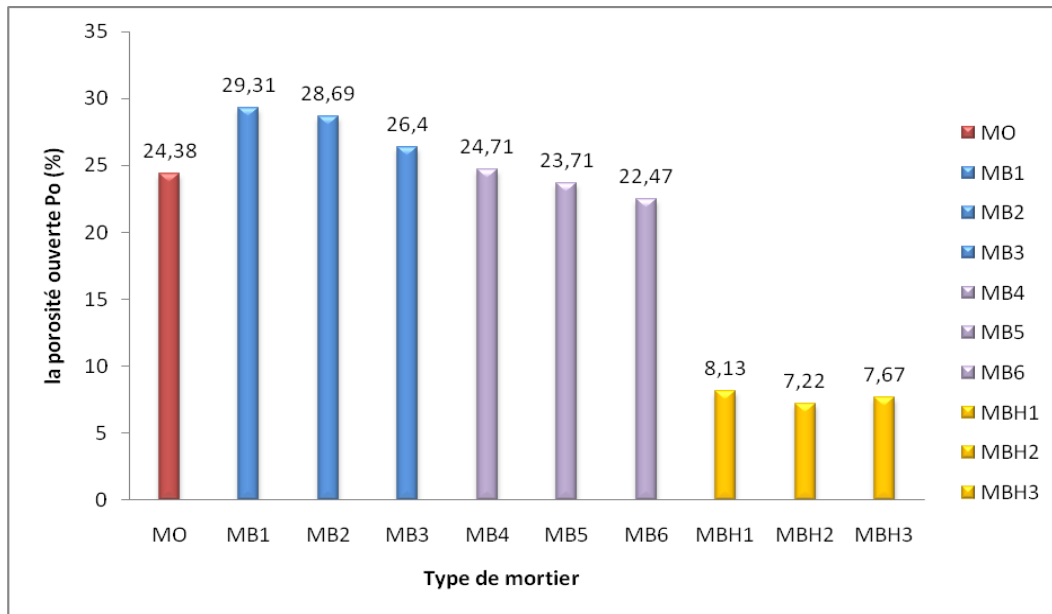


Fig.76. La porosité ouverte (Po) des échantillons de mortier de la première variante (Chaux + brique pilée).

Le test de porosité, réalisé sur des éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce quelque soit le volume de la brique pillée substitué et le type d'ajouts ajouté.

Les résultats reportés dans le tableau 2.8, montrent que d'échantillon (MB1) mortier avec substitution de 2/3 de volume d'agrégats par la brique pillée et sans adjuvant est le plus poreux avec une valeur maximale de porosité ouverte estimée à 29,31 %.

On peut noter que l'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MB4, MB5 et MB6) à induit une diminution des valeurs de la porosité avec des valeurs respectives de (24,71, 23,71, 22,47 %). Cela montre bien que le super plastifiant était à peine adsorbé sur les particules de chaux et les cristaux de C-S-H, ce qui conduit à la présence de molécules libres de super plastifiant dans la dispersion. Cela réduit également la quantité d'eau ajoutée lors de malaxage (tableau 2.7), et améliore la structure interne et par conséquent, la diminution des pores.

Les résultats obtenus ont révélé également une diminution remarquable des valeurs de la porosité pour les échantillons (MBH1, MBH2 et MBH3) mortiers formulés avec l'ajout de l'huile d'olive. Leurs valeurs sont estimées respectivement à (8,13, 7,22 et 7,67 %).

L'échantillon (*MBH2*) mortier avec substitution d'1 volume d'agrégats par la brique pillée avec ajout de l'huile d'olive, enregistre la plus petite valeur de la porosité qui est égale (7,22 %). Cela montre bien que l'effet super plastifiant de l'huile d'olive, ce qui a conduit à la présence de plus de molécules libres de l'huile d'olive dans la dispersion. Cela réduit également plus la quantité d'eau ajoutée lors de malaxage (tableau 2.7), et améliore la structure interne et par conséquent, la diminution des pores.

La Fig.77. Illustre les valeurs de l'absorption des mortiers élaborés avec la substitution d'agrégats par la brique pillée à différents volumes.

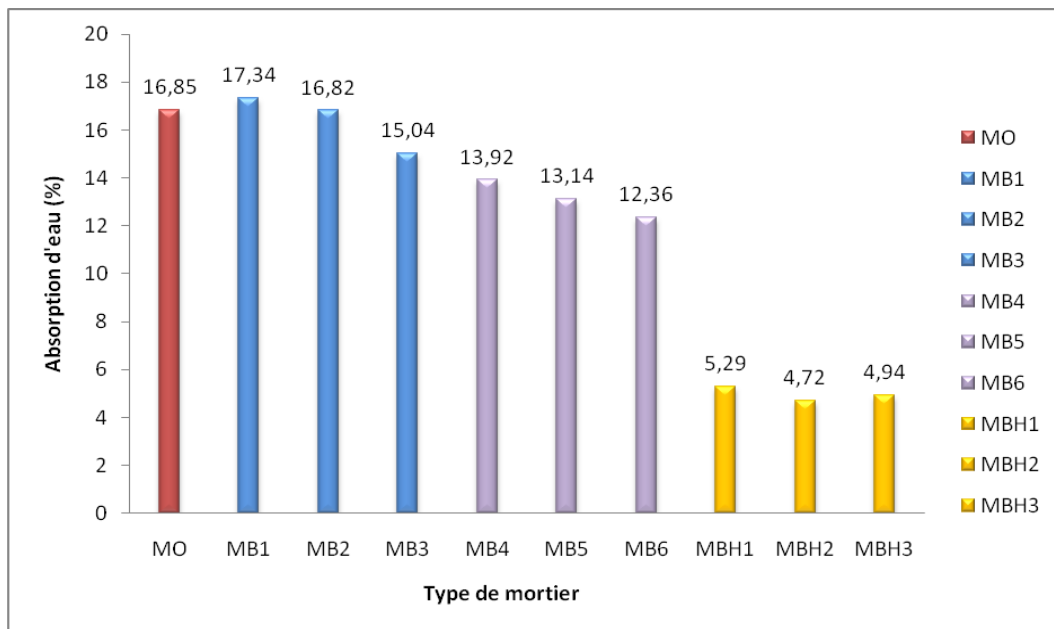


Fig.77. L'absorption d'eau des échantillons des mortiers formulés.

Toujours selon le tableau 18, on trouve que l'évolution de l'absorption suit le même comportement de la porosité ouverte. Les résultats montrent que l'échantillon *MB1* mortier avec substitution de 2/3 de volume d'agrégats par la brique pillée et sans adjuvant présente une valeur d'absorption maximale estimée à 17,34 %. On peut observer également que le l'échantillon (*MBH2*) mortier avec substitution de 1 volume d'agrégats par la brique pillée avec ajout de l'huile d'olive, enregistre la plus petite valeur de l'absorption elle est égale (4,72 %).

5. 1.1.2. Caractérisation mécanique.

5. 1.1.2.1. Résistance mécanique à la traction par flexion.

Les résultats de la résistance à la flexion, ont été calculés par la moyenne de trois échantillons de chaque type de mortier testé. L'évolution des valeurs de la résistance à 14 et à 28 jours de durcissement est montrée dans le tableau 27. Et illustrée dans la Fig.78.

Tableau 27. Les résistances mécaniques à la flexion des échantillons de mortier formulés.

Echantillons formulés	Résistance à la flexion 3 points (R_f) (MPa)	
	âges	
	14 jours	28 jours
MO	0,12	0,37
MB1	0,76	2,29
MB2	0,65	1,82
MB3	0,51	1,48
MB4	1,23	3,61
MB5	1,11	3,33
MB6	0,80	0,82
MBH1	0,14	0,38
MBH2	0,09	0,28
MBH3	0,07	0,21

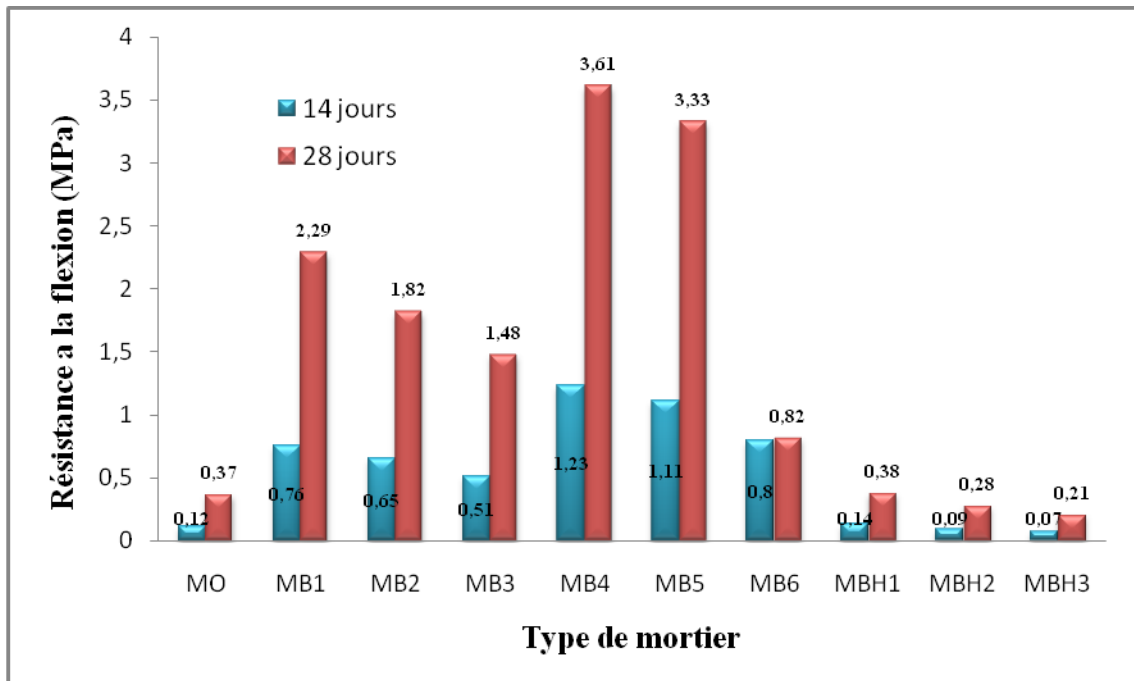


Fig.78. La résistance à la flexion (R_f) des mortiers formulés.

Tous les mortiers ont présenté une maniabilité proportionnée. La quantité d'eau utiliser pour chaque mortier est présentés dans le tableau 17, En outre, du tableau 17, on voie bien que l'ajout de l'adjuvant Médaflow 30, et l'huile d'olive ont provoqués une diminution

considérable d'eau, par conséquent, une diminution du rapport eau/liant. Cela était nécessaire pour réaliser des augmentations comparables des résistances.

D'après la Fig.78. À 14 jours, les résultats de la résistance à la flexion des mortiers sans ajout varient de (0,51 à 0,65 MPa). Alors que le mortier témoin (MO) à une résistance à la flexion égale à 0,12 MPa. La résistance à la flexion des mortiers avec ajout de brique pillée et de Médaflow 30 varient de (0,80 à 1,23 MPa). Toujours d'après la Fig.62, La résistance à la flexion des mortiers avec ajout de brique pillée et de l'huile d'olive enregistre les valeurs les plus faibles qui varient entre (0,07 à 0,09 MPa).

Toujours d'après la Fig.78.À 28 jours, on observe une tendance d'augmentation des valeurs de la résistance à la flexion (R_f) comparé à ceux à 14 jours. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée est de 3.61 MPa, qui correspond au mortier (MB4). Cela est dû à la Portlandite non réagi qui a continué à se carbonater et augmenter la résistance à la flexion (R_f) des mortiers.

5. 1.1. 2.2. Résistance mécanique à la compression.

Après les essais de flexion, des essais de compressions sont réalisés sur les demi-prismes. La figure 79. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours, chaque valeur est la moyenne de 02 valeurs de compression.

Le tableau 28. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours.

Tableau 28. Les résistances à la Compression des mortiers formulés.

Echantillons formulés	Résistance à la Compression (R_c) (MPa)	
	âges	
	14 jours	28 jours
MO	0,31	0,94
MB1	0,55	1,65
MB2	0,51	1,53
MB3	0,41	1,25
MB4	0,92	2,77
MB5	0,84	2,56
MB6	0,63	1,91
MBH1	0,16	0,48
MBH2	0,15	0,46
MBH3	0,13	0,39

Les valeurs de la résistance à la compression (R_c) des mortiers sont rapportées sur la Fig. 89. D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la résistance à la compression des mortiers suit le comportement de la résistance à la flexion.

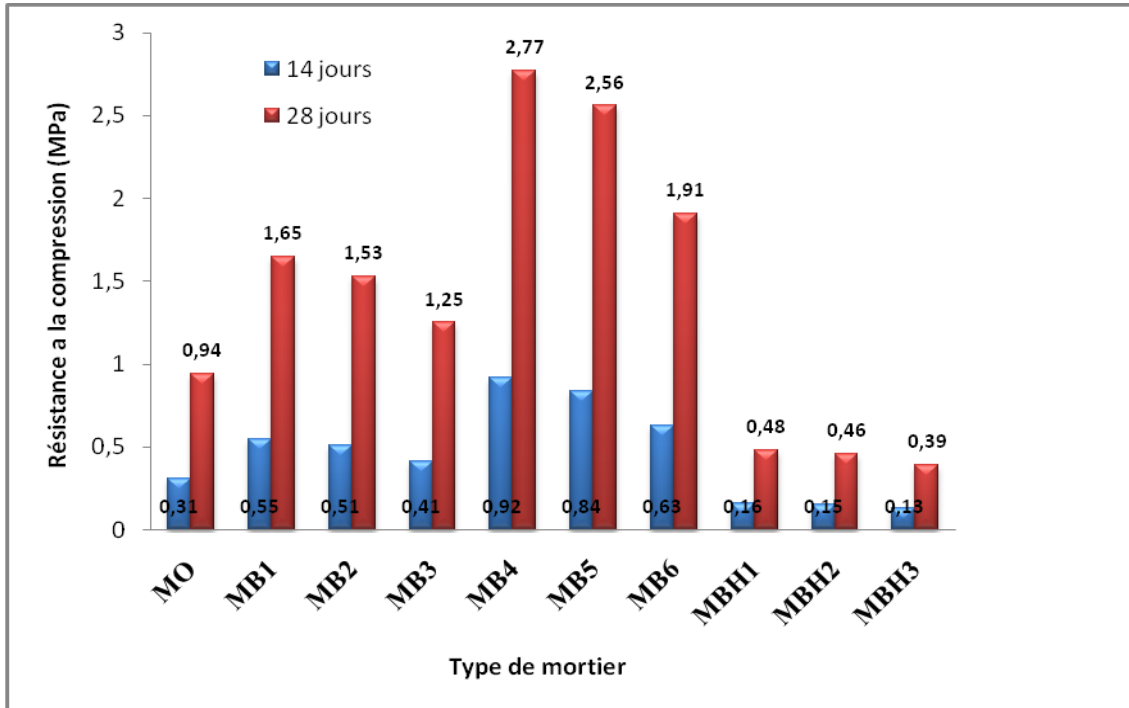


Fig.79. La résistance à la compression des mortiers formulés.

À 28 jours, les résultats de la résistance à la compression (R_c) changent dans une plus grande dimension comparée aux valeurs de la résistance à la flexion et avec des valeurs qui varient de (0,39 à 2,77 MPa). Les meilleures valeurs sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée de la résistance à la compression (R_c) est de 2,77 MPa, qui correspond au mortier (MB4). Mortier avec substitution de 2/3 de volume d'agrégats par la brique pillée avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Par ailleurs, les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de brique pillée et de l'huile d'olive. Qui varient entre (0,39 à 0,48 MPa).

5.1.1.3. Caractérisation hydrique

5.1.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité

Les résultats des masses cumulées de l'eau absorbées (M) par les échantillons en fonction de temps des différents mortiers sont montrés dans la Fig. 80.

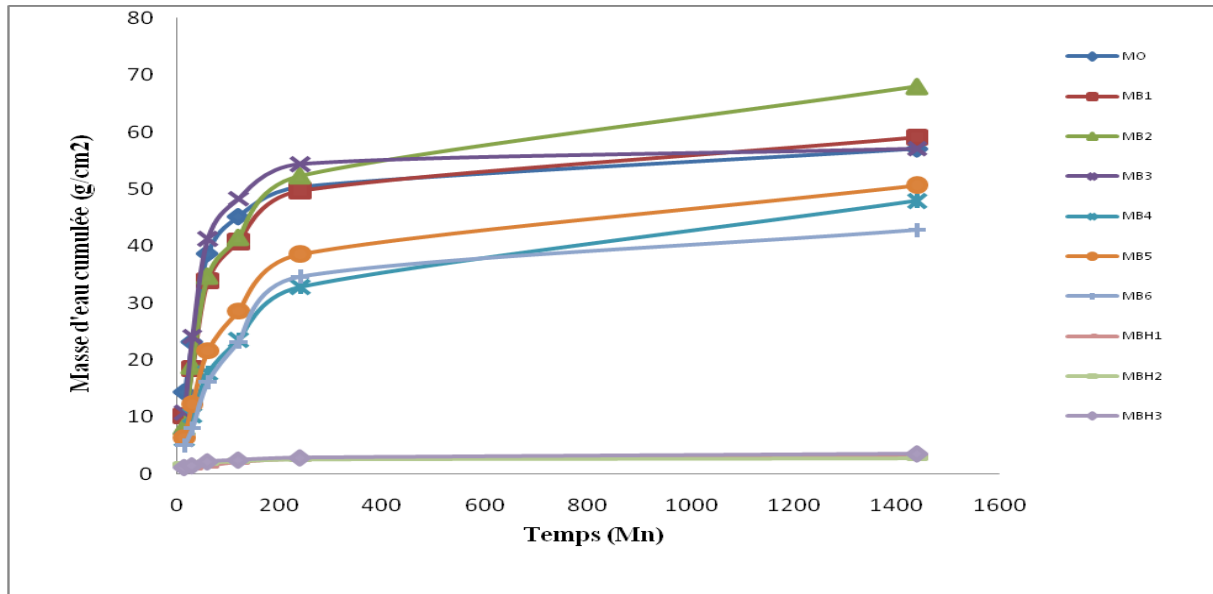


Fig.80. La masse d'eau cumulée.

Les mesures (masse cumulée des échantillons) ont été réalisées tout au long de 1440 minutes, soit 24 heures, entre des intervalles de temps bien précis (Tableau 29).

Tableau 29. Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.

t (mn)	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.					
	15	30	60	120	240	1440
MO	14,4	23,2	38,7	45,2	50,4	57,1
MB1	10,2	18,5	33,9	40,8	49,7	59,1
MB2	8,2	18,9	34,7	41,5	52,3	68,0
MB3	10,8	24,1	41,3	48,3	54,4	57,1
MB4	6,1	10,3	17,7	23,5	32,8	47,9
MB5	6,4	12,3	21,6	28,6	38,6	50,7
MB6	5,0	8,0	16,1	23,1	34,6	42,8
MBH1	1,0	1,2	1,5	2,1	2,6	3,0
MBH2	1,6	1,8	2,0	2,3	2,6	2,8
MBH3	1,2	1,5	2,2	2,5	2,9	3,6

On peut observer que la masse cumulée de l'eau absorbée évolue et augmente de façon quasi-constante jusqu'à $t = 240$ minutes (soit 4 heures) et ce, pour les différents échantillons de mortiers formulés sans ajout de médaflow ni de l'huile d'olive. Au-delà de ce temps, la masse d'eau absorbée par capillarité est nettement freinée, cela est due éventuellement à l'effet de la gravitation (cumul de la masse d'eau absorbée) . La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier (MB1) estimée à $49,7 \text{ g/cm}^2$. Mortier avec substitution de 2/3 de volume d'agrégats par la brique pillée et sans adjuvant.

On peut observer aussi la même évolution des masses cumulées de l'eau absorbée pour les échantillons de mortiers formulés substitution d'agrégats par la brique pillée et avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Mais avec des valeurs inférieures, La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier (MB4) estimée à $32,8 \text{ g/cm}^2$. Mortier avec substitution de 2/3 de volume d'agrégats par la brique pillée avec ajout de l'adjuvant Médaflow.

Par ailleurs, et d'après la Fig.80. Les valeurs des masses cumulées de l'eau absorbée les plus faibles sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de brique pillée et de l'huile d'olive. Une évolution presque linéaire est observée pour ces types de mortiers formulés. La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier (MBH1) estimée à $2,6 \text{ g/cm}^2$.

Afin de caractériser le coefficient d'absorption capillaire (i) pour toutes les compositions des mortiers étudiés, les valeurs expérimentales calculées sont regroupées dans le tableau 30. Et présentées dans la Fig.81. Les résultats obtenus des coefficients (i) varient entre 0,18 et $4,25 \text{ g/cm}^2$.

Tableau 30. Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers étudiés.

t (mn)	Coefficient d'absorption capillaire (i) (g/cm^2)					
	15	30	60	120	240	1440
MO	0,90	1,45	2,42	2,83	3,15	3,57
MB1	0,63	1,16	2,12	2,55	3,11	3,69
MB2	0,51	1,18	2,17	2,59	3,27	4,25
MB3	0,67	1,51	2,58	3,02	3,40	3,57
MB4	0,38	0,64	1,11	1,47	2,05	2,99
MB5	0,40	0,77	1,35	1,79	2,41	3,17
MB6	0,31	0,50	1,01	1,44	2,16	2,68
MBH1	0,06	0,08	0,09	0,13	0,16	0,19
MBH2	0,10	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18
MBH3	0,07	0,09	0,14	0,16	0,18	0,23

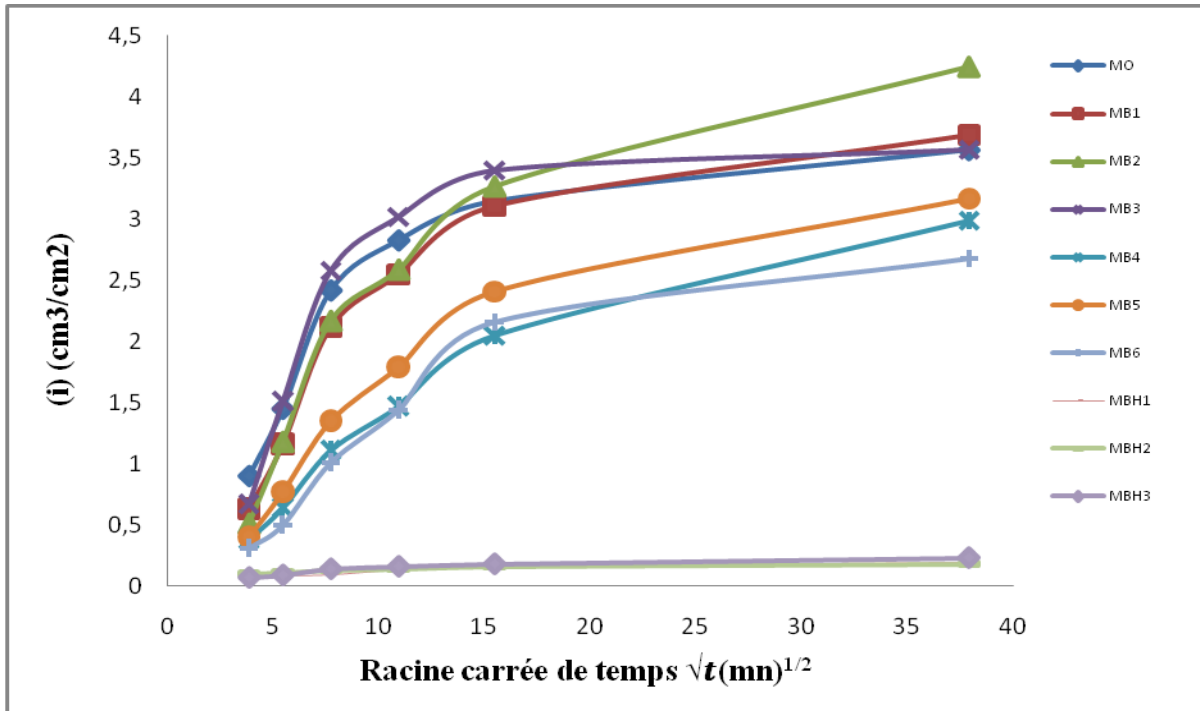


Fig.81. Le coefficient d'absorption capillaire (i).

Les courbes de l'évolution des coefficients d'absorptions capillaires et les masses cumulées d'eau absorbées (Fig. 82 et Fig. 83.) ont une tendance plus ou moins linéaire, ce qui démontre la structure homogène des mortiers préparés. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs.

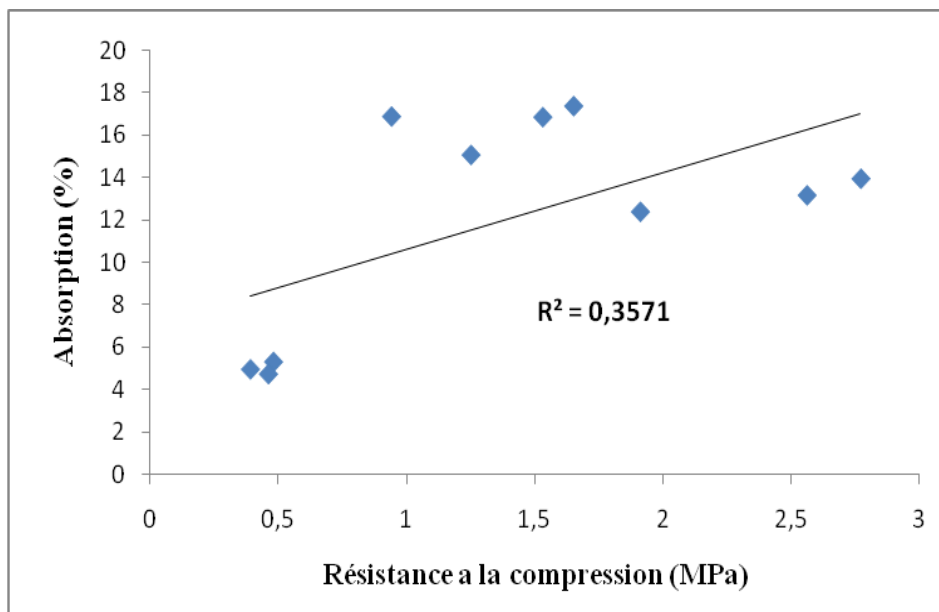


Fig. 82. La corrélation entre l'absorption de l'eau et la résistance à la compression.

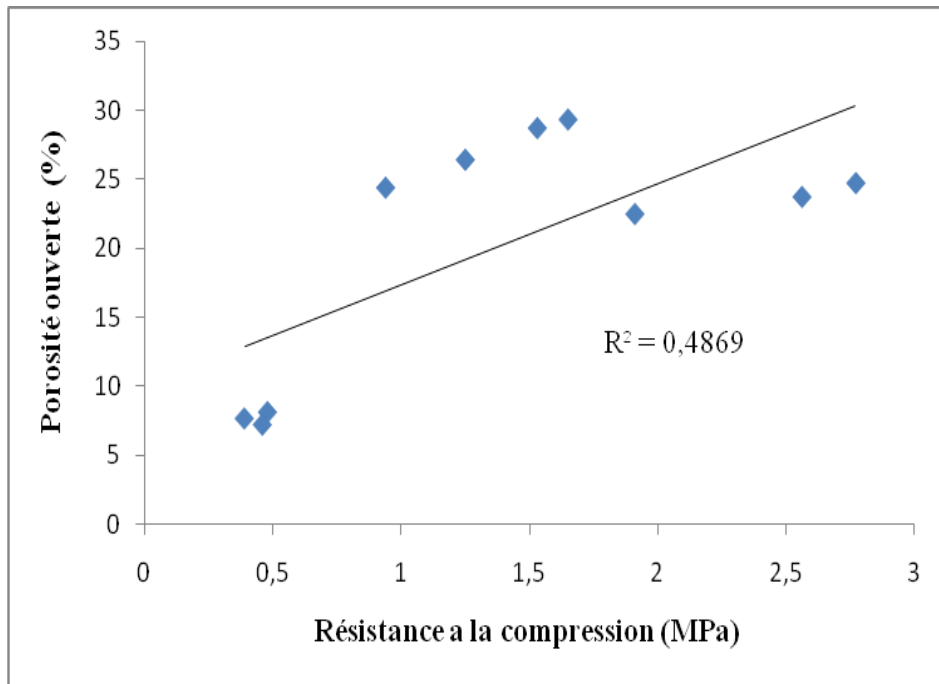


Fig. 83. La corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression.

La relation entre l'absorption d'eau, la porosité ouverte (Po) et la résistance à la compression des différents échantillons est illustrée dans les figures (Fig.82 et Fig.83).

La droite de régression linéaire met en exergue une tendance à la baisse qui existe entre l'absorption d'eau et la résistance mécaniques des mortiers. En effet, on peut remarquer une diminution de l'absorption d'eau accompagnée d'une augmentation de la résistance à la compression. La valeur minimale d'absorption de l'eau correspond à la valeur maximale de la résistance à la compression ce qui montre la relation de dépendance entre ces deux propriétés. La même évolution est observée pour la relation entre la porosité des échantillons et la résistance mécanique à la compression.

5.2. La deuxième variante des mortiers (Ajout de la pouzzolane).

Les matériaux pouzzolaniques ont été employés dans le monde entier depuis les périodes anciennes et avant les ciments hydrauliques pour construire des aqueducs, ponts, égouts et les structures de toutes les sortes. (Werner, O.R, et al, (1994))¹⁴⁵.

Les mortiers réalisés sont illustrés dans l'organigramme Fig.84.

145. Werner, O.R., et al., 1994. Proposed report: use of natural pozzolans in concrete. ACI Materials Journal 232, 91 (4), 410– 426. (Report of ACI (American Concrete).

Fig.84. Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation de la deuxième variante de mortier (chaux +pouzzolane).

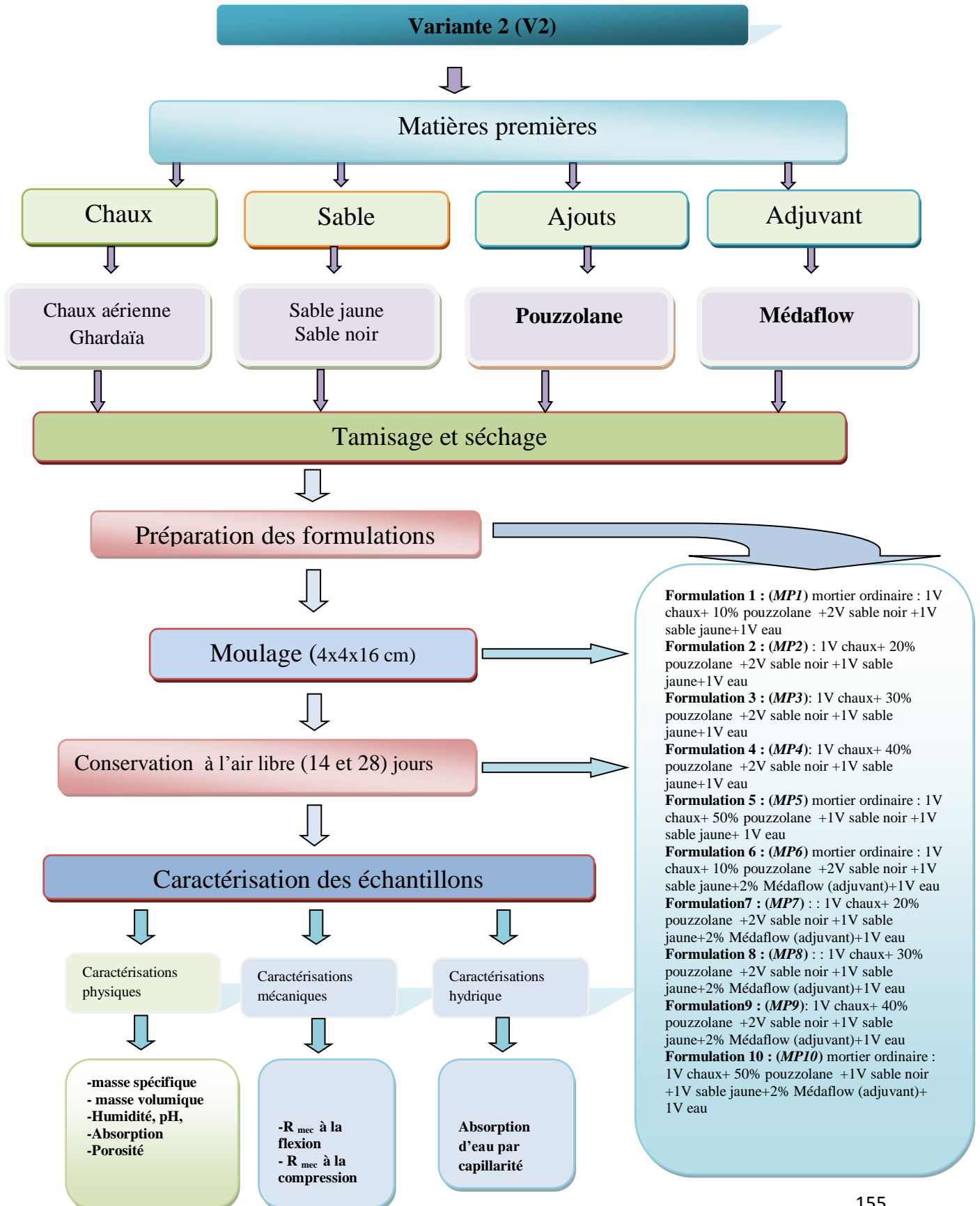


Tableau 31. Composition de la deuxième variante des mortiers (chaux+ pouzzolane).

Nom de formulation	Formulation	Chaux (g)	Pouzzolane (g)	Sable noir (g)	Sable jaune (g)	Eau (ml)	Adjuvant (% de masse de chaux)
<i>MO</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+Eau	450	0	1285	428	570	0
<i>MP1</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	395	55	1285	428	580	0
<i>MP2</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 20% pouzzolane+Eau	340	110	1285	428	590	0
<i>MP3</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 30% pouzzolane+Eau	285	165	1285	428	600	0
<i>MP4</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 40% pouzzolane+Eau	230	220	1285	428	610	0
<i>MP5</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 50% pouzzolane+Eau	175	275	1285	428	620	0
<i>MP6</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	395	55	1285	428	480	2
<i>MP7</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	340	110	1285	428	490	2
<i>MP8</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	285	165	1285	428	500	2
<i>MP9</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	230	220	1285	428	510	2
<i>MP10</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	175	275	1285	428	520	2

Les masses des constituants présentés dans le tableau ci-dessus sont données en volume.

Les masses nécessaire de chaque constituant dans la formulation des mortiers seront déterminées en fonction de la masse volumiques de constituant lui-même pour arriver à la quantité plus exacte de chaque composant dans chaque formulation, Le calcul sera fait avec la formule suivante :

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (\text{g} / \text{cm}^3).$$

5. 2.1. Caractérisation des échantillons de mortiers formulés.

Cette partie est consacrée aux essais physiques réalisés sur les mortiers étudiés à l'état durci. Toutes les procédures d'essais ont été exposées en détails dans la partie précédente.

5.2.1.1. Caractérisation physique.

La caractérisation physique a été faite à la base de différents essais qui consistent en le calcul des masses volumiques spécifiques et apparentes, de l'absorption d'eau, de la porosité ouverte, de l'humidité, et de potentiel d'hydrogène .L'ensemble de ces essais ont été menés conformément aux méthodes et normes en vigueur.

Les valeurs moyennes des propriétés physiques après 28 jours de durcissement sont rapportées dans le tableau 32.

Tableau 32. Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers formulés.

Echantillons formulés	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Porosité ouverte Po (%)	Absorption d'eau (%)	Humidité H (%)	Potentiel D'Hydrogène pH
MO	2,05	1,77	24,38	13,76	1,12	11,33
MP1	2,10	1,78	25,22	14,20	1,11	11,10
MP2	2,33	1,80	24,86	13,75	1,13	10,08
MP3	1,44	1,80	25,65	14,20	1,13	10,80
MP4	2,15	1,85	24,19	13,06	1,19	11,01
MP5	1,96	1,85	24,49	13,22	1,12	11,40
MP6	2,43	1,88	20,75	11,01	1,09	10,70
MP7	2,41	1,92	20,20	10,48	1,06	10,60
MP8	2,05	1,94	19,89	10,21	1,05	10,58
MP9	2,52	1,95	20,31	10,44	1,17	11,08
MP10	2,75	1,98	18,92	9,55	1,18	11,07

La figure (Fig. 85). Illustre l'effet du taux de substitution de la pouzzolane sur la masse volumique absolue des mortiers formulés.

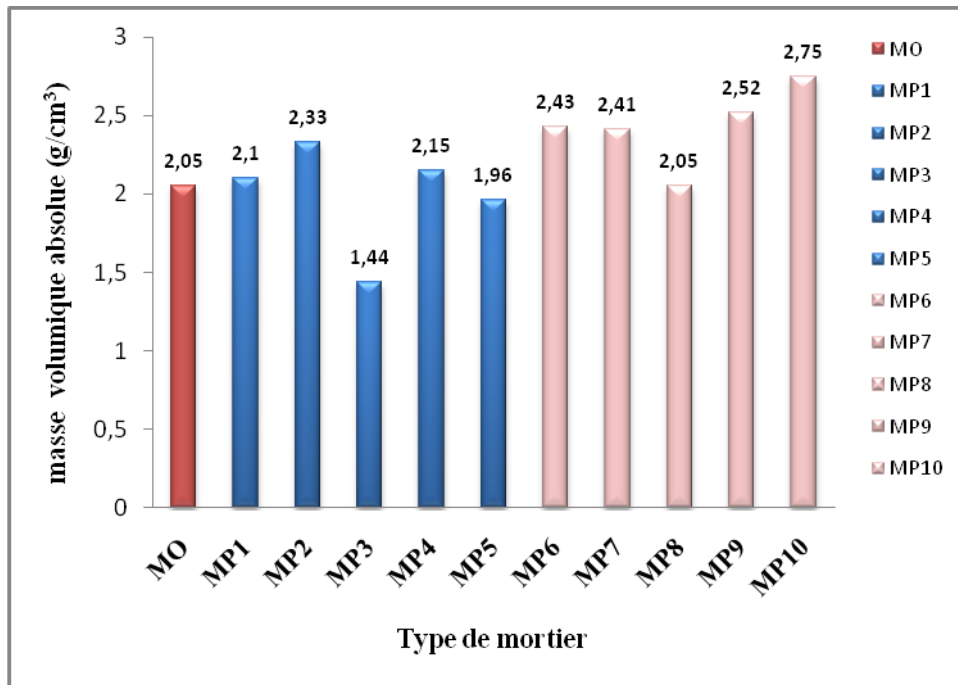


Fig.85. Les masses volumiques absolues des mortiers formulés.

On constate d’après la Fig. 85 et le tableau 24. Que la substitution de la chaux aérienne par la pouzzolane mise en œuvre a une influence sur les masses volumiques absolues des mortiers étudiés.

Les résultats montrent que l’échantillon témoin qui ne contient aucun ajout et dont la composition est le sable et la chaux à une valeur de masse volumiques absolue de 2,05 (g/cm³). Les mortiers non adjuvantés (MP1, MP2, MP3, MP4 et MP5) présentent des valeurs des masses volumiques absolues proches à l’échantillon témoin (2,10, 2,33, 1,44, 2,15 et 1,96 (g/cm³)).

On peut noter que l’ajout de l’adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MP6, MP7, MP8, MP9 et MP10) est également manifeste, et qui à induit une augmentation des masses volumiques absolues respectivement (2,43, 2,41 2, 05, 2,52 et 2,75 (g/cm³)).

La Fig.86. Illustre l’effet du taux de substitution de la pouzzolane sur les masses volumiques apparentes des mortiers d’étude.

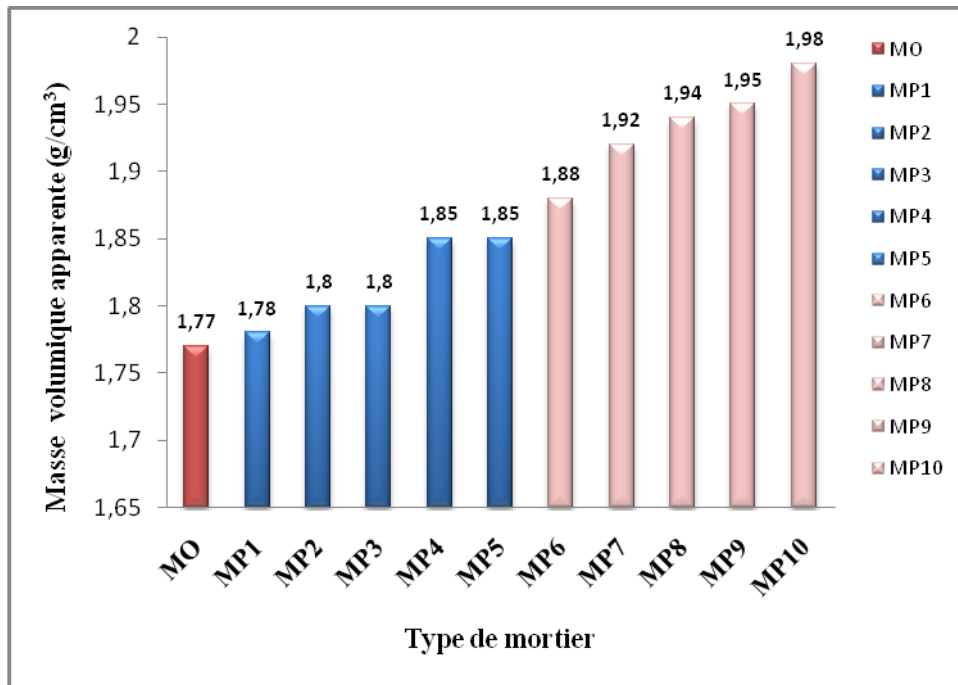


Fig.86. Les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.

Les résultats font ressortir comme la montre la figure (Fig.86), et le tableau 24, que la substitution de la chaux aérienne par la pouzzolane, influence aussi les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.

Les résultats montrent que l'échantillon témoin (MO) à une valeur de masse volumique apparente de 1,77 (g/cm³), valeur proche à celles des échantillons de mortier avec substitution de la chaux par la pouzzolane mais en œuvre mais sans ajout de l'adjuvant.

On peut noter que l'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MP6, MP7, MP8, MP9 et MP10) à induit une augmentation des masses volumiques apparentes par rapport au mortier témoin et aux mortiers non adjuvés.

La Fig. 87. Illustre les valeurs des humidités des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux à la pouzzolane à différents volumes.

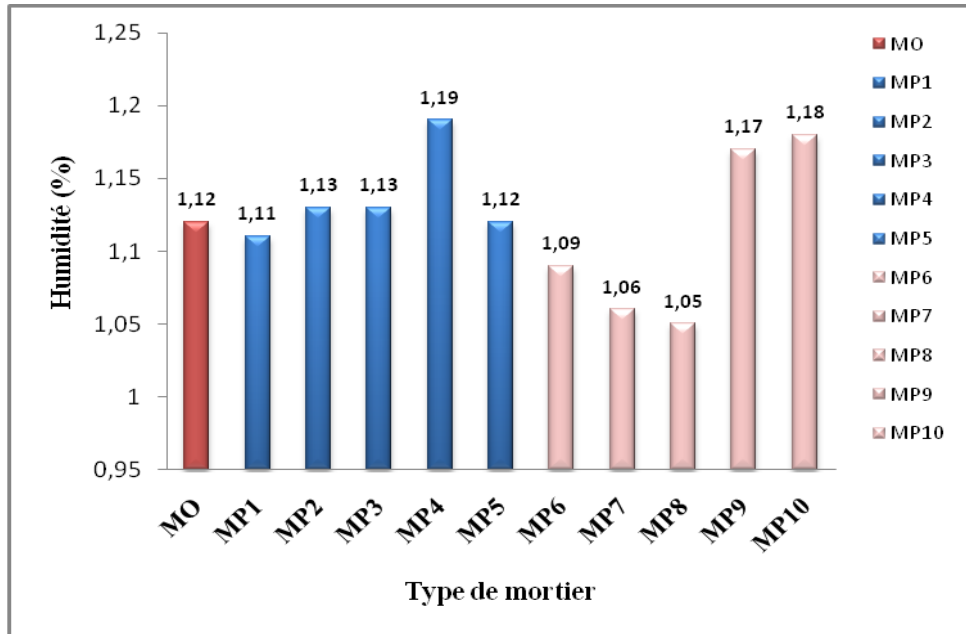


Fig.87. Les humidités des mortiers formulés.

Les résultats reportés dans le tableau 24, montrent bien que les valeurs des humidités pour tous les mortiers varient entre (1,05 et 1,19 %). Cela est par le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés, quelque soit le volume de la pouzzolane substitué et le type d'ajouts ajouté.

La Fig.88. Illustre les valeurs des pH des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux à la pouzzolane à différents volumes.

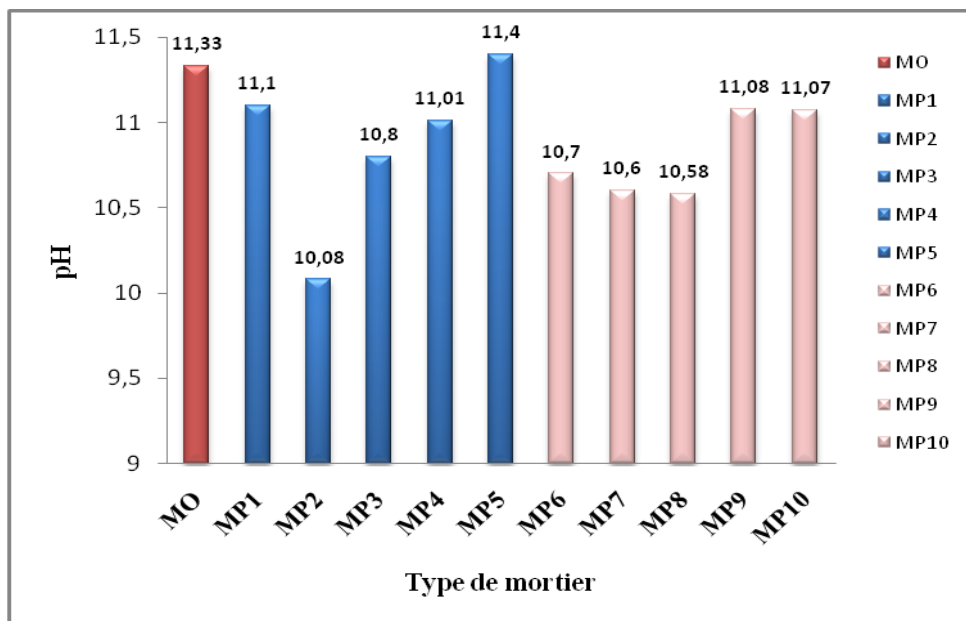


Fig.88. Les pH des mortiers formulés.

Les résultats reportés dans le tableau 24, montrent bien que les valeurs des pH pour tous les mortiers varient entre (9.00 et 11), cela explique le caractère basique des mortiers élaborés.

La Fig.89. Illustre les valeurs des porosités ouvertes des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux à la pouzzolane à différents volumes.

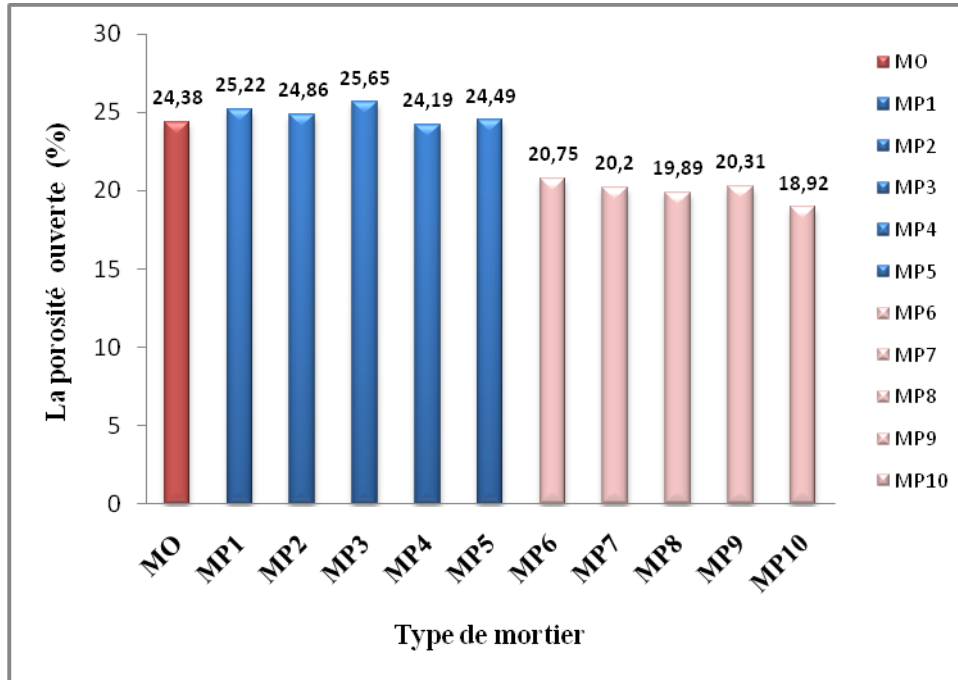


Fig.89.La porosité des mortiers formulés.

Le test de porosité, réalisé sur des éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce quelque soit le volume de la pouzzolane substitué et le type d'ajouts ajouté.

Les résultats reportés dans le tableau 24, montrent que d'échantillon (MP3) mortier avec substitution de 30 % de la chaux par la pouzzolane et sans adjuvant est le plus poreux avec une valeur maximale de porosité ouverte estimée à 25,65 %.

On peut noter que l'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MP6, MP7, MP8, MP9 et MP10) à induit une diminution des valeurs de la porosité avec des valeurs respectives de (20,75, 20,20, 19,89, 20,31 et 18,92 %). Cela montre bien que le super plastifiant était à peine adsorbé sur les particules de chaux et les cristaux de C-S-H, ce qui conduit à la présence de molécules libres de super plastifiant dans la dispersion. Cela réduit également la quantité

d'eau ajoutée lors de malaxage (tableau 17), et améliore la structure interne et par conséquent, la diminution des pores.

La Fig. 90. Illustre les valeurs de l'absorption des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux à la pouzzolane à différents volumes.

Toujours selon le tableau (24), on trouve que l'évolution de l'absorption suit le même comportement de la porosité ouverte. Les résultats montrent que l'échantillon (MP3) mortier avec substitution de 30 % de la chaux par la pouzzolane et sans adjuvant présente une valeur d'absorption maximale estimée à 14,2 %. On peut observer également que le l'échantillon (MP10) mortier avec substitution de 50 % de la chaux par la pouzzolane avec adjuvant, enregistre la plus petite valeur de l'absorption elle est égale (9,55 %).

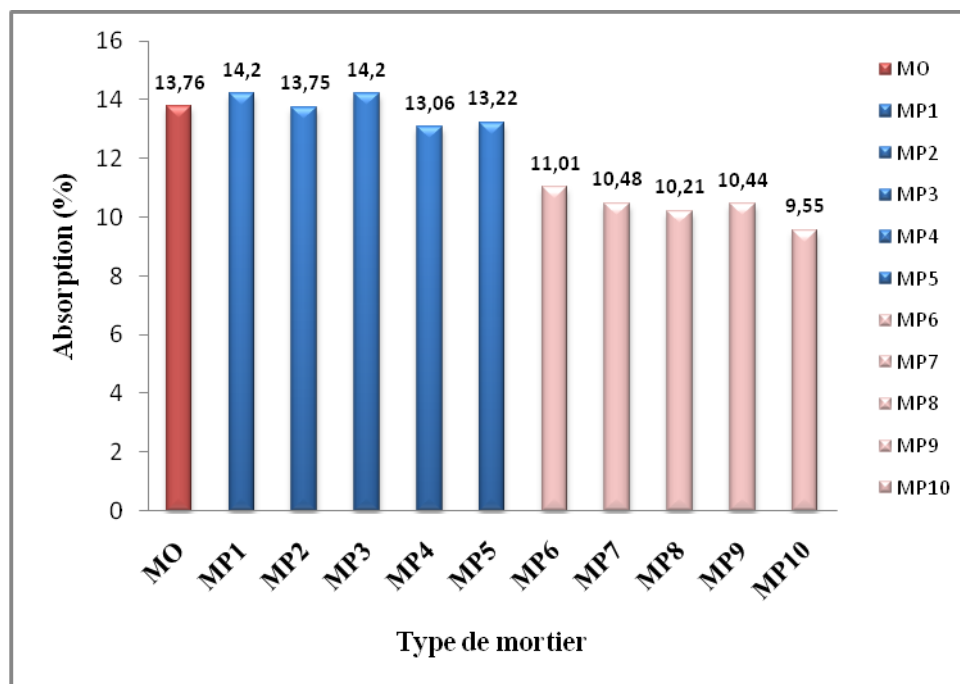


Fig.90. L'absorption des mortiers formulés.

5.2.1.2. Caractérisation mécanique.

5.2.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.

Les résultats de la résistance à la flexion, ont été calculés par la moyenne de trois échantillons de chaque type de mortier testé. L'évolution des valeurs de la résistance à 14 et à 28 jours de durcissement est montrée dans le tableau 25. Et illustrée dans la Fig. 91.

Le tableau 33 représente les résultats de la résistance à la flexion à 14 et 28 jours.

Tableau 33. Les résistances mécaniques à la flexion des mortiers formulés.

Résistances mécaniques	Echantillon de mortier	âges	
		14 jours	28 jours
Résistance à la flexion 3 points (MPa)	MO	0,12	0,37
	MP1	0,11	0,35
	MP2	0,13	0,3
	MP3	0,11	0,27
	MP4	0,09	0,18
	MP5	0,10	0,21
	MP6	0,22	0,64
	MP7	0,23	0,71
	MP8	0,27	0,73
	MP9	0,28	0,75
	MP10	0,33	0,78

La Fig.91. Illustre les valeurs de la résistance mécanique à la flexion des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par la pouzzolane à différents volumes.

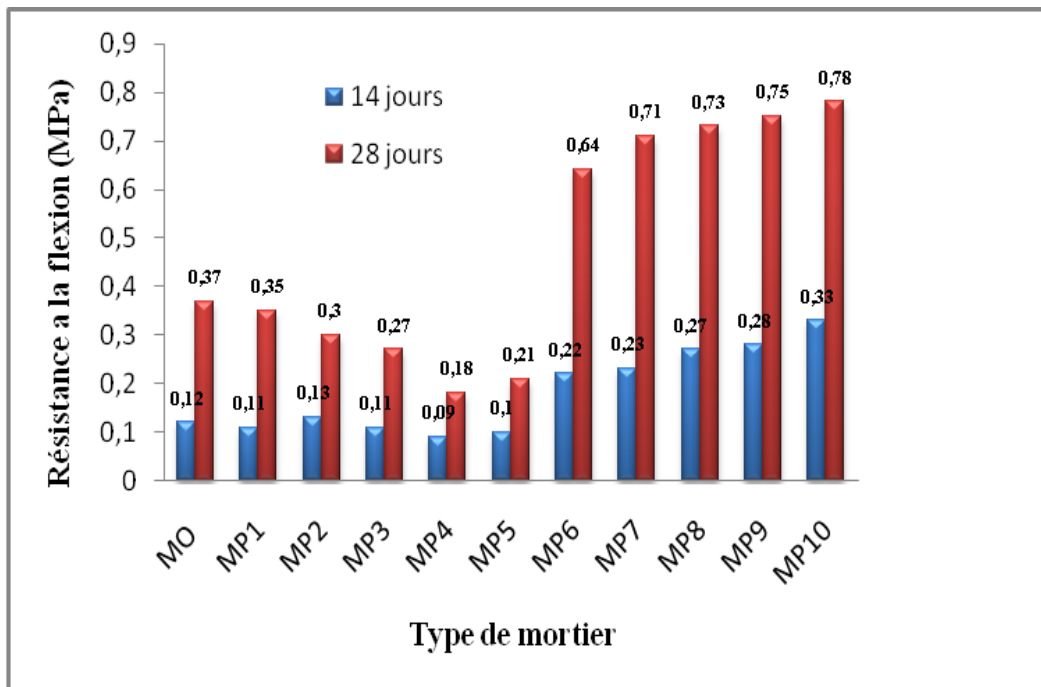


Fig.91. La résistance à la flexion à 28 jours des mortiers formulés.

Tous les mortiers ont présenté une maniabilité proportionnée. La quantité d'eau utilisée pour chaque mortier est présentée dans le tableau 17, En outre, du tableau 25, on voit bien que l'ajout de l'adjuvant Médaflow 30 a provoqué une diminution considérable d'eau, par

conséquent, une diminution du rapport eau/liant. Cela était nécessaire pour réaliser des augmentations comparables des résistances.

D'après la Fig.91. À 14 jours, les résultats de la résistance à la flexion des mortiers sans ajout varient de (0,09 à 0,13 MPa). Alors que le mortier témoin (MO) à une résistance à la flexion égale à 0,12 MPa. La résistance à la flexion des mortiers avec ajout de la pouzzolane et de Médaflo 30 varient de (0,22 à 0,33 MPa).

Toujours d'après la Fig.91, À 28 jours, on observe une tendance d'augmentation des valeurs de la résistance à la flexion comparé à ceux à 14 jours. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée est de 0,78 MPa, qui correspond au mortier (MP10) mortier avec la substitution de 50 % de la chaux par la pouzzolane avec adjuvant. Cela est dû à la Portlandite non réagi qui a continué à se carbonater et augmenter la résistance à la flexion des mortiers.

5.2.1.2.2. Résistance mécanique à la compression

Après les essais de flexion, des essais de compressions sont réalisés sur les demi-prismes. La Fig. 92. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours, chaque valeur est la moyenne de 02 valeurs de compression.

Le tableau 34. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours.

Tableau 34. Les résistances mécaniques à la compression des mortiers formulés.

Resistances mécaniques	Echantillon de mortier	âges	
		14 jours	28 jours
Résistance à la Compression (MPa)	MO	0,31	0,94
	MP1	0,22	0,65
	MP2	0,29	0,83
	MP3	0,25	0,78
	MP4	0,22	0,57
	MP5	0,25	0,76
	MP6	0,60	1,88
	MP7	0,70	1,96
	MP8	0,80	2,10
	MP9	0,92	2,37
	MP10	1,10	3,07

Les valeurs de la résistance à la compression (R_c) des mortiers sont rapportées sur la Fig. 92. D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la résistance à la compression des mortiers suit le comportement de la résistance à la flexion.

Les meilleures valeurs sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée de la résistance à la compression (R_c) est de 3,07 MPa, qui correspond au mortier (MP10). Mortier avec substitution de 50 % de la chaux par la pouzzolane et avec ajout de l'adjuvant Médaflow.

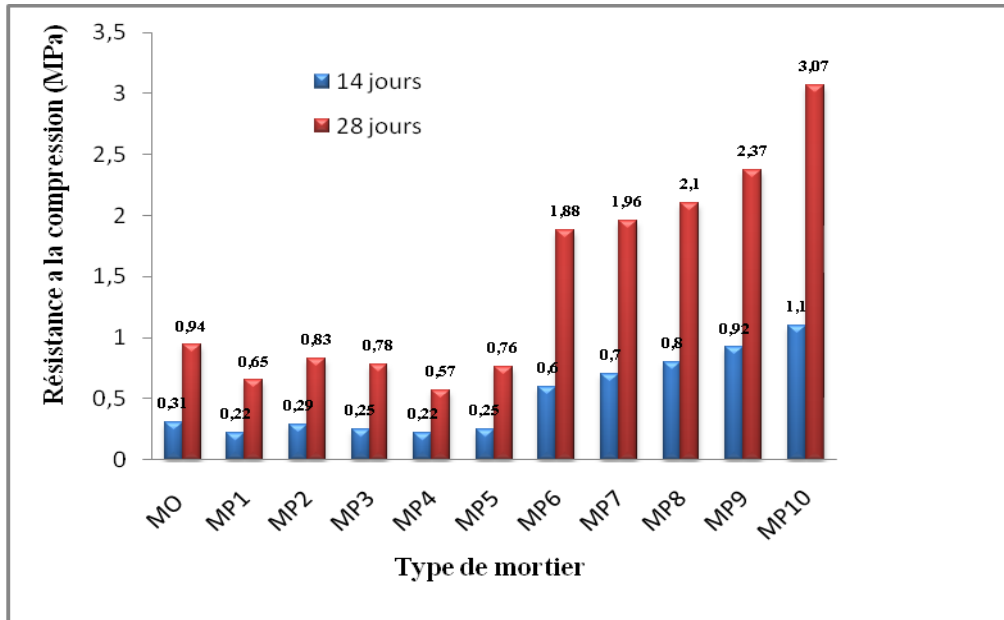


Fig.92. La résistance à la compression à 28 jours des mortiers formulés.

5.2.1.3. Caractérisation hydrique

5. 2.1.3. 1. Absorption d'eau par capillarité

Les résultats des masses cumulées de l'eau absorbées (M) par les échantillons en fonction de temps des différents mortiers sont montrés dans la (Fig. 93).

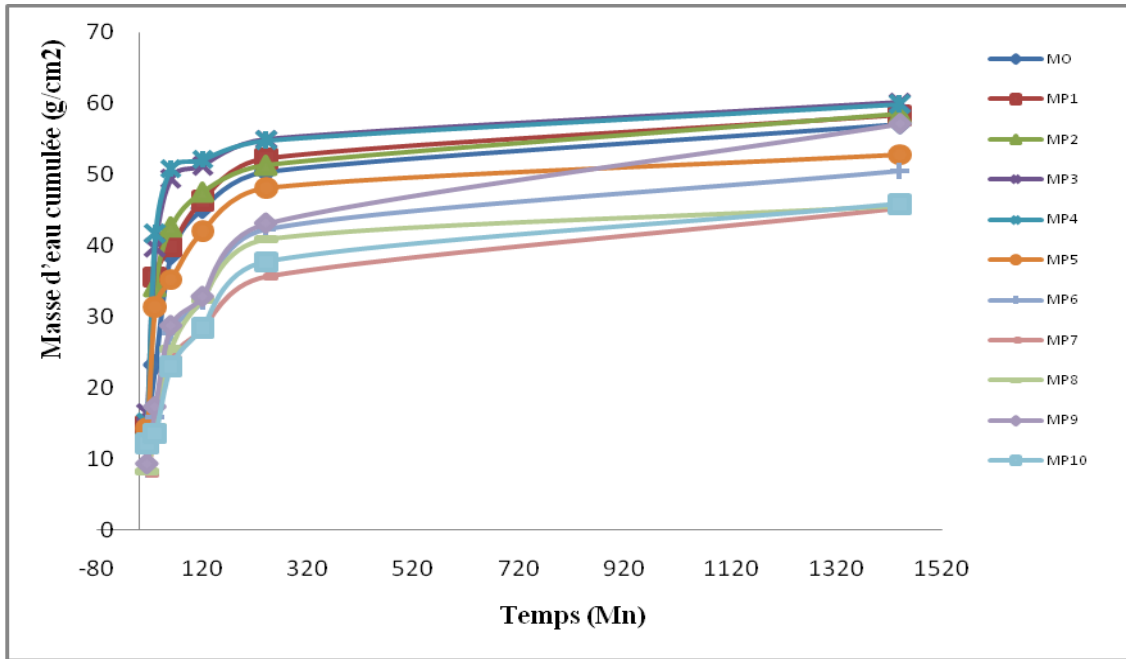


Fig.93. La masse d'eau cumulée des mortiers formulés.

Les mesures (masse cumulée des échantillons) ont été réalisées tout au long de 1440 minutes, soit 24 heures, entre des intervalles de temps bien précis (tableau 35).

Tableau 35. Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers .

t (mn)	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.					
	15	30	60	120	240	1440
MO	14,4	23,2	38,7	45,2	50,4	57,1
MP1	14,6	35,5	39,8	46,3	52,2	58,3
MP2	14,5	34,2	42,6	47,5	51,3	58,5
MP3	16,5	39,7	49,4	51,2	54,9	60,1
MP4	15,2	41,7	50,8	52,1	54,8	59,9
MP5	14,3	31,3	35,2	42,0	48,1	52,8
MP6	8,5	15,8	27,7	32,2	42,3	50,5
MP7	7,8	14,3	23,9	28,2	35,6	45,2
MP8	8,2	14,5	25,5	32,4	40,8	45,5
MP9	9,3	17,3	28,7	32,8	43,1	57,1
MP10	12,1	13,5	23	28,4	37,7	45,8

On peut observer que la masse cumulée de l'eau absorbée évolue et augmente de façon quasi-constante jusqu'à $t = 240$ minutes (soit 4 heures) et ce, pour les différents échantillons de mortiers. Au-delà de ce temps, la masse d'eau absorbée par capillarité est nettement freinée, cela est due éventuellement à l'effet de la gravitation (cumul de la masse d'eau absorbée) . La

valeur minimale absorbée à $t = 240 \text{ mn}$ a été enregistrée par le mortier MP7 estimée à $35,6 \text{ g/cm}^2$.

Afin de caractériser le coefficient d'absorption capillaire (i) pour toutes les compositions des mortiers étudiés, les valeurs expérimentales calculées sont regroupées dans le tableau 36. et présentées dans la Fig.94. Les résultats obtenus des coefficients (i) varient entre 2,83 et 3,76 g/cm^2 .

Tableau 36. Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers.

t (mn)	Coefficient d'absorption capillaire (i) (g/cm^2)					
	15	30	60	120	240	1440
MO	0,90	1,45	2,42	2,83	3,15	3,57
MP1	0,91	2,22	2,49	2,89	3,26	3,64
MP2	0,91	2,14	2,66	2,97	3,21	3,66
MP3	1,03	2,48	3,09	3,20	3,43	3,76
MP4	0,95	2,61	3,18	3,26	3,43	3,74
MP5	0,89	1,96	2,20	2,63	3,01	3,30
MP6	0,53	0,99	1,73	2,01	2,64	3,16
MP7	0,49	0,89	1,49	1,76	2,23	2,83
MP8	0,51	0,91	1,59	2,03	2,55	2,84
MP9	0,58	1,08	1,79	2,05	2,69	3,57
MP10	0,76	0,84	1,44	1,78	2,36	2,86

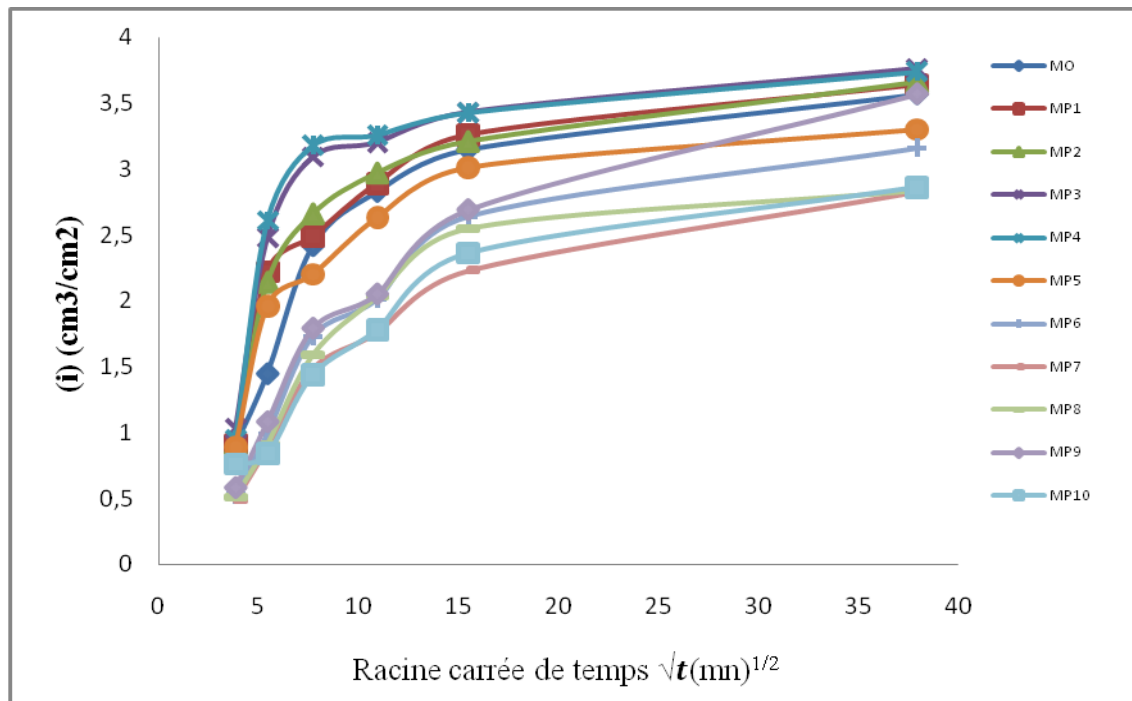


Fig.94. Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.

Les courbes de l'évolution des coefficients d'absorptions capillaires et les masses cumulées d'eau absorbées (Fig.93 et Fig.94) ont une tendance plus ou moins linéaire, ce qui démontre la structure homogène des mortiers préparés. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs.

Le mortier (MP7) présente la plus basse valeur d'absorption par capillarité comparée aux autres mortiers. D'autre part, Les résultats des tests des coefficients (i) montrent aussi que plus la teneur en pouzzolane augmente dans les mortiers en particulier ceux adjuvantés, plus les valeurs des coefficients (i) s'éloignent de celle du mortier témoin, ils sont caractérisés par des valeurs d'absorption par capillarité moins importantes. Cette caractéristique permet de les classer dans la catégorie des mortiers adéquats pour des applications en milieux humides.

La relation entre l'absorption d'eau, la porosité ouverte (Po) et la résistance à la compression des différents échantillons est illustrée dans les Fig.95 et la Fig.96.

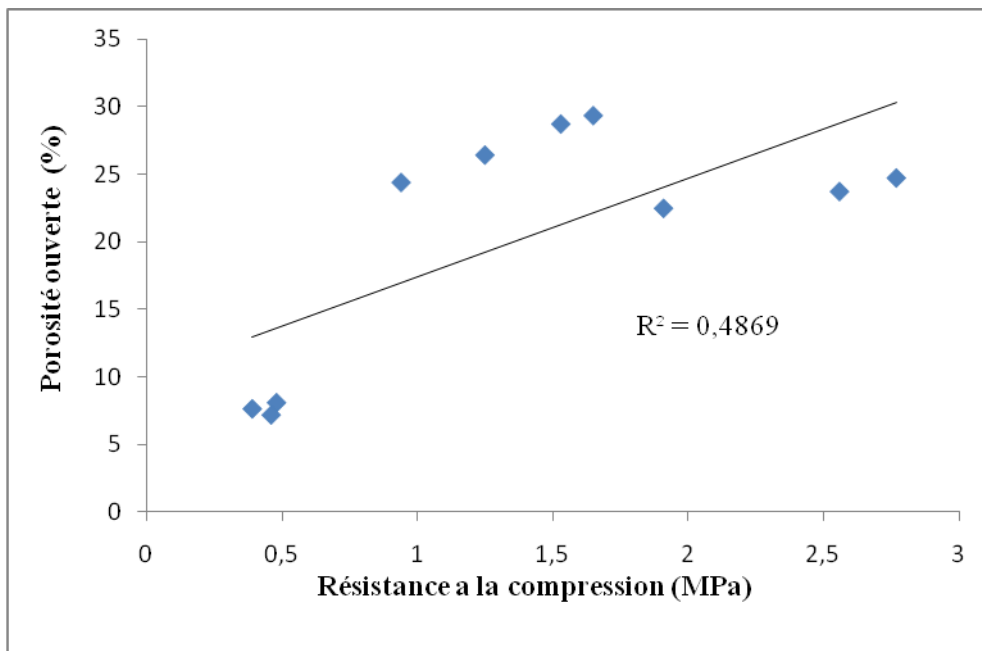


Fig. 95. La corrélation entre l'absorption de l'eau et la résistance à la compression des mortiers formulés.

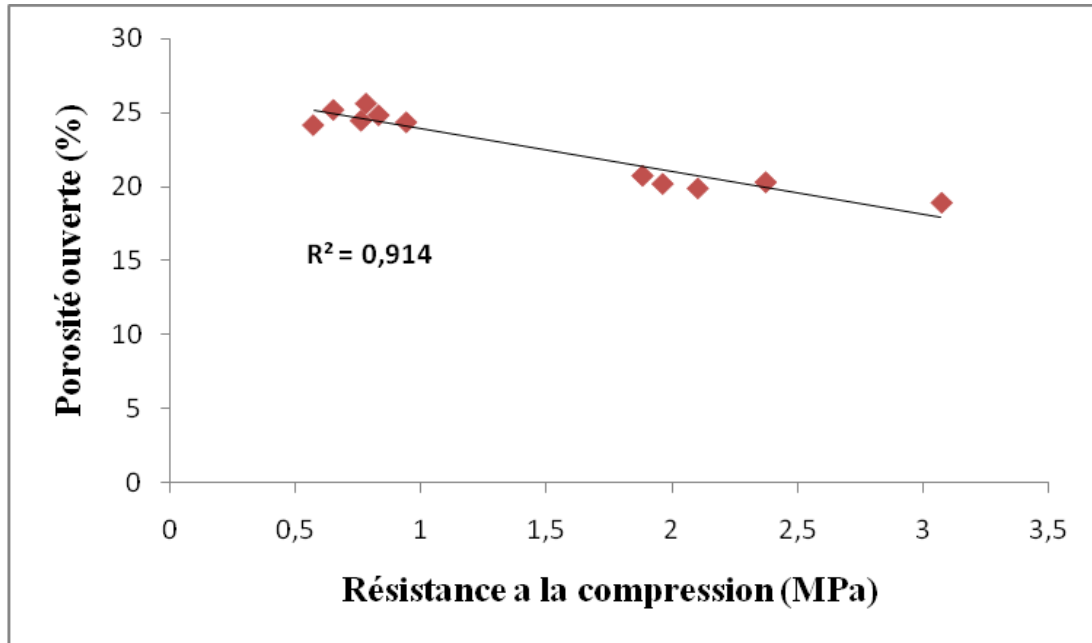


Fig.96. La corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression des mortiers formulés.

La droite de régression linéaire met en exergue une tendance à la baisse qui existe entre l'absorption d'eau et la résistance mécanique des mortiers. En effet, on peut remarquer une diminution de l'absorption d'eau accompagnée d'une augmentation de la résistance à la compression.

La valeur minimale d'absorption de l'eau correspond à la valeur maximale de la résistance à la compression ce qui montre la relation de dépendance entre ces deux propriétés. La même évolution est observée pour la relation entre la porosité des échantillons et la résistance mécanique à la compression.

5. 3. La troisième variante de mortier (Ajout de la pouzzolane et brique pilée).

Pour connaître l'effet des ajouts pouzzolaniques sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers, nous avons procédé à l'ajout de la pouzzolane finement broyée et de la brique pilée à la chaux.

Les mortiers réalisés sont illustrées dans l'organigramme de la figure Fig.97.

Fig.97.Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation de la **troisième variante** de mortier (Ajout de la pouzzolane et la brique pilée).

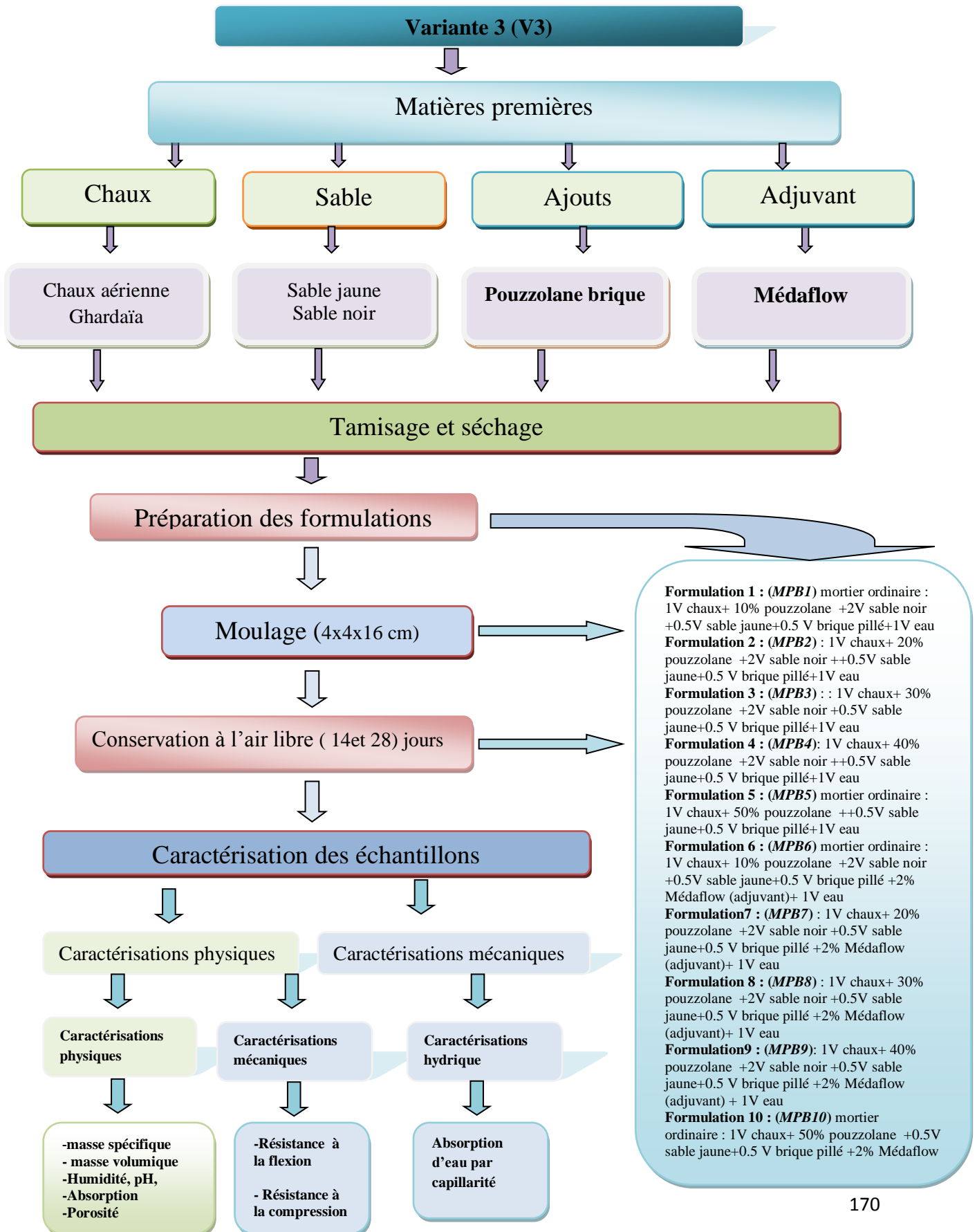


Tableau 37. Composition de la troisième variante des mortiers (chaux+ pouzzolane+ brique pille).

Nom de formulation	Formulation	Chaux (g)	Pouzzolane (g)	Brique (g)	Sable noir (g)	Sable jaune (g)	Eau (ml)	Adjuvant (% de masse de chaux)
<i>MO</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+Eau	450	0	343	857	428	570	0
<i>MPB1</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	395	55	343	857	428	590	0
<i>MPB2</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 20% pouzzolane+Eau	340	110	343	857	428	610	0
<i>MPB3</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 30% pouzzolane+Eau	285	165	343	857	428	630	0
<i>MPB4</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 40% pouzzolane+Eau	230	220	343	857	428	650	0
<i>MPB5</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 50% pouzzolane+Eau	175	275	343	857	428	670	0
<i>MPB6</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	395	55	343	857	428	480	2
<i>MPB7</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	340	110	343	857	428	490	2
<i>MPB8</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	285	165	343	857	428	500	2
<i>MPB9</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	230	220	343	857	428	510	2
<i>MPB10</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% pouzzolane+Eau	175	275	343	857	428	520	2

Les masses des constituants présentés dans le tableau ci-dessus sont données en volume. Les masses nécessaire de chaque constituant dans la formulation des mortiers seront déterminées en fonction de la masse volumiques de constituant lui-même pour arriver à la quantité plus exacte de chaque composant dans chaque formulation, Le calcul sera fait avec la formule suivante :

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

5. 3.1. Caractérisation des échantillons de mortiers.

Cette partie est consacrée aux essais physiques réalisés sur les mortiers étudiés à l'état durci. Toutes les procédures d'essais ont été exposées en détails dans la partie précédente.

5. 3.1.1. Caractérisation physique.

La caractérisation physique a été faite à la base de différents essais qui consistent en le calcul des masses volumiques spécifiques et apparentes, de l'absorption d'eau, de la porosité ouverte, de l'humidité, et de potentiel d'hydrogène .L'ensemble de ces essais ont été menés conformément aux méthodes et normes en vigueur.

Les valeurs moyennes des propriétés physiques après 28 jours de durcissement sont rapportées dans le tableau.38.

Tableau 38. Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers formulés

Echantillons formulés	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Porosité ouverte Po (%)	Absorption d'eau Ab (%)	Humidité H (%)	Potentiel D'Hydrogène pH
MO	2,05	1,77	24,38	13,76	1,12	11,33
MBP1	1,47	1,65	27,97	16,85	0,89	10,91
MBP2	2,23	1,67	27,43	16,37	0,86	10,05
MBP3	1,86	1,71	25,85	16,01	0,94	10,42
MBP4	1,91	1,71	27,61	16,10	0,89	11,64
MBP5	2,5	1,73	27,34	15,75	0,88	11,40
MBP6	2,68	1,75	25,41	14,48	1,08	10,85
MBP7	2,00	1,80	24,39	13,54	0,95	11,01
MBP8	2,28	1,73	23,66	13,15	0,88	10,48
MBP9	2,73	1,80	23,86	13,21	0,98	10,99
MBP10	2,85	1,82	23,50	12,8	1,07	11,22

La Fig. 98. Illustre l'effet du taux de substitution de la pouzzolane et la brique pillée sur la masse volumique absolue des mortiers formulés.

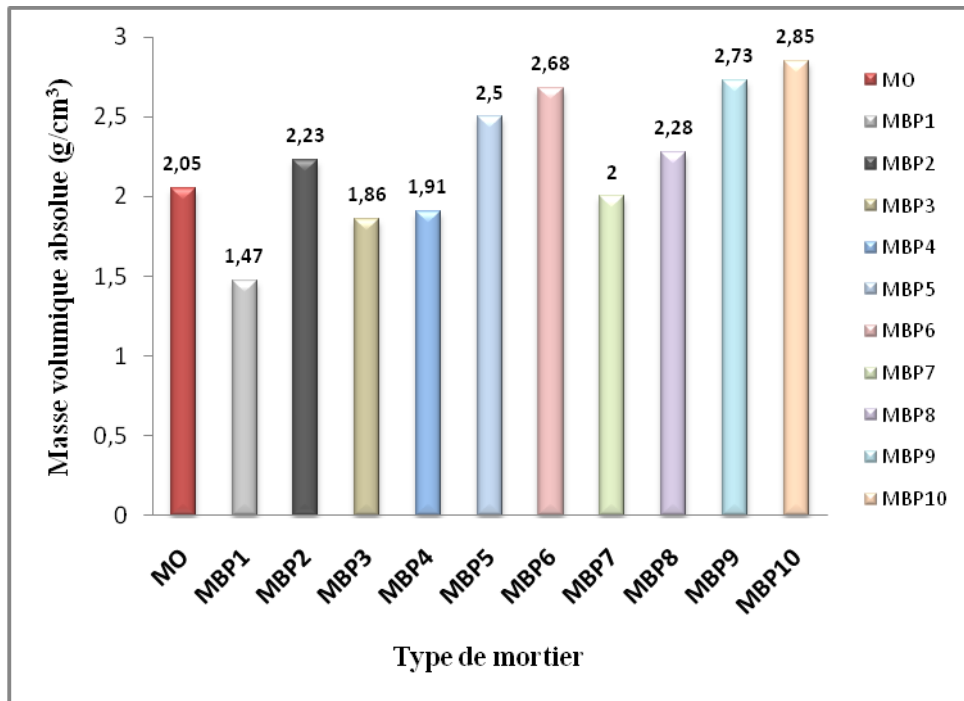


Fig. 98. Les masses volumiques absolues des mortiers formulés.

On constate d’après la Fig. 98. Et le tableau. 30. Que la substitution de la chaux aérienne par la pouzzolane et la brique pillée mise en œuvre à une influence sur les masses volumiques absolues des mortiers étudiés.

Les résultats montrent que l’échantillon témoin qui ne contient aucun ajout et dont la composition est le sable et la chaux à une valeur de masse volumiques absolue de 2,05 (g/cm³). Les mortiers non adjuvés (*MBP1, MBP2, MBP3, MBP4 et MBP5*) présentent des valeurs des masses volumiques absolues proches à l’échantillon témoin (1,47, 2,23, 1,86, 1,91 et 2,50 (g/cm³)).

On peut noter que l’ajout de l’adjuvant médaflow 30 aux mortiers (*MBP6, MBP7, MBP8, MBP9 et MBP10*) est également manifeste, et qui à induit une augmentation des masses volumiques absolues respectivement (2,68, 2,00, 2, 28, 2,73 et 2,85 (g/cm³)).

La Fig.99. Illustre l’effet du taux de substitution de la pouzzolane et la brique pillée sur les masses volumiques apparentes des mortiers d’étude

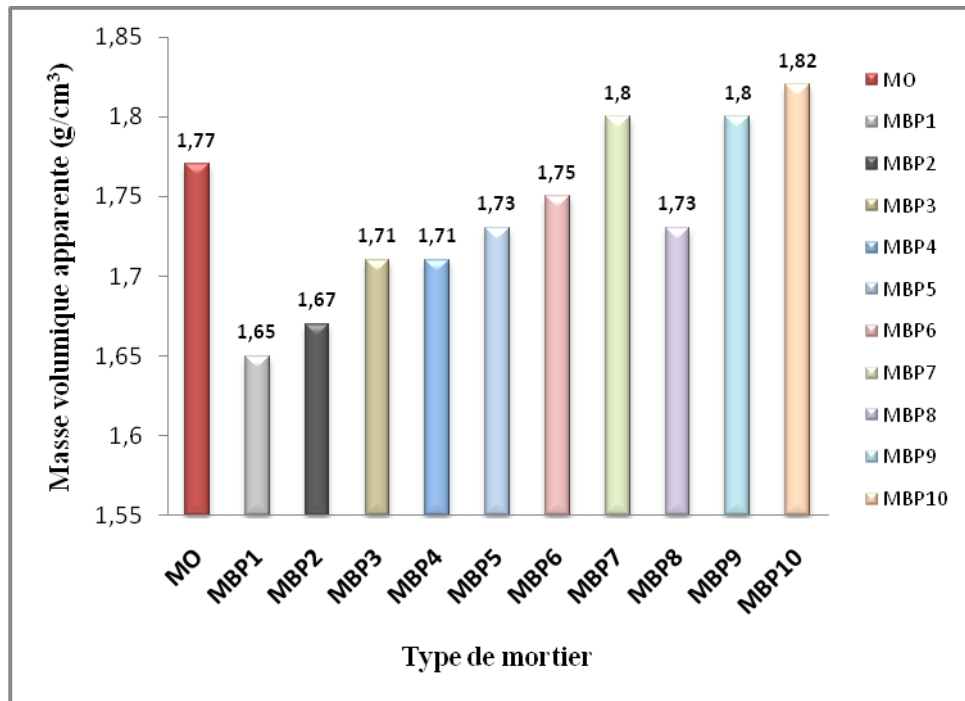


Fig.99. La masse volumique apparente des mortiers formulés.

Les résultats font ressortir comme la montre la Fig.99. Et le tableau .30, que la substitution de la chaux aérienne par la pouzzolane et la brique pillée, influence aussi les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.

Les résultats montrent que l'échantillon témoin (MO) à une valeur de masse volumique apparente de 1,77 (g/cm³), valeur proche à celles des échantillons de mortier avec substitution de la chaux par la pouzzolane et la brique pillée mais en œuvre mais sans ajout de l'adjuvant.

On peut noter que l'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MBP6, MBP7, MBP8, MBP9 et MBP10) à induit une augmentation des masses volumiques apparentes par rapport au mortier témoin et aux mortiers non adjuvés.

La Fig. 100. Illustre les valeurs des humidités des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux à la pouzzolane et la brique pillée à différents volumes.

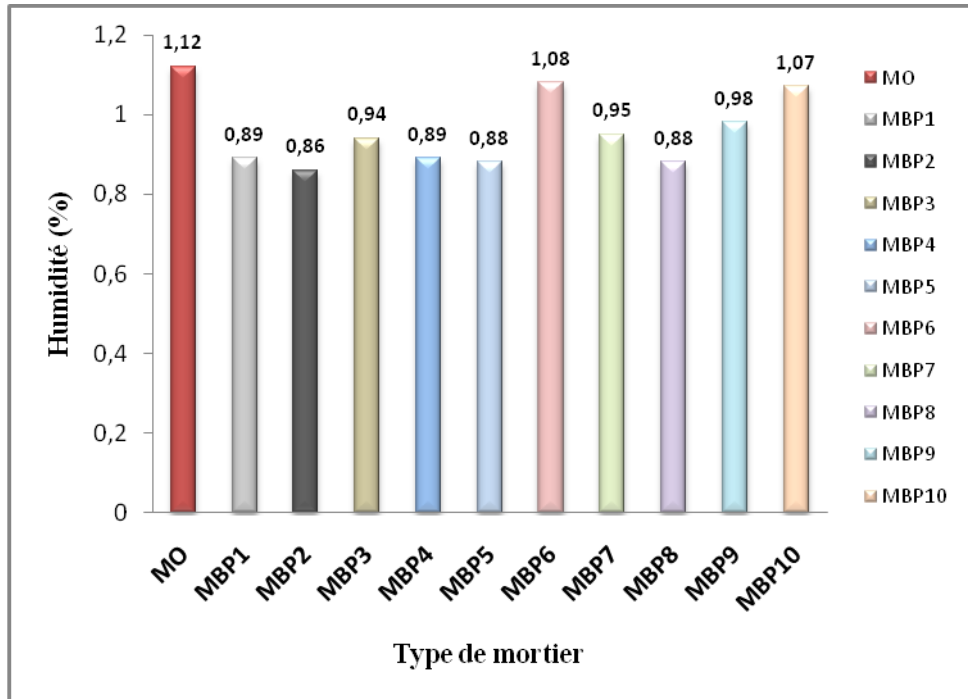


Fig.100. L'humidité des mortiers formulés.

Les résultats reportés dans le tableau.30, montrent bien que les valeurs des humidités pour tous les mortiers varient entre (0,86 et 1,08 %). Cela est par le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés, quelque soit le volume de la pouzzolane et la brique substitués et le type d'ajouts ajouté.

La Fig. 101. Illustre les valeurs des pH des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par la pouzzolane et la brique à différents volumes.

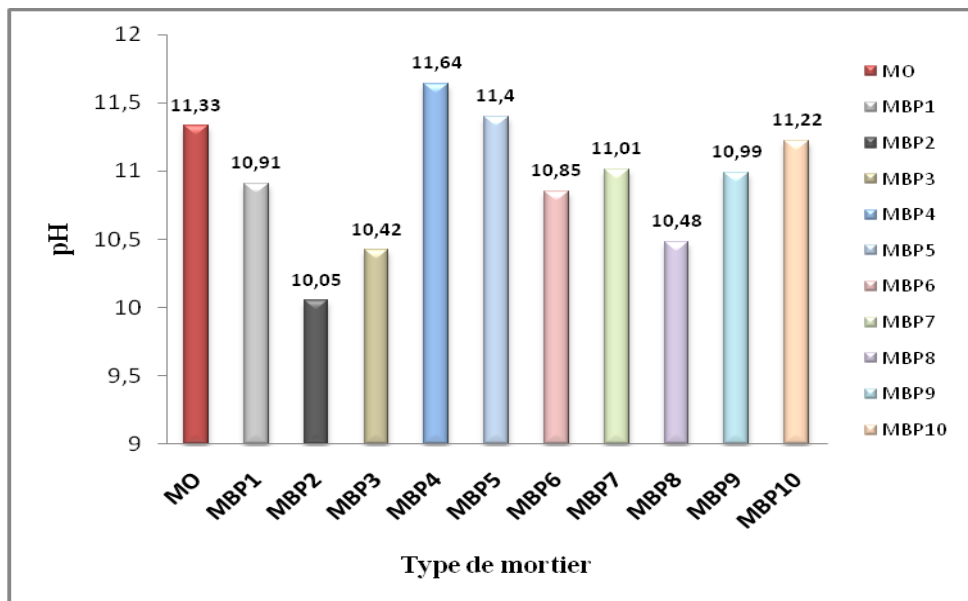


Fig.101. Le pH des mortiers formulés.

Les résultats reportés dans le tableau.30, montrent bien que les valeurs des pH pour tous les mortiers varient entre (10,05 et 11,64), cela explique le caractère basique des mortiers élaborés.

La Fig.102. Illustre les valeurs des porosités ouvertes des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par la pouzzolane et la brique à différents volumes.

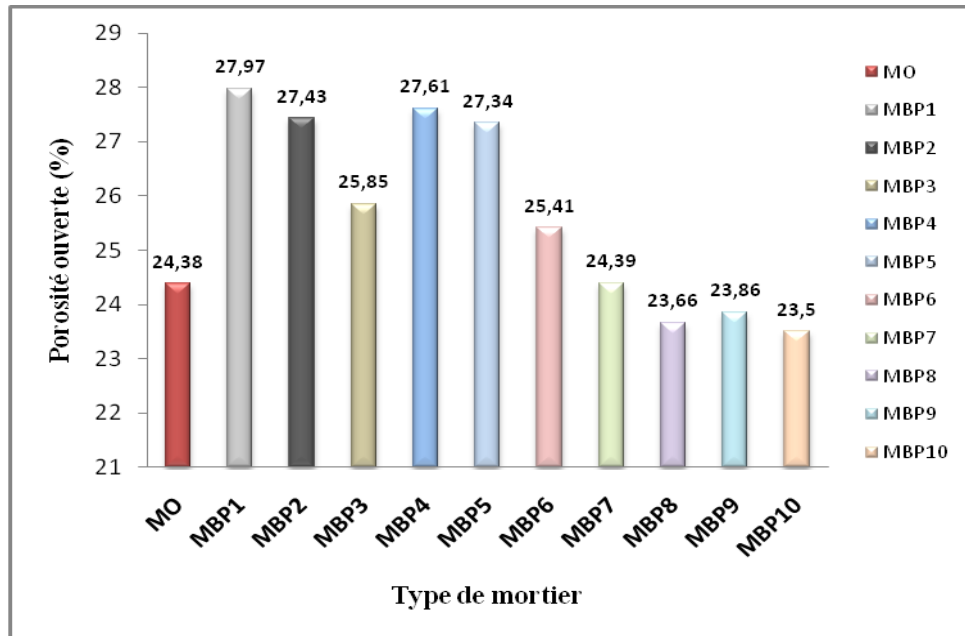


Fig.102. La porosité ouverte Po des mortiers formulés.

Le test de porosité, réalisé sur des éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce quelque soit le volume de la pouzzolane et la brique substitué et le type d'ajouts ajouté.

Les résultats reportés dans le tableau.30, montrent que d'échantillon (MBP1) mortier avec substitution de 10 % de la chaux par la pouzzolane avec de la brique et sans adjuvant est le plus poreux avec une valeur maximale de porosité ouverte estimée à 27,97 %.

On peut noter que l'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MBP6, MBP7, MBP8, MBP9 et MBP10) à induit une diminution des valeurs de la porosité avec des valeurs respectives de (25,41, 24,39, 23,66, 23,86 et 23,5 %). Cela montre bien que le super plastifiant était à peine adsorbé sur les particules de chaux et les cristaux de C-S-H, ce qui conduit à la présence de molécules libres de super plastifiant dans la dispersion. Cela réduit

également la quantité d'eau ajoutée lors de malaxage (tableau.29), et améliore la structure interne et par conséquent, la diminution des pores.

La Fig. 103. Illustre les valeurs de l'absorption des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux à la pouzzolane et la brique à différents volumes.

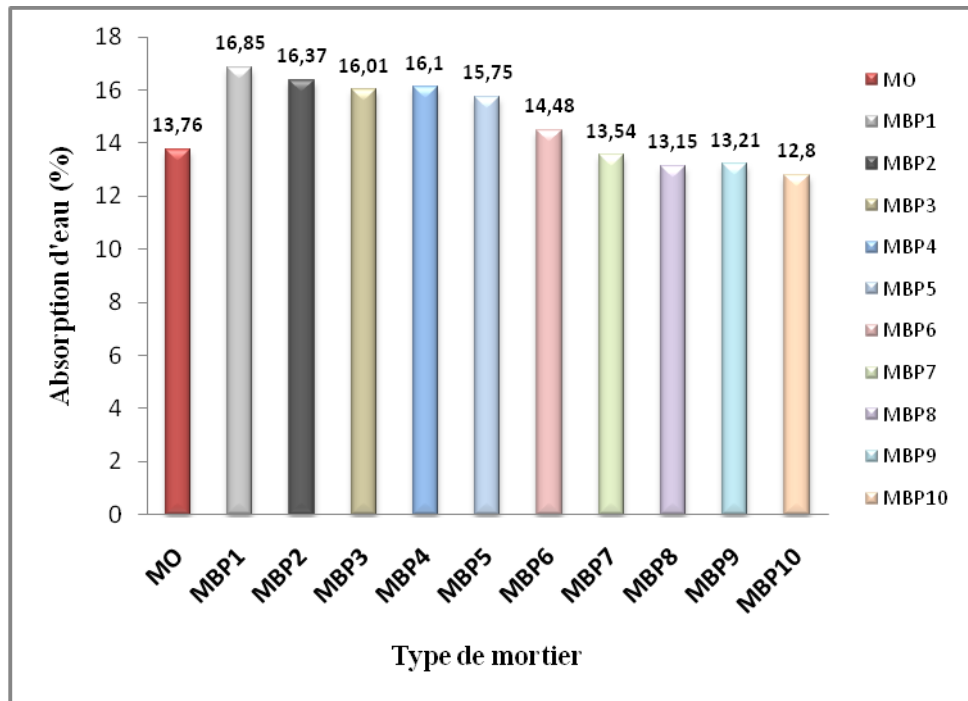


Fig.103. L'absorption des mortiers formulés.

Toujours selon le tableau.30. On trouve que l'évolution de l'absorption suit le même comportement de la porosité ouverte. Les résultats montrent que l'échantillon (MBP1) mortier avec substitution de 10 % de la chaux par la pouzzolane et la brique sans adjuvant présente une valeur d'absorption maximale estimée à 16,85 %. On peut observer également que le l'échantillon (MBP10) mortier avec substitution de 50 % de la chaux par la pouzzolane et la brique avec adjuvant, enregistre la plus petite valeur de l'absorption elle est égale (12,8 %).

5. 3.1.2. Caractérisation mécanique.

5. 3.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.

Les résultats de la résistance à la flexion, ont été calculés par la moyenne de trois échantillons de chaque type de mortier testé. L'évolution des valeurs de la résistance à 14 et à 28 jours de durcissement est montrée dans le tableau.39. Et illustrée dans la Fig. 104.

Tableau 39. Les résistances mécaniques des mortiers de mortier formulés.

Résistances mécaniques	Echantillon de mortier	âges	
		14 jours	28 jours
Résistance à la flexion 3 points (MPa)	MO	0,12	0,37
	MBP1	0,13	0,4
	MBP2	0,12	0,33
	MBP3	0,09	0,29
	MBP4	0,14	0,37
	MBP5	0,12	0,29
	MBP6	0,26	0,77
	MBP7	0,33	0,96
	MBP8	0,28	0,81
	MBP9	0,27	0,77
	MBP10	0,30	0,82

La Fig.104. Illustre les valeurs de la résistance mécanique à la flexion des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par la pouzzolane et la brique à différents volumes.

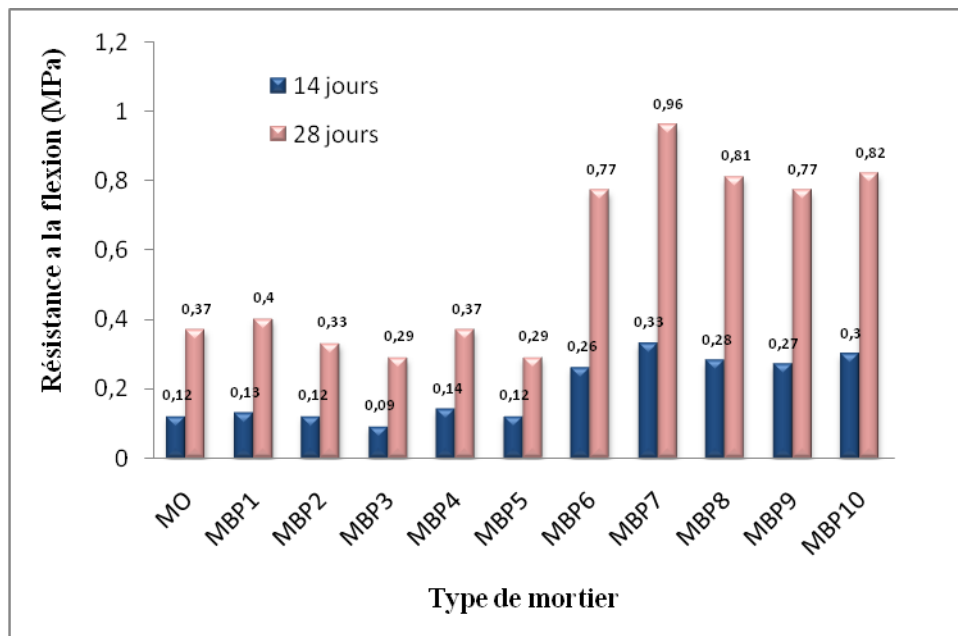


Fig.104. La résistance à la flexion des mortiers formulés.

Tous les mortiers ont présenté une maniabilité proportionnée. La quantité d'eau utilisée pour chaque mortier est présentée dans le tableau .20, En outre, du tableau.20, on voit bien que l'ajout de l'adjuvant Médaflow 30 a provoqué une diminution considérable d'eau, par conséquent, une diminution du rapport eau/liant. Cela était nécessaire pour réaliser des augmentations comparables des résistances.

D'après la Fig.104. À 14 jours, les résultats de la résistance à la flexion des mortiers sans ajout varient de (0,09 à 0,14 MPa). Alors que le mortier témoin (MO) à une résistance à la flexion égale a 0,12 MPa. La résistance à la flexion des mortiers avec ajout de la pouzzolane la brique et le Médaflow 30 varient de (0,26 à 0,33 MPa).

Toujours d'après la Fig.104, À 28 jours, on observe une tendance d'augmentation des valeurs de la résistance à la flexion comparé à ceux à 14 jours. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée est de 0,96 MPa, qui correspond au mortier (MBP7) mortier avec la substitution de 20 % de la chaux par la pouzzolane avec adjuvant. Cela est du a la Portlandite non réagi qui a continue à se carbonater et augmenter la résistance à la flexion des mortiers.

5.3.1.2.2. Résistance mécanique à la compression

Après les essais de flexion, des essais de compressions sont réalisés sur les demi-prismes. La Fig.105. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours, chaque valeur est la moyenne de 02 valeurs de compression.

Le tableau 40. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours.

Tableau 40. Les résistances mécaniques à la compression des mortiers formulés.

Resistances mécaniques	Echantillon de mortier	âges	
		14 jours	28jours
Résistance à la Compression (MPa)	MO	0,31	0,94
	MBP1	0,23	0,69
	MBP2	0,24	0,71
	MBP3	0,27	0,81
	MBP4	0,32	0,96
	MBP5	0,24	0,73
	MBP6	0,77	2,31
	MBP7	1,03	3,08
	MBP8	0,93	2,80
	MBP9	0,67	2,02
	MBP10	0,82	2,45

Les valeurs de la résistance à la compression des mortiers sont rapportées sur la Fig. 105. D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la résistance à la compression des mortiers suit le comportement de la résistance à la flexion

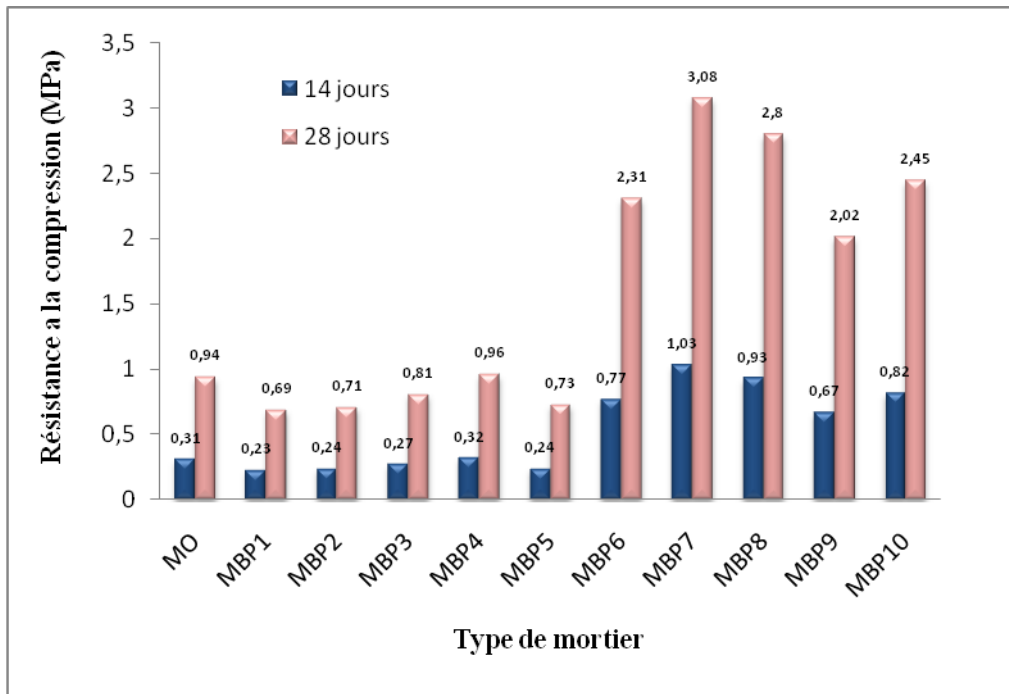


Fig.105. La résistance a la compression des mortiers formulés.

À 28 jours, les résultats de la résistance à la compression changent dans une plus grande dimension comparée aux valeurs de la résistance à la flexion et avec des valeurs qui varient de (0,71 à 3,08 MPa).

Les meilleures valeurs sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée de la résistance à la compression est de 3,08 MPa, qui correspond au mortier (MBP7). Mortier avec substitution de 20 % de la chaux par la pouzzolane et la brique pillée avec adjuvant. Par ailleurs, les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de pouzzolane et sans adjuvant. Qui varient entre (0,57 à 0,83 MPa).

A priori, on peut distinguer que les valeurs des résistances à la flexion sont inférieures à celles enregistrées à la compression. Les valeurs des résistances à l'âge de 14 jours sont triplées à 28 jours et cela pour l'ensemble des échantillons comme illustré dans les Fig.104 et Fig.105. Un coefficient de corrélation est bien distinct.

5. 3.1.3. Caractérisation hydrique

5. 3.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité

Les résultats des masses cumulées de l'eau absorbées (M) par les échantillons en fonction de temps des différents mortiers sont montrés dans la (Fig. 106).

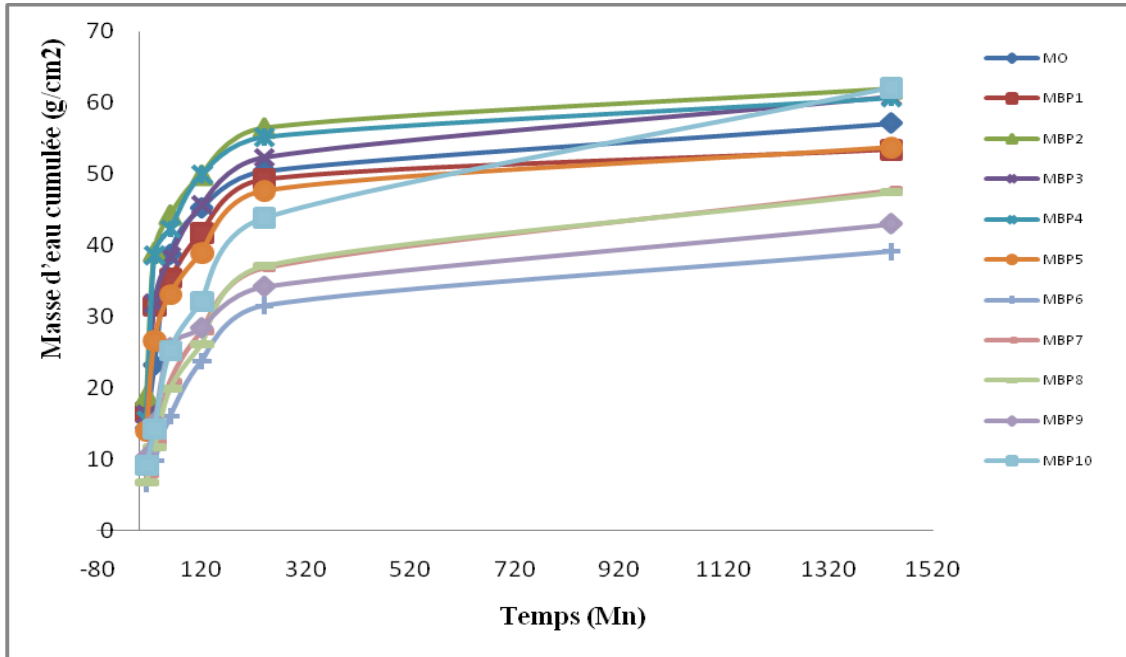


Fig.106. La masse d'eau cumulée des mortiers formulés.

Les mesures (masse cumulée des échantillons) ont été réalisées tout au long de 1440 minutes, soit 24 heures, entre des intervalles de temps bien précis (tableau 41).

Tableau 41. Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.

t (mn)	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.					
	15	30	60	120	240	1440
MO	14,4	23,2	38,7	45,2	50,4	57,1
MBP1	16,6	31,4	35,4	41,7	49,2	53,4
MBP2	18,8	39,0	44,2	49,8	56,4	61,9
MBP3	16,2	31,8	38,4	45,6	52,3	60,8
MBP4	15,5	38,6	42,3	49,9	55,2	60,7
MBP5	13,9	26,6	33,1	38,9	47,6	53,7
MBP6	6,5	9,8	16	23,7	31,5	39,1
MBP7	7,8	12,5	20,9	27,9	36,8	47,7
MBP8	6,7	11,6	19,9	26,1	37,1	47,4
MBP9	10,3	15,1	25,6	28,4	34,2	43
MBP10	9,1	14,2	25,2	32,1	43,8	62,1

On peut observer que la masse cumulée de l'eau absorbée évolue et augmente de façon quasi-constante jusqu'à $t = 240$ minutes (soit 4 heures) et ce, pour les différents échantillons de mortiers. Au-delà de ce temps, la masse d'eau absorbée par capillarité est nettement freinée, cela est due éventuellement à l'effet de la gravitation (cumul de la masse d'eau absorbée). La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier MBP6 estimée à $31,5 \text{ g/cm}^2$.

Afin de caractériser le coefficient d'absorption capillaire (i) pour toutes les compositions des mortiers étudiés, les valeurs expérimentales calculées sont regroupées dans le tableau 42. et présentées dans la Fig.107. Les résultats obtenus des coefficients (i) varient entre 2,44 et 3,88 g/cm^2 .

Tableau 42. Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers étudiés.

t (mn)	Coefficient d'absorption capillaire (i) (g/cm^2)					
	15	30	60	120	240	1440
MO	0,90	1,45	2,42	2,83	3,15	3,57
MP1	1,04	1,96	2,21	2,61	3,08	3,34
MP2	1,18	2,44	2,76	3,11	3,53	3,87
MP3	1,01	1,99	2,40	2,85	3,27	3,80
MP4	0,97	2,41	2,64	3,12	3,45	3,79
MP5	0,87	1,66	2,07	2,43	2,98	3,36
MP6	0,41	0,61	1,00	1,48	1,97	2,44
MP7	0,49	0,78	1,31	1,74	2,30	2,98
MP8	0,42	0,73	1,24	1,63	2,32	2,96
MP9	0,64	0,94	1,60	1,78	2,14	2,69
MP10	0,57	0,89	1,58	2,01	2,74	3,88

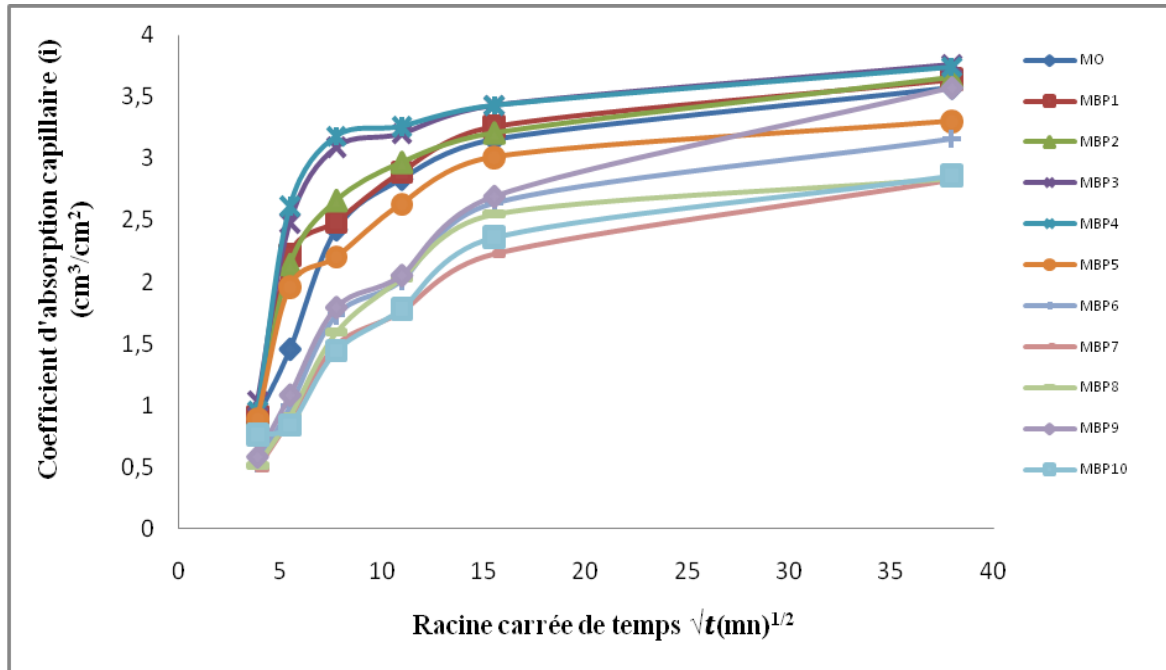


Fig.107. Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.

Les courbes de l'évolution des coefficients d'absorptions capillaires et les masses cumulées d'eau absorbées (Fig.106 et Fig.107) ont une tendance plus ou moins linéaire, ce qui démontre la structure homogène des mortiers préparés. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs.

Le mortier (MBP6) présente la plus basse valeur d'absorption par capillarité comparée aux autres mortiers. D'autre part, Les résultats des tests des coefficients (i) montrent aussi que plus la teneur en pouzzolane augmente dans les mortiers en particulier ceux adjuvantés, plus les valeurs des coefficients (i) s'éloignent de celle du mortier témoin, ils sont caractérisés par des valeurs d'absorption par capillarité moins importantes. Cette caractéristique permet de les classer dans la catégorie des mortiers adéquats pour des applications en milieux humides.

La relation entre l'absorption d'eau, la porosité ouverte (Po) et la résistance à la compression des différents échantillons est illustrée dans les Fig.108.et la Fig.109.

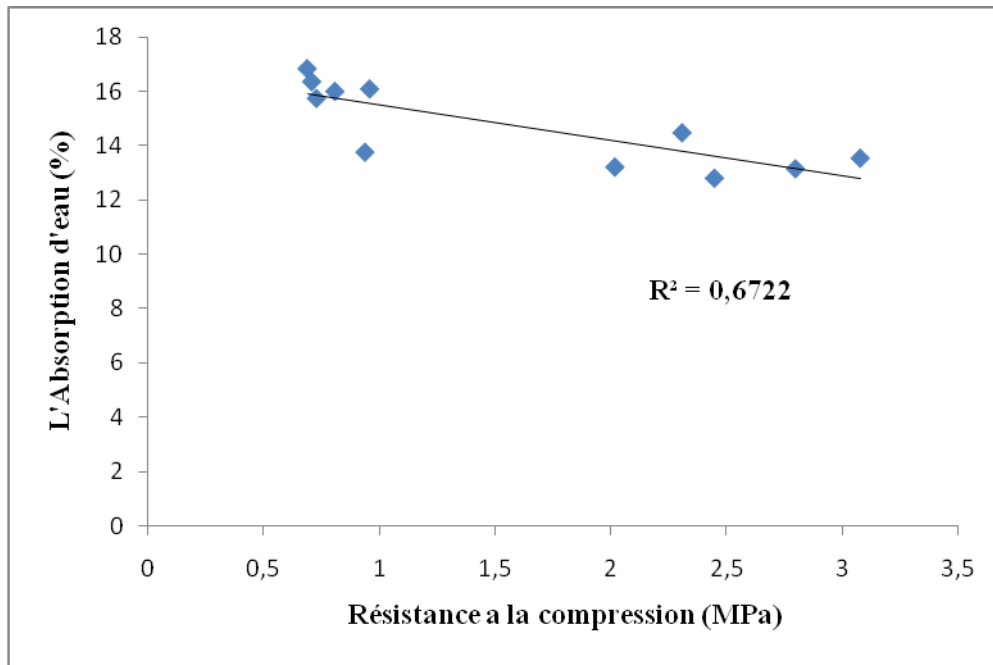


Fig.108. La corrélation entre l'absorption d'eau et la résistance à la compression des mortiers formulés.

La droite de régression linéaire met en exergue une tendance à la baisse qui existe entre l'absorption d'eau et la résistance mécaniques des mortiers. En effet, on peut remarquer une diminution de l'absorption d'eau accompagnée d'une augmentation de la résistance à la compression.

La valeur minimale d'absorption de l'eau correspond à la valeur maximale de la résistance à la compression ce qui montre la relation de dépendance entre ces deux propriétés. La même évolution est observée pour la relation entre la porosité des échantillons et la résistance mécanique à la compression.

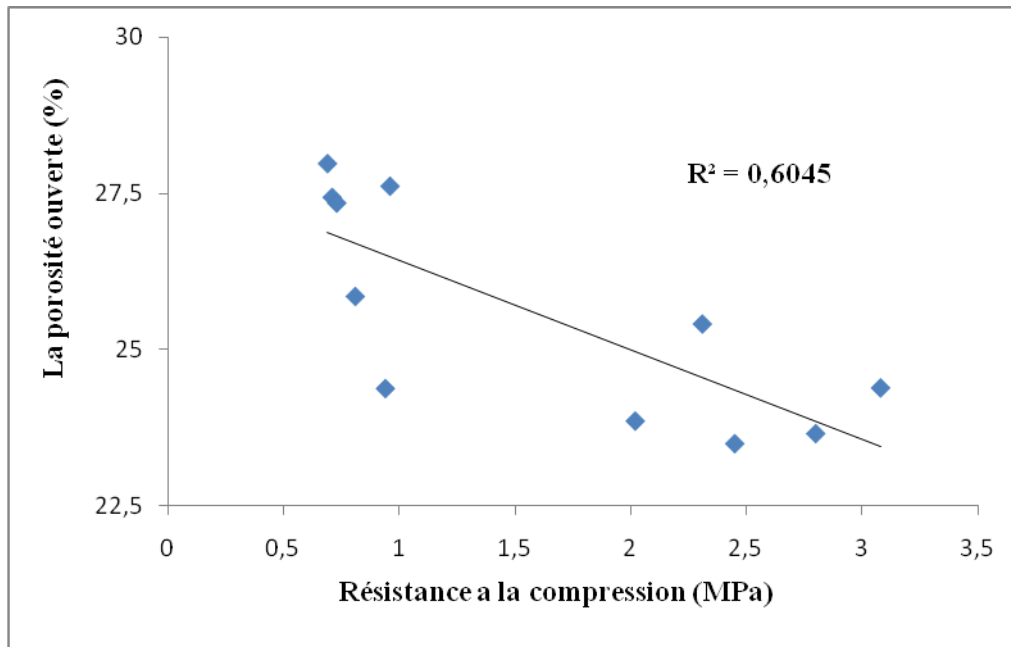


Fig.109. La corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression des mortiers formulés.

5. 4. La quatrième variante de mortier ((Ajout de métakaolin).

Dans la littérature, plusieurs exemples de matériaux avec des propriétés hydrauliques sont rapportés, obtenus par cuisson à des températures spécifiques du calcaire mélangé à des minéraux argileux (ajoutés délibérément ou non) ou en mélangeant de la chaux éteinte avec des substances capables de fournir des propriétés pouzzolanique au mortier, comme le métakaolin.

Les mortiers réalisés sont illustrées dans l'organigramme de la figure Fig.110.

Fig.110. Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation de la quatrième variante de mortier (Ajout de Métakaolin).

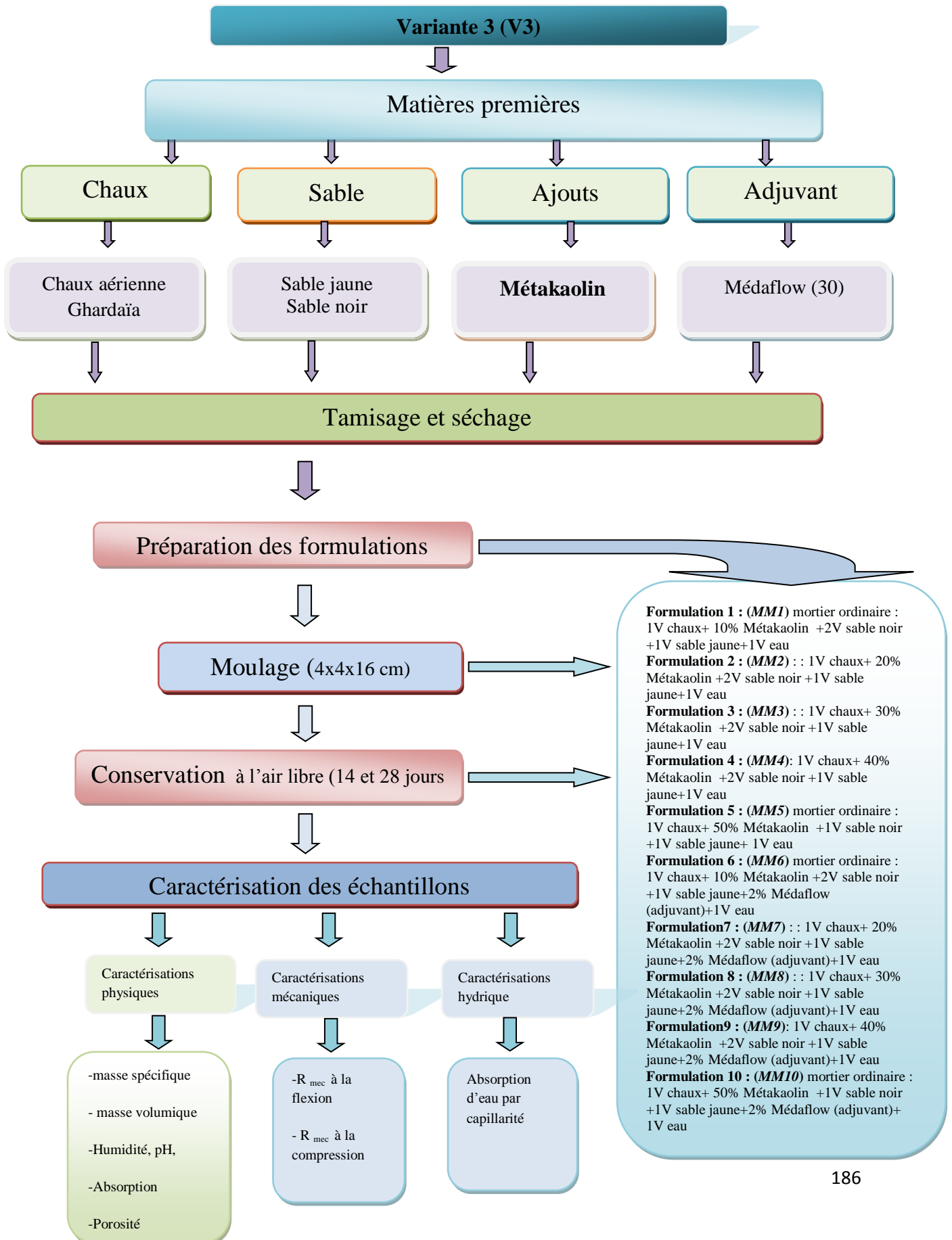


Tableau 43. Composition de la quatrième variante des mortiers (Ajout de Métakaolin).

Nom de formulation	Formulation	Chaux (g)	Métakaolin (g)	Sable noir (g)	Sable jaune (g)	Eau (ml)	Adjuvant (% de masse de chaux)
<i>MO</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+Eau	450	0	1285	428	570	0
<i>MM1</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% Métakaolin+Eau	387	63	1285	428	580	0
<i>MM2</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 20% Métakaolin + Eau	324	126	1285	428	590	0
<i>MM3</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 30% Métakaolin +Eau	261	189	1285	428	600	0
<i>MM4</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 40% Métakaolin +Eau	198	252	1285	428	610	0
<i>MM5</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 50% Métakaolin +Eau	135	315	1285	428	620	0
<i>MM6</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% Métakaolin + Adjuvant+Eau	387	63	1285	428	480	2
<i>MM7</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 20% Métakaolin + Adjuvant+Eau	324	126	1285	428	490	2
<i>MM8</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 30% Métakaolin + Adjuvant+Eau	261	189	1285	428	500	2
<i>MM9</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 40% Métakaolin + Adjuvant+Eau	198	252	1285	428	510	2
<i>MM10</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 50% Métakaolin + Adjuvant+Eau	135	315	1285	428	520	2

Les masses des constituants présentés dans le tableau ci-dessus sont données en volume.

Les masses nécessaire de chaque constituant dans la formulation des mortiers seront déterminées en fonction de la masse volumiques de constituant lui-même pour arriver à la quantité plus exacte de chaque composant dans chaque formulation, Le calcul sera fait avec la formule suivante :

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (\text{g /cm}^3)$$

5.4.1. Caractérisation des échantillons de mortiers.

5.4.1. 1. Caractérisation physique.

Cette partie est consacrée aux essais physiques réalisés sur les mortiers étudiés à l'état durci. Toutes les procédures d'essais ont été exposées en détails dans la partie précédente.

La caractérisation physique a été faite à la base de différents essais qui consistent en le calcul des masses volumiques spécifiques et apparentes, de l'absorption d'eau, de la porosité ouverte, de l'humidité, et de potentiel d'hydrogène .L'ensemble de ces essais ont été menés conformément aux méthodes et normes en vigueur.

Les valeurs moyennes des propriétés physiques après 28 jours de durcissement sont rapportées dans le tableau 44.

Tableau 44. Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers .

Echantillons formulés	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Porosité ouverte Po (%)	Absorption d'eau (%)	Humidité H (%)	Potentiel D'Hydrogène pH
MO	2,05	1,77	24,38	13,76	1,12	11,33
MM1	3,42	1,76	24,64	13,98	1,17	10,21
MM2	2,05	1,79	23,79	13,24	1,20	10,08
MM3	3,55	1,82	22,81	12,53	1,17	10,02
MM4	1,66	1,81	21,74	11,98	1,52	10,64
MM5	2,13	1,83	21,56	11,77	1,14	11,00
MM6	2,14	1,81	20,62	11,31	1,28	10,95
MM7	2,50	1,84	19,76	10,73	1,38	11,04
MM8	2,00	1,87	20,19	10,79	1,44	11,28
MM9	2,76	1,88	20,13	10,74	1,15	10,92
MM10	2,37	1,87	19,08	10,17	1,18	10,57

La figure (Fig.111). Illustre l'effet du taux de substitution de métakaolin sur la masse volumique absolue des mortiers formulés (Ms).

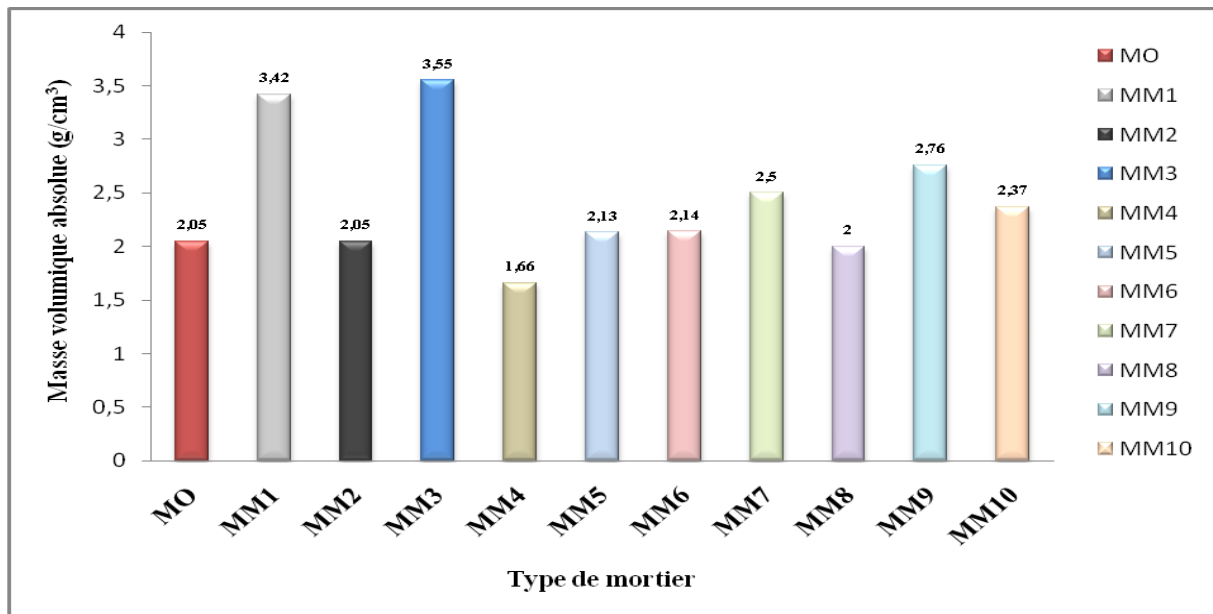


Fig.111. La masse volumique absolue des mortiers formulés.

Ces résultats font ressortir comme le montre la figure (Fig.112), et le tableau 36, que la substitution de la chaux aérienne par le métakaolin mise en œuvre, influence les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.

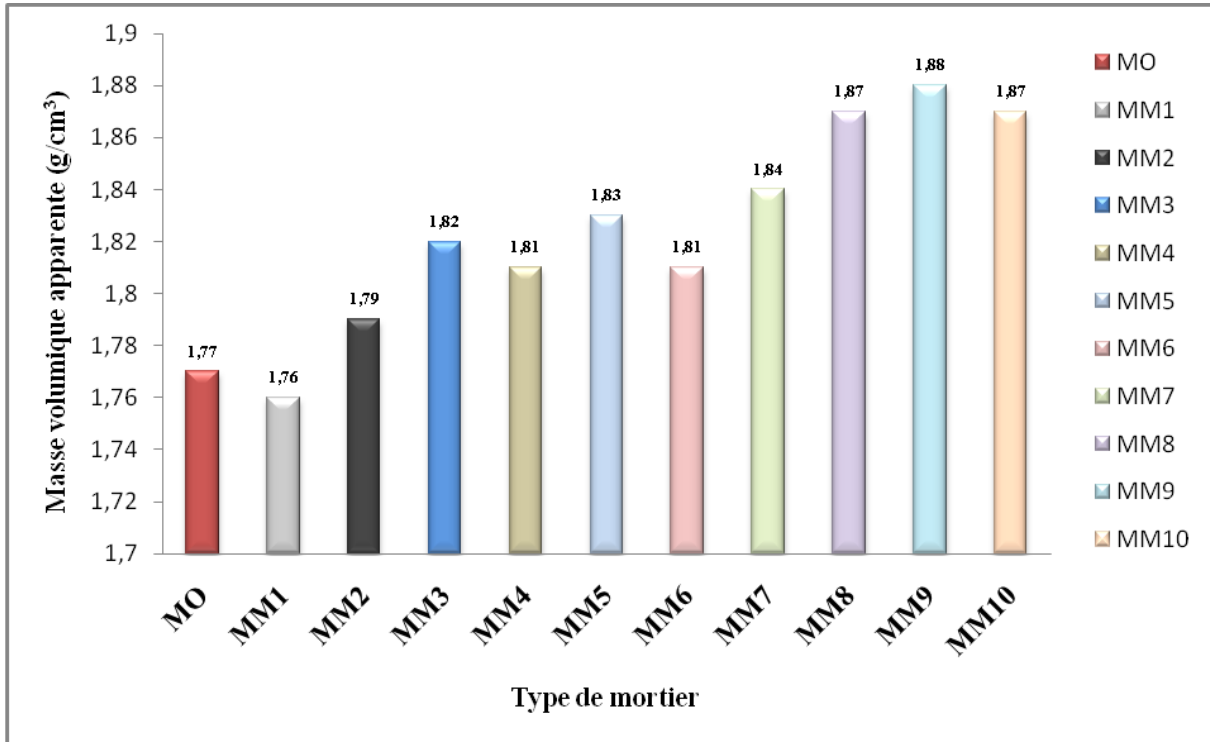


Fig.112. La masse volumique apparente des mortiers formulés.

Les résultats montrent que l'échantillon témoin qui ne contient aucun ajout et dont la composition est le sable et la chaux à une valeur de masse volumiques apparente de 1,77 (g/cm³), valeur proche à celles des échantillons de mortier avec substitution de la chaux par le métakaolin mais en œuvre mais sans ajout de l'adjuvant.

On peut noter que l'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MM5, MM6, MM7, MM8 MM9 et MM10) à induit une augmentation des masses volumiques apparentes par rapport au mortier témoin et aux mortiers non adjuvés.

La Fig. 113. Illustre les valeurs des humidités des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par le métakaolin à différents volumes.

Les résultats reportés dans le tableau.36, montrent bien que les valeurs des humidités pour tous les mortiers varient entre (1,14 et 1,52 %). Cela est par le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés, quelque soit le volume de métakaolin substitué et le type d'ajouts ajouté.

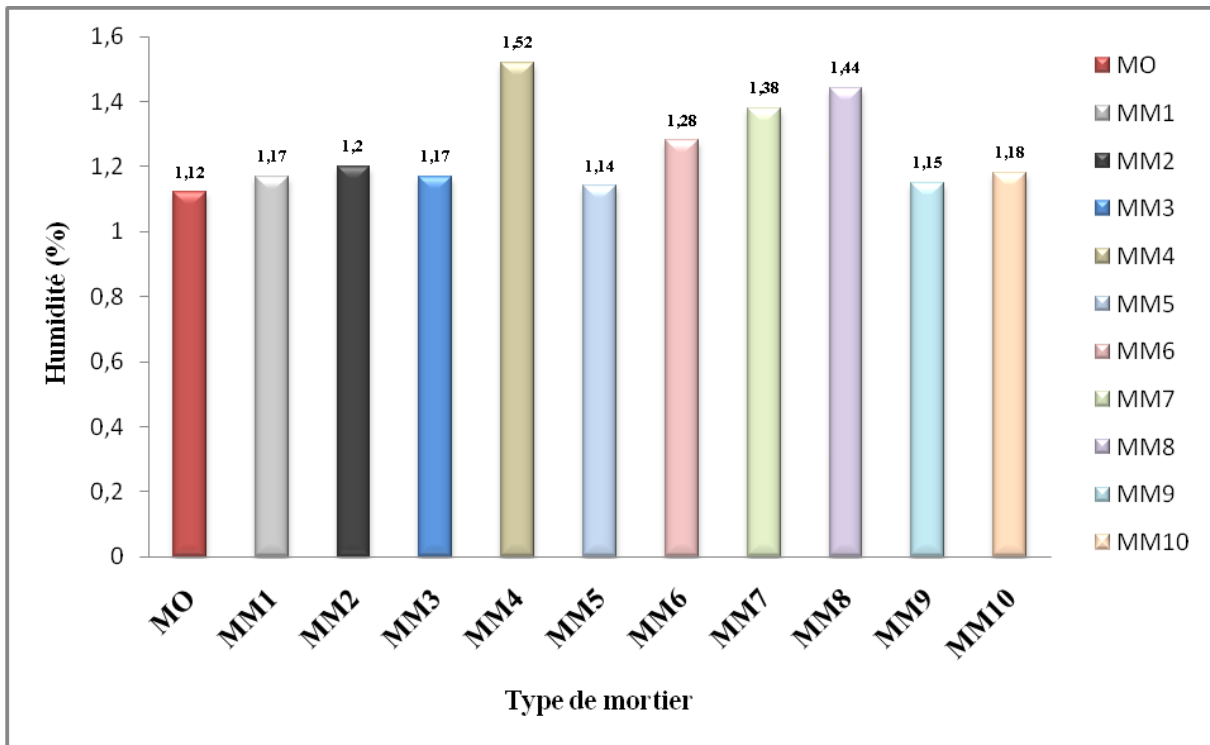


Fig.113. L'humidité des mortiers des mortiers formulés.

La Fig. 114. Illustre les valeurs des pH des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par le métakaolin à différents volumes.

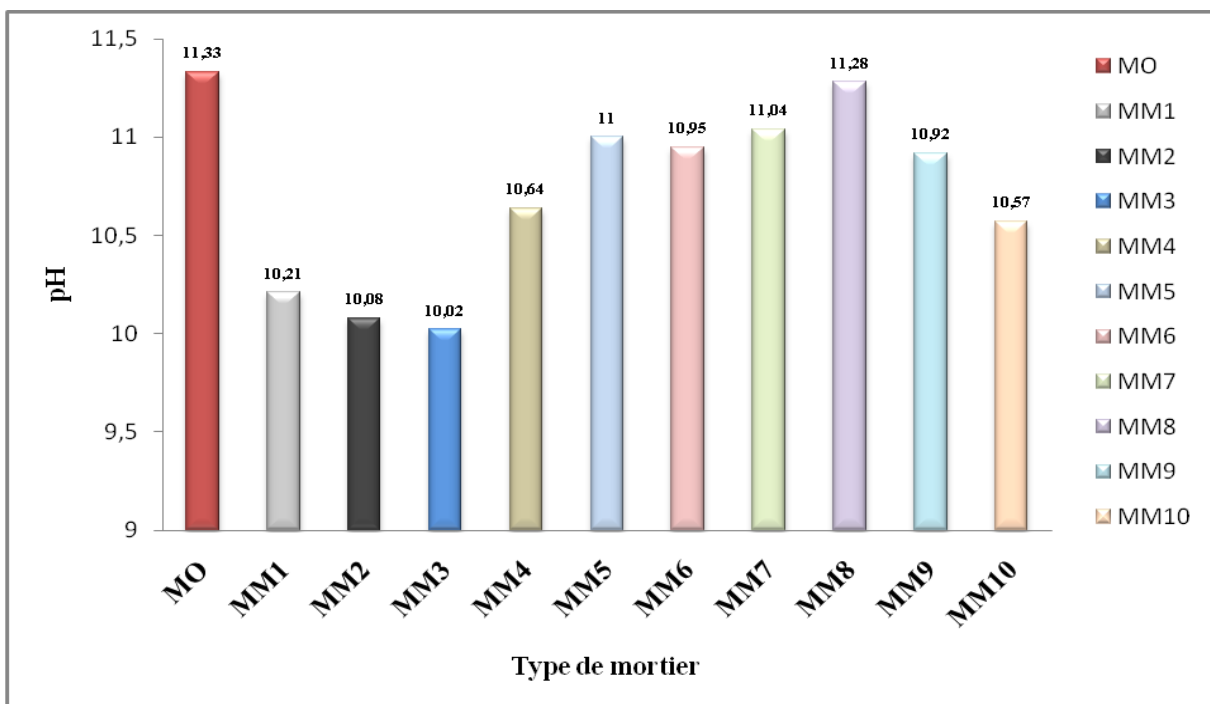


Fig.114. pH des mortiers formulés.

La Fig.115. Illustre les valeurs des porosités ouvertes des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par le métakaolin à différents volumes.

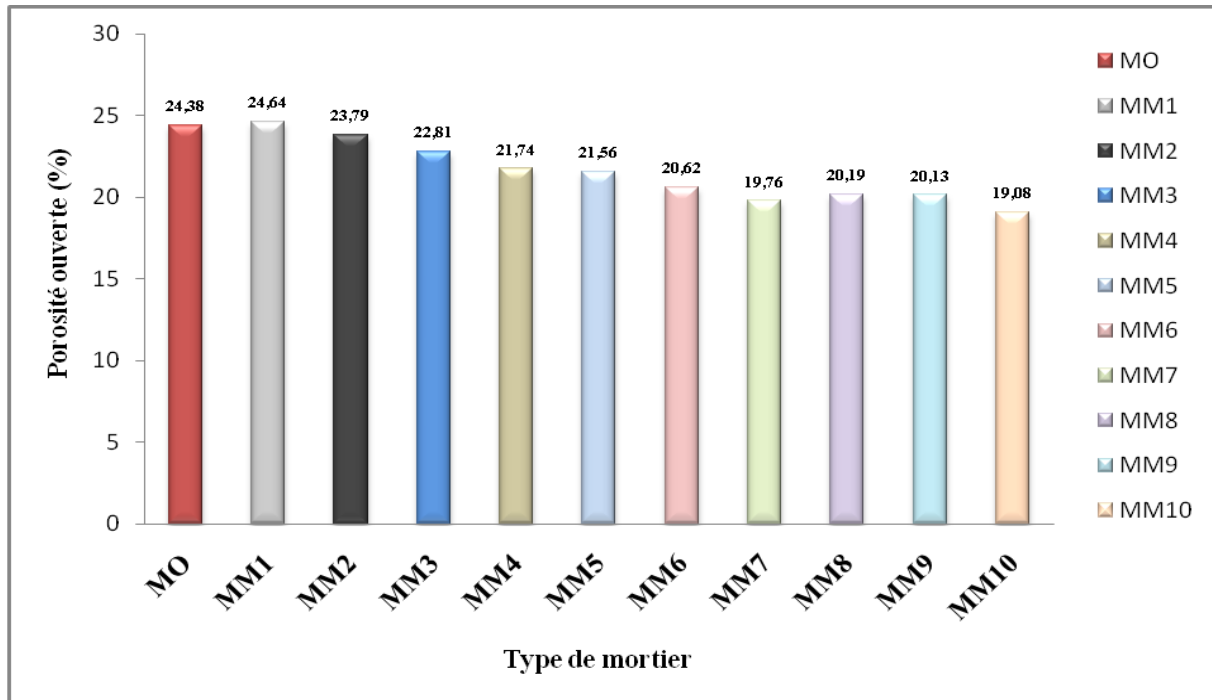


Fig.115. La porosité ouverte P_o des mortiers formulés.

Le test de porosité ouverte, réalisé sur des éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce quelque soit la teneur en métakaolin ajoutée. Il existe une relation de proportionnalité inverse entre la porosité et le taux de métakaolin ajouté. En effet, plus le taux du métakaolin augmente, la porosité des échantillons diminue, une évolution déjà constatée par d'autres travaux scientifiques (J. Lanas et al) (2004) ¹¹⁵, (V. Nezřerka et al) ¹¹⁶. En outre, il a été montré également que les mortiers contenant plus de métakaolin donnent davantage de produits d'hydratation. Ces derniers ont des pores de faibles diamètres, caractéristiques des C-S-H (hydrosilicate de calcium).

Les résultats obtenus ont révélé également que l'échantillon MM1 contenant 10 % de métakaolin sans adjuvant est le plus poreux avec une valeur maximale de porosité estimée à 24.64%. Cette valeur est très proche de celle enregistrée par le mortier témoin (MO), élaboré sans ajout (métakaolin) ni adjuvant.

146. J. Lanas, J.L.P. Bernal, M.A. Bello, J.I.A. Galindo, Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars, *Cem and Con Res.* 34(2004) 2191–2201.

147. V. Nezřerka, Z. Slížřková, P. Tesárek, T. Plachyř, D. Frankeová, V. Petránřová, Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust, *Cem and Con Res.* 64(2014) 17–29.

De plus, tous les échantillons qui contiennent du métakaolin dosé avec superplastifiant présentent des valeurs de porosité ouverte moins importantes qui varient respectivement entre 19.08 % et 21.56 %, (Fig.115). En outre, on peut observer également que le mortier MM10 dosé avec 50 % du métakaolin et 2% de superplastifiant possède la plus faible valeur de porosité ouverte qui est égale à 19,08 %.

La Fig. 126. Illustre les valeurs de l'absorption des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux au métakaolin à différents volumes.

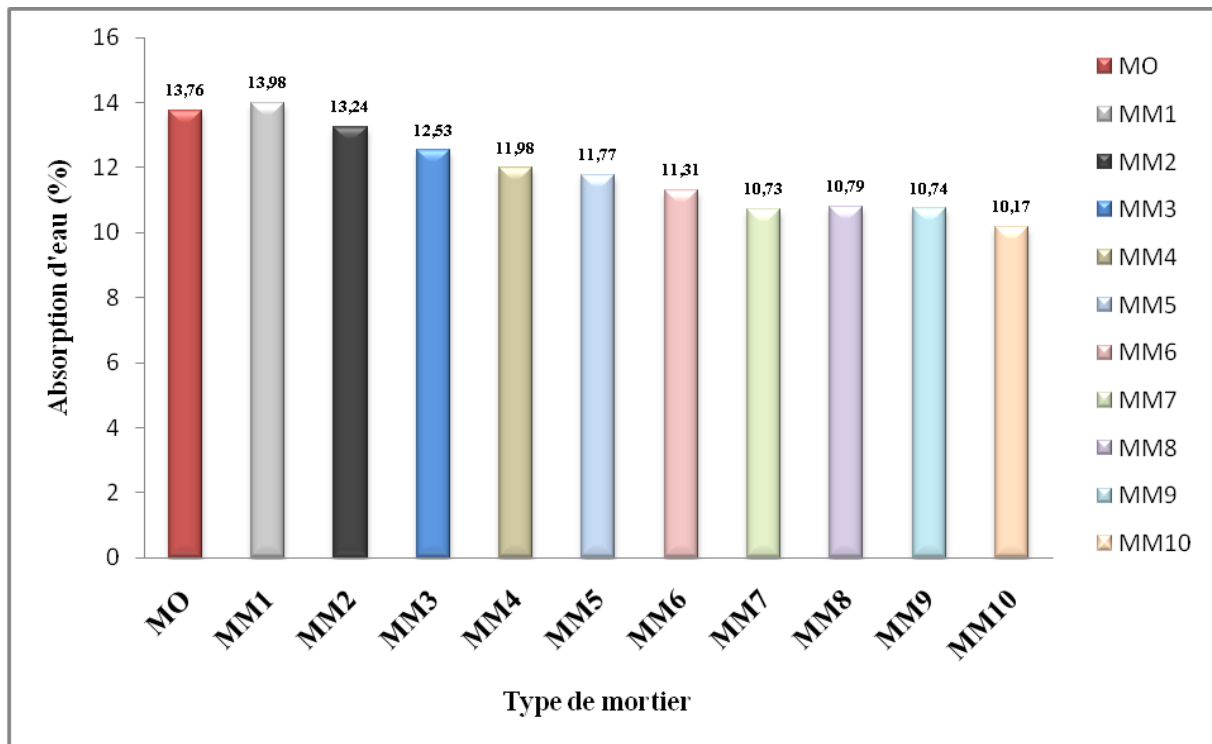


Fig.116. L'absorption d'eau des mortiers formulés.

Toujours selon le tableau 36, on trouve que l'évolution de l'absorption suit le même comportement de la porosité ouverte. Les résultats montrent que l'échantillon MM1 contenant 10% de métakaolin sans adjuvant présente une valeur d'absorption maximale estimée à 13,98 %.

On peut observer également que le mortier MM10 dosé avec 50 % du métakaolin et 2 % de superplastifiant possède la plus petite valeur d'absorption qui est égale à 10,17 % (Fig.116).

5.4.1. 2.Caractérisation mécanique.

5.4.1. 2.1. Résistance mécanique à la flexion.

Les résultats de la résistance à la flexion, ont été calculés par la moyenne de trois échantillons de chaque type de mortier testé. L'évolution des valeurs de la résistance à la flexion à des échéances de mortier à 14 et à 28 jours de durcissement est montrée dans le tableau.45. Et illustrée dans la Fig. 117.

Tableau 45. Evolution des résistances mécaniques à la flexion des mortiers .

Resistances mécaniques	Echantillon de mortier	âges	
		14 jours	28jours
Résistance à la flexion 3 points (MPa)	MO	0,12	0,37
	MM1	0,08	0,23
	MM2	0,07	0,21
	MM3	0,06	0,19
	MM4	0,07	0,21
	MM5	0,08	0,23
	MM6	0,16	0,48
	MM7	0,14	0,41
	MM8	0,15	0,46
	MM9	0,13	0,39
	MM10	0,14	0,41

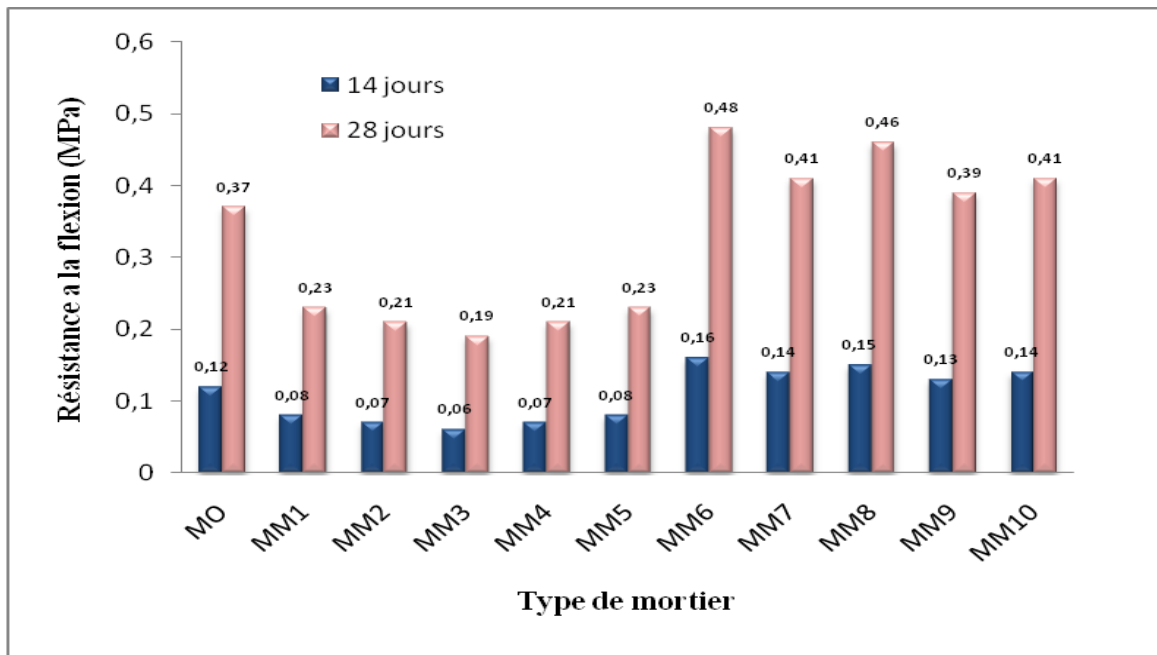


Fig.117. La résistance a la flexion des mortiers formulés.

Tous les mortiers ont présenté une maniabilité proportionnée. La quantité d'eau utiliser pour chaque mortier est présentés dans le tableau 35. En outre, du tableau.35, on voie bien que l'ajout de l'adjuvant Médaflow 30 à provoqué une diminution considérable d'eau, par conséquent, une diminution du rapport eau/liant. Cela était nécessaire pour réaliser des augmentations comparables des résistances.

D'après la Fig.117. À 14 jours, les résultats de la résistance à la flexion des mortiers sans ajout varient de (0,06 à 0,08 MPa). Alors que le mortier témoin (MO) à une résistance à la flexion égale a 0,12 MPa. La résistance à la flexion des mortiers avec ajout de métakaolin et le Médaflow 30 varient de (0,13 à 0,16 MPa).

Toujours d'après la Fig.117, À 28 jours, on observe une tendance d'augmentation des valeurs de la résistance à la flexion comparé à ceux à 14 jours. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée est de 0,48 MPa, qui correspond au mortier (MM6) mortier avec la substitution de 10 % de la chaux par le métakaolin avec adjuvant. Cela est du a la Portlandite non réagi qui a continue à se carbonater et augmenter la résistance à la flexion des mortiers.

5.4.1.2.2. Résistance mécanique à la compression

Après les essais de flexion, des essais de compressions sont réalisés sur les demi-prismes. La Fig.118. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours, chaque valeur est la moyenne de 02 valeurs de compression.

Le tableau 46. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours.

Tableau 46. Les résistances mécaniques à la compression des mortiers.

Resistances mécaniques	Echantillon de mortier	âges	
		14 jours	28jours
Résistance à la Compression (MPa)	MO	0,31	0,94
	MM1	0,26	0,78
	MM2	0,17	0,5
	MM3	0,2	0,59
	MM4	0,2	0,61
	MM5	0,24	0,72
	MM6	0,46	1,38
	MM7	0,42	1,26
	MM8	0,38	1,13
	MM9	0,36	1,08
	MM10	0,43	1,28

Les valeurs de la résistance à la compression des mortiers sont rapportées sur la Fig.118. D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la résistance à la compression des mortiers suit le comportement de la résistance à la flexion

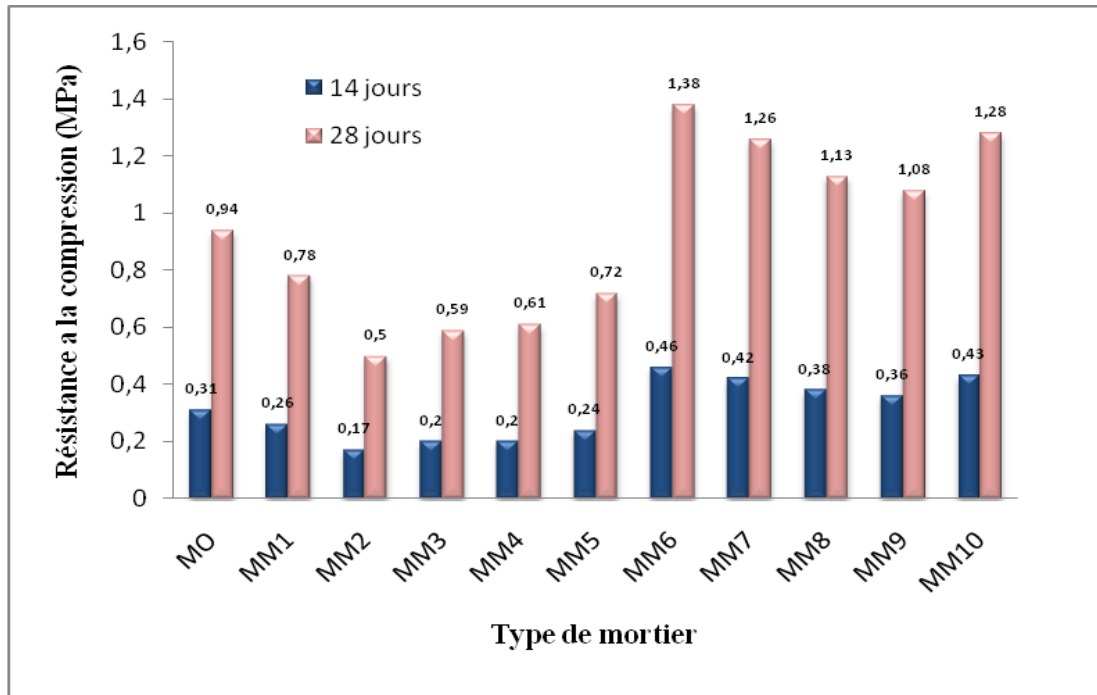


Fig.118. La résistance à la compression des mortiers formulés.

A priori, on peut distinguer que les valeurs des résistances à la flexion sont inférieures à celles enregistrées à la compression. Les valeurs des résistances à l'âge de 14 jours sont triplées à 28 jours et cela pour l'ensemble des échantillons comme illustré dans les Fig. 117 et Fig. 118. Un coefficient de corrélation est bien distinct.

Les résultats de la caractérisation mécanique montrent une évolution identique entre la résistance à la flexion et à la compression où les performances mécaniques des échantillons chutent avec l'augmentation du taux massique du métakaolin substitué, il semblerait que la demande en eau du métakaolin est aussi semblable à celle de la chaux comme il a été relevé dans les travaux de (L. Courard et al. (2003)¹¹⁷. Les auteurs rapportent que la consistance des mortiers diminue avec l'augmentation de la teneur en métakaolin. Cela est expliqué par le besoin important en eau du métakaolin due notamment à sa finesse de mouture (SSB= 3000 cm²/g).

148. L. Courard, A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre, Durability of mortars modified with métakaolin. Cem and Conc Res. 33 (2003) 1473-1479.

En revanche, on peut remarquer clairement que l'ajout du super plastifiant améliore nettement les résistances mécaniques que ce soit en flexion ou en compression grâce notamment à la diminution de la quantité d'eau versée (réduction du rapport eau/liant), le manque de fluidité des mortiers à l'état frais est compensé essentiellement par le super plastifiant.

La valeur de la résistance mécanique à la flexion la plus élevée est estimée à 0,48 MPa, enregistrée par l'échantillon contenant 10% de métakaolin (MM6). En outre, la plus grande résistance à la compression (1,38 MPa) a été enregistrée par le même échantillon MM6 dosé à 2 % d'adjuvant et la plus petite résistance en compression a été enregistrée par l'échantillon MM2 avec une valeur de 0,50 MPa, qui correspond au mortier contenant 20 % de métakaolin et non adjuvanté. Une amélioration des performances mécaniques est prévisible à long terme grâce notamment aux réactions pouzzolaniques entre le métakaolin et la chaux donnant ainsi naissance à de nouveaux cristaux qui contribuent à l'amélioration des résistances mécaniques (M. Belaidi, 2012)¹¹⁸ Globalement, les valeurs des résistances des échantillons restent néanmoins assez faibles à cet âge de durcissement.

149. M. Belaidi, M. Hamiane, Etude comparative des différents enduits de chaux utilisés dans les monuments historiques (cas de la citadelle d'Alger). in: Proceedings of the séminaire national matériaux procédés et environnement, Boumerdès, 2012.

5.4.1. 3. Caractérisation hydrique

5.4.1. 3.1. Absorption d'eau par capillarité

Les résultats des masses cumulées de l'eau absorbées (M) par les échantillons en fonction de temps des différents mortiers sont montrés dans la (Fig. 119).

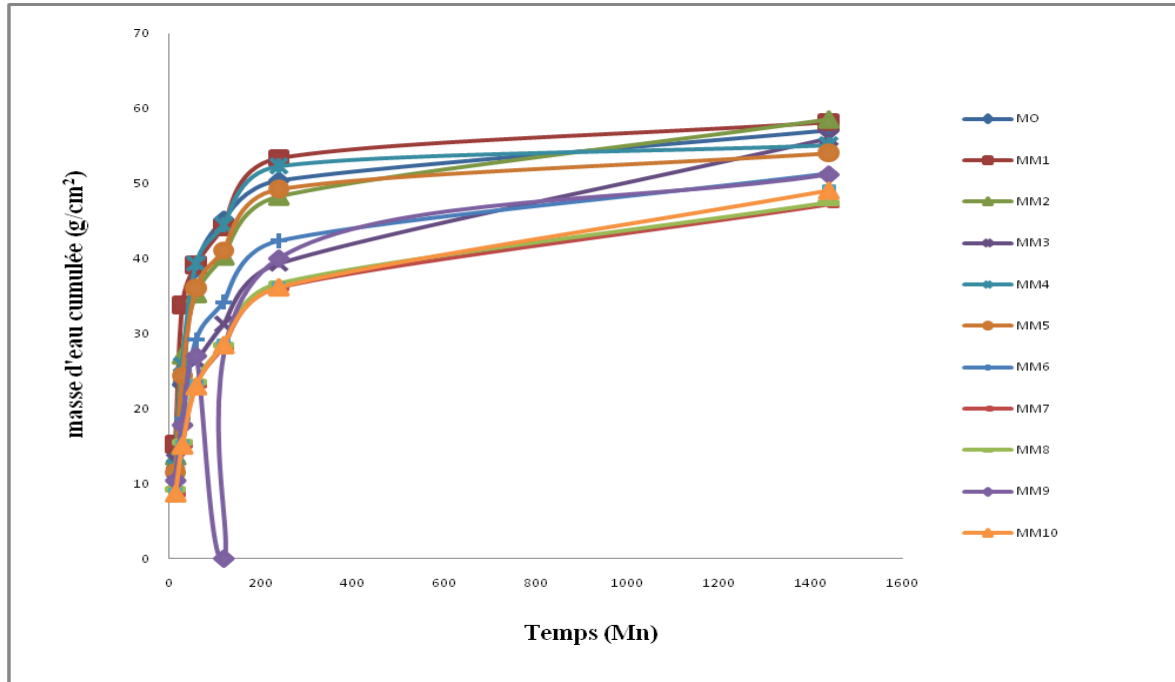


Fig.119. La masse d'eau cumulée des mortiers formulés.

Les mesures (masse cumulée des échantillons) ont été réalisées tout au long de 1440 minutes, soit 24 heures, entre des intervalles de temps bien précis (tableau 47).

Tableau 47. Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers.

t (mn)	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.					
	15	30	60	120	240	1440
MO	14,4	23,2	38,7	45,2	50,4	57,1
MM1	15,3	33,8	39,2	44,2	53,4	58,2
MM2	13,6	27,1	35,3	40,3	48,3	58,6
MM3	13,0	24,4	26,4	31,3	39,4	56,1
MM4	12,2	25,9	39,4	44,5	52,4	55,2
MM5	11,5	24,4	36,1	41,1	49,3	54,1
MM6	10,8	18,7	29,2	34,2	42,4	51,4
MM7	8,6	15,2	23,1	28,2	36,1	47,2
MM8	9,3	15,6	23,5	28,5	36,7	47,5
MM9	10,4	17,8	27,0	32,1	40,0	51,2
MM10	8,7	15,1	23,0	28,5	36,2	49,1

On peut observer que la masse cumulée de l'eau absorbée évolue et augmente de façon quasi-constante jusqu'à $t = 240$ minutes (soit 4 heures) et ce, pour les différents échantillons de mortiers. Au-delà de ce temps, la masse d'eau absorbée par capillarité est nettement freinée, cela est due éventuellement à l'effet de la gravitation (cumul de la masse d'eau absorbée). (v. Nezřerka et al. 2014) ¹²⁰. La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier MM10 estimée à $36,2 \text{ g/cm}^2$.

Afin de caractériser le coefficient d'absorption capillaire (i) pour toutes les compositions des mortiers étudiés, les valeurs expérimentales calculées sont regroupées dans le tableau 48. et présentées dans la Fig.120. Les résultats obtenus des coefficients (i) varient entre 2,95 et $3,66 \text{ g/cm}^2$.

Tableau 48. Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers .

t (mn)	Coefficient d'absorption capillaire (i) (g/cm^2)					
	15	30	60	120	240	1440
MO	0,90	1,45	2,42	2,83	3,15	3,57
MM1	0,96	2,11	2,45	2,76	3,34	3,64
MM2	0,85	1,69	2,21	2,52	3,02	3,66
MM3	0,81	1,53	1,65	1,96	2,46	3,51
MM4	0,76	1,62	2,46	2,78	3,28	3,45
MM5	0,72	1,53	2,26	2,57	3,08	3,38
MM6	0,68	1,17	1,83	2,14	2,65	3,21
MM7	0,54	0,95	1,44	1,76	2,26	2,95
MM8	0,58	0,98	1,47	1,78	2,29	2,97
MM9	0,65	1,11	1,69	2,01	2,50	3,20
MM10	0,54	0,94	1,44	1,78	2,26	3,07

150. V. Nezřerka, Z. Slízřková, P. Tesárek, T. Plachyř, D. Frankeová, V. Petránřová, Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust, Cem and Con Res. 64(2014) .p.17–29 .

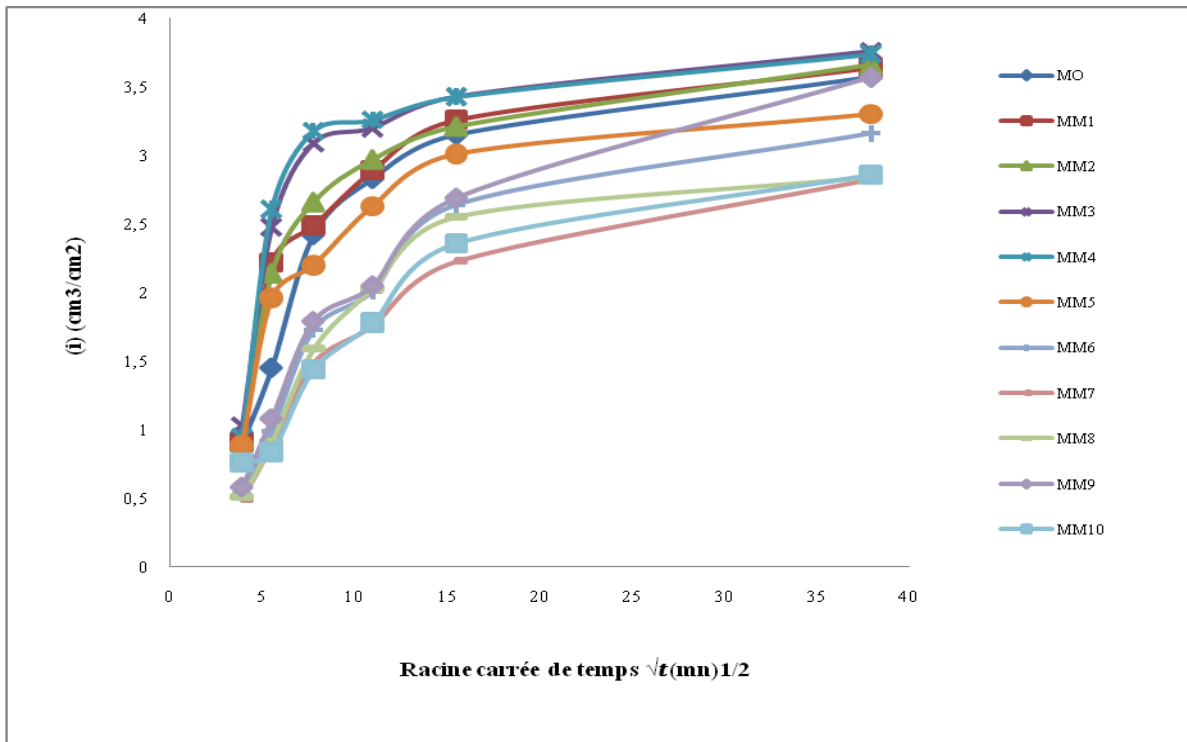


Fig.120. Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.

Les courbes de l'évolution des coefficients d'absorptions capillaires et les masses cumulées d'eau absorbées (Fig.119 et Fig.120) ont une tendance plus ou moins linéaire, ce qui démontre la structure homogène des mortiers préparés. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs. (M. Al-Mukhtar et al. (2006), K. Beck et al. (2007) ^{121,122}).

Le mortier (MM10) présente la plus basse valeur d'absorption par capillarité comparée aux autres mortiers. D'autre part, Les résultats des tests des coefficients (i) montrent aussi que plus la teneur en métakaolin augmente dans les mortiers en particulier ceux adjuvantés, plus les valeurs des coefficients (i) s'éloignent de celle du mortier témoin, ils sont caractérisés par des valeurs d'absorption par capillarité moins importantes. Cette caractéristique permet de les classer dans la catégorie des mortiers adéquats pour des applications en milieux humides. (F .Rendell et al. (2007)¹²³).

La relation entre l'absorption d'eau, la porosité ouverte (Po) et la résistance à la compression des différents échantillons est illustrée dans les figures (Fig121 et Fig122).

151. M. Al-Mukhtar, K.Beck, Formulation and characterization of an appropriate lime-based mortar for use with a porous limestone .Int Jou of Bui and Env. (2006) .p.2897–2910.

152 .K. Beck, J.D. Mertz, Critères de compatibilité entre des mortiers à base de chaux et des pierres calcaires à forte porosité (tuffeaux blancs). in: Proceedings of the 25e rencontres de l'AUGC, Bordeaux, 2007.

153. F .Rendell, R. Jauberthie , M. Grantham, Deteriorated Concrete, Inspection and physic-chemical analysis. Thomas Telford, London, 2002.

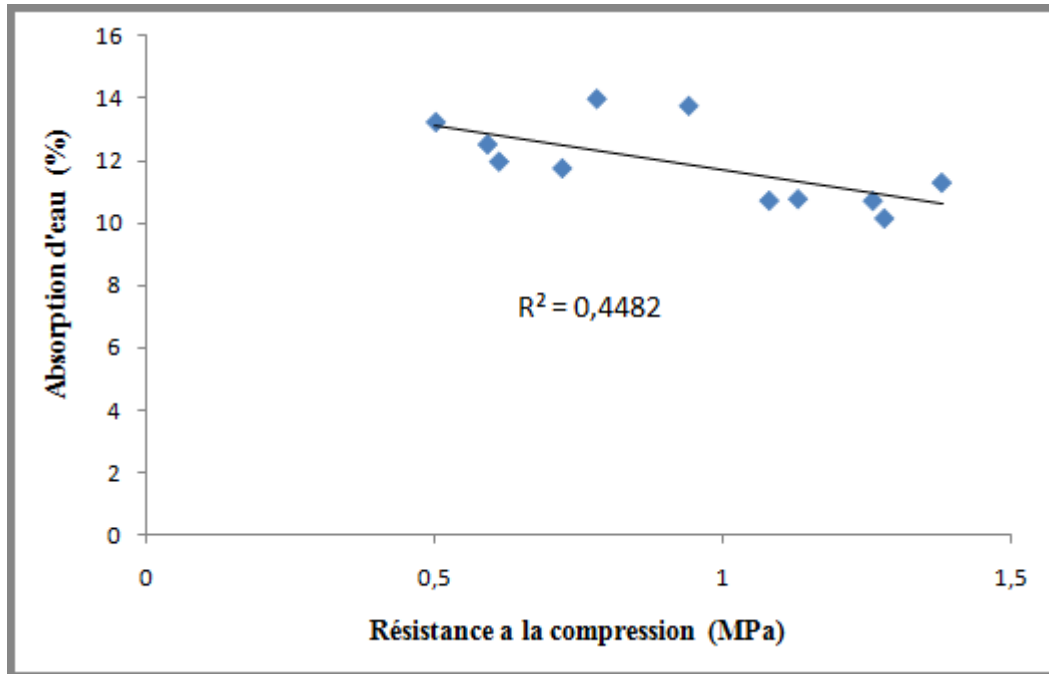


Fig.121. La corrélation entre l'absorption de l'eau et la résistance à la compression des mortiers formulés.

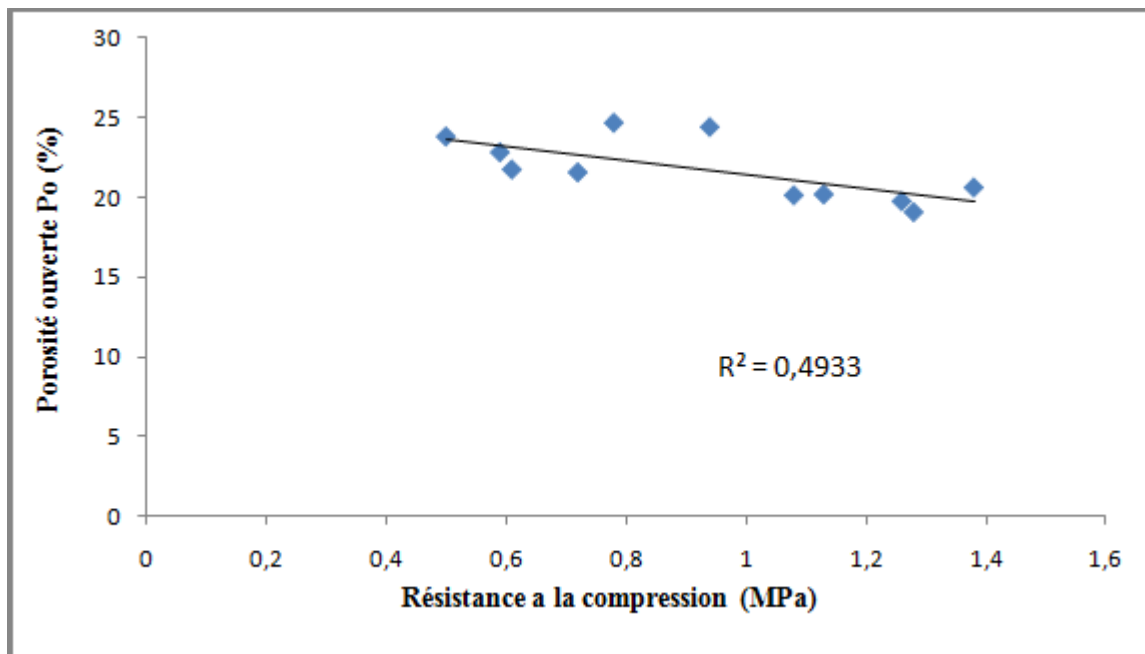


Fig.122. La corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression des mortiers formulés.

La droite de régression linéaire met en exergue une tendance à la baisse qui existe entre l'absorption d'eau et la résistance mécaniques des mortiers. En effet, on peut remarquer une diminution de l'absorption d'eau accompagnée d'une augmentation de la résistance à la compression. La valeur minimale d'absorption de l'eau correspond à la valeur maximale de la

résistance à la compression ce qui montre la relation de dépendance entre ces deux propriétés. (M. Olivia et al (2011) ¹²⁴. La même évolution est observée pour la relation entre la porosité des échantillons et la résistance mécanique à la compression.

5.5. La cinquième variante de mortier (Ajout de ciment naturel).

Pour connaître l'effet des ajouts pouzzolaniques sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers, nous avons procédé à l'ajout de ciment naturel à la chaux. Différentes compositions ont été élaborées avec un rapport volumique liant : agrégat de 1 : 3. Des mélanges de mortiers contenant 10 à 50 % de ciment naturel par substitution à la chaux aérienne ont été préparés. Afin d'améliorer la fluidité des mélanges, un superplastifiant - Médaflow 30- a été incorporé.

La formulation composée uniquement de chaux et de sable (eau + chaux+sable) est considérée comme la formulation de base est dite mortiers ordinaires et codifié par mortiers **(MO)**. Les autres mortiers sont codifiés par **(MC)**, et qui seront désignés par **(MC1 à MC5)** et **(MC6 à MC10)**, respectivement les mortiers sans adjuvant, et mortiers avec adjuvant Médaflow.

Les mortiers réalisés sont illustrées dans l'organigramme de la figure (Fig.123).

154. M. Olivia, H. Nikraz, Strength and Water Penetrability of Fly Ash Geopolymer Concrete. J. Eng. Appl. Sci., 6(7) (2011).p. 70-78.

Fig.123. Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation de La cinquième variante de mortier (chaux +Ciment naturel).

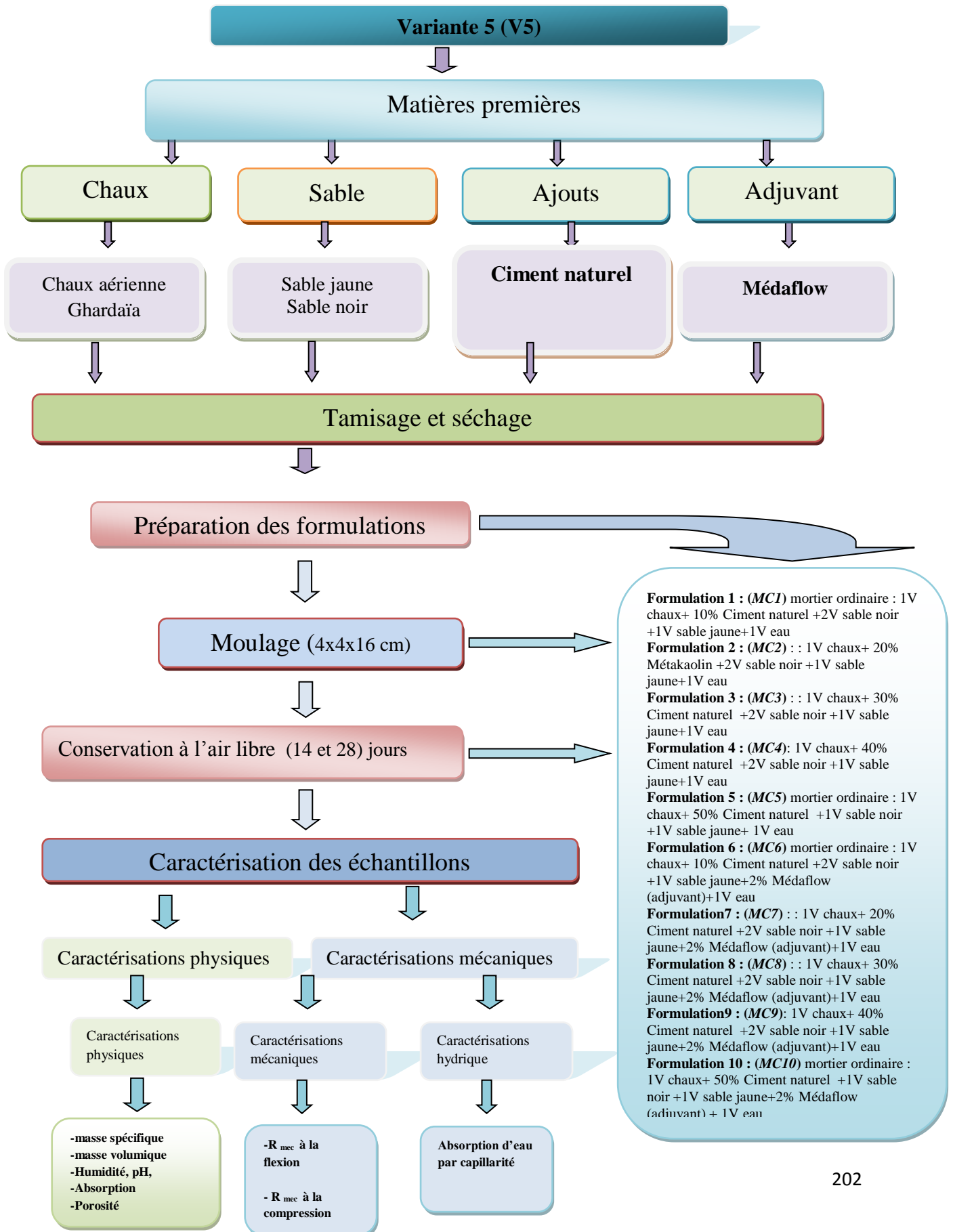


Tableau 49. Composition de la cinquième variante des mortiers (chaux+ ciment naturel).

N°	Nom de formulation	formulation	Chaux (g)	Ciment naturel (g)	Sable noir (g)	Sable jaune (g)	Eau (ml)	Adjuvant (% de masse de chaux)
01	<i>MO</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+Eau	450	0	1285	428	570	0
02	<i>MC1</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% ciment naturel+Eau	390	60	1285	428	580	0
03	<i>MC2</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 20% ciment naturel + Eau	330	120	1285	428	590	0
04	<i>MC3</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 30% ciment naturel +Eau	270	180	1285	428	600	0
05	<i>MC4</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 40% ciment naturel +Eau	210	240	1285	428	610	0
06	<i>MC5</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 50% ciment naturel +Eau	150	300	1285	428	620	0
07	<i>MC6</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 10% ciment naturel + Adjuvant+Eau	390	60	1285	428	480	2
08	<i>MC7</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 20% ciment naturel + Adjuvant+Eau	330	120	1285	428	490	2
09	<i>MC8</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 30% ciment naturel + Adjuvant+Eau	270	180	1285	428	500	2
10	<i>MC9</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 40% ciment naturel + Adjuvant+Eau	210	240	1285	428	510	2
11	<i>MC10</i>	1V chaux+2V sable noir + 1V sable jaune+ 50% ciment naturel + Adjuvant+Eau	150	300	1285	428	520	2

Les masses des constituants présentés dans le tableau ci-dessus sont données en volume. Les masses nécessaire de chaque constituant dans la formulation des mortiers seront déterminées en fonction de la masse volumiques de constituant lui-même pour arriver à la quantité plus exacte de chaque composant dans chaque formulation, Le calcul sera fait avec la formule suivante :

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (\text{g /cm}^3)$$

5.5.1. Caractérisation des échantillons de mortiers.

5.5.1. 1. Caractérisation physique.

Cette partie est consacrée aux essais physiques réalisés sur les mortiers étudiés à l'état durci. Toutes les procédures d'essais ont été exposées en détails dans la partie précédente.

La caractérisation physique a été faite à la base de différents essais qui consistent en le calcul des masses volumiques spécifiques et apparentes, de l'absorption d'eau, de la porosité ouverte, de l'humidité, et de potentiel d'hydrogène. L'ensemble de ces essais ont été menés conformément aux méthodes et normes en vigueur.

Les valeurs moyennes des propriétés physiques après 28 jours de durcissement sont rapportées dans le tableau 50.

Tableau 50. Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers .

Echantillons formulés	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Porosité ouverte Po (%)	Absorption d'eau Ab (%)	Humidité H (%)	Potentiel d'Hydrogène pH
MO	2,05	1,77	24,38	13,76	1,12	11,33
MC1	1,47	1,72	27,51	15,92	1,19	11,21
MC2	2,23	1,74	27,79	15,90	1,34	11,08
MC3	1,86	1,76	28,62	16,19	1,69	12,01
MC4	1,91	1,80	28,50	15,95	1,97	11,64
MC5	2,5	1,81	28,12	15,55	1,91	12,51
MC6	2,68	1,86	22,64	12,16	1,15	11,90
MC7	2,00	1,88	22,87	12,17	1,32	10,99
MC8	2,28	1,86	22,33	11,97	1,47	11,37
MC9	2,73	1,84	23,96	13,01	1,73	11,42
MC10	2,85	1,89	21,88	11,55	1,57	11,57

La figure (Fig.124). Illustre l'effet du taux de substitution de ciment naturel sur la masse volumique absolue des mortiers formulés (Ms).

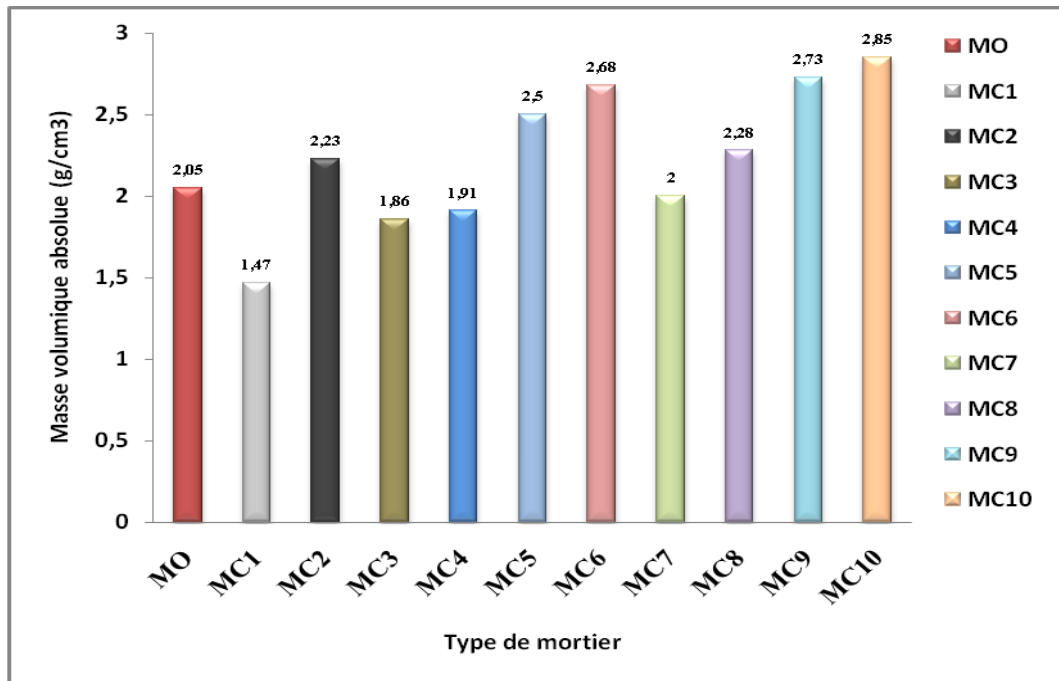


Fig.124. La masse volumique absolue des mortiers formulés.

Ces résultats font ressortir comme le montre la figure (Fig.124), et le tableau 41, que la substitution de la chaux aérienne par le ciment naturel mis en œuvre, influence les masses volumiques absolues des mortiers formulés.

Les résultats montrent que l'échantillon témoin qui ne contient aucun ajout et dont la composition est le sable et la chaux à une valeur de masse volumiques absolue de 2,05 (g/cm³). Les mortiers non adjuvés présentent des valeurs des masses volumiques absolues proches à l'échantillon témoin.

On peut noter que l'ajout de l'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MC6, MC7, MC8, MC9 et MC10) est également manifeste, et qui a induit une augmentation des masses volumiques absolues respectivement (2,68, 2,00, 2,28, 2,73 et 2,85 (g/cm³)).

La Fig. 125. Illustre l'effet du taux de substitution de ciment naturel sur les masses volumiques apparentes des mortiers d'étude.

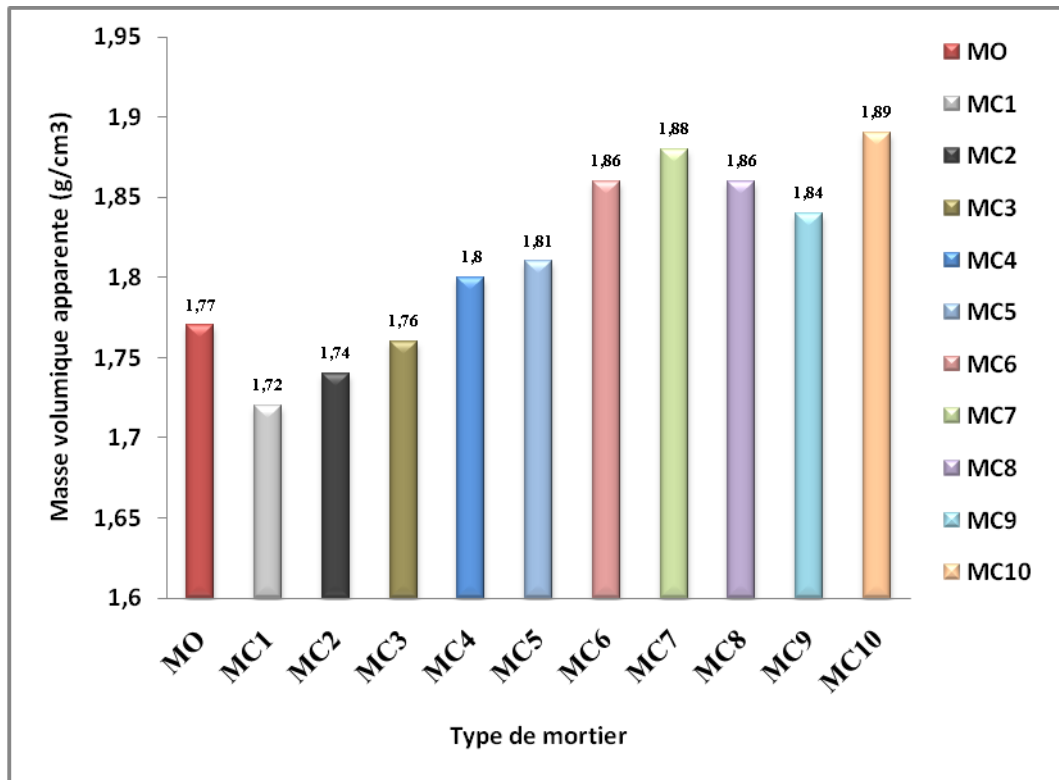


Fig.125. La masse volumique apparente des mortiers formulés.

Les résultats font ressortir comme la montre la figure (Fig.125), et le tableau 41, que la substitution de la chaux aérienne par le ciment naturel, influence les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.

On peut noter que l'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MC6, MC7, MC8, MC9 et MC10) à induit une augmentation des masses volumiques apparentes par rapport au mortier témoin et aux mortiers non adjuvantés (MC1, MC2, MC3, MC4 et MC5).

La Fig. 126. Illustre les valeurs des humidités des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par le ciment naturel à différents volumes.

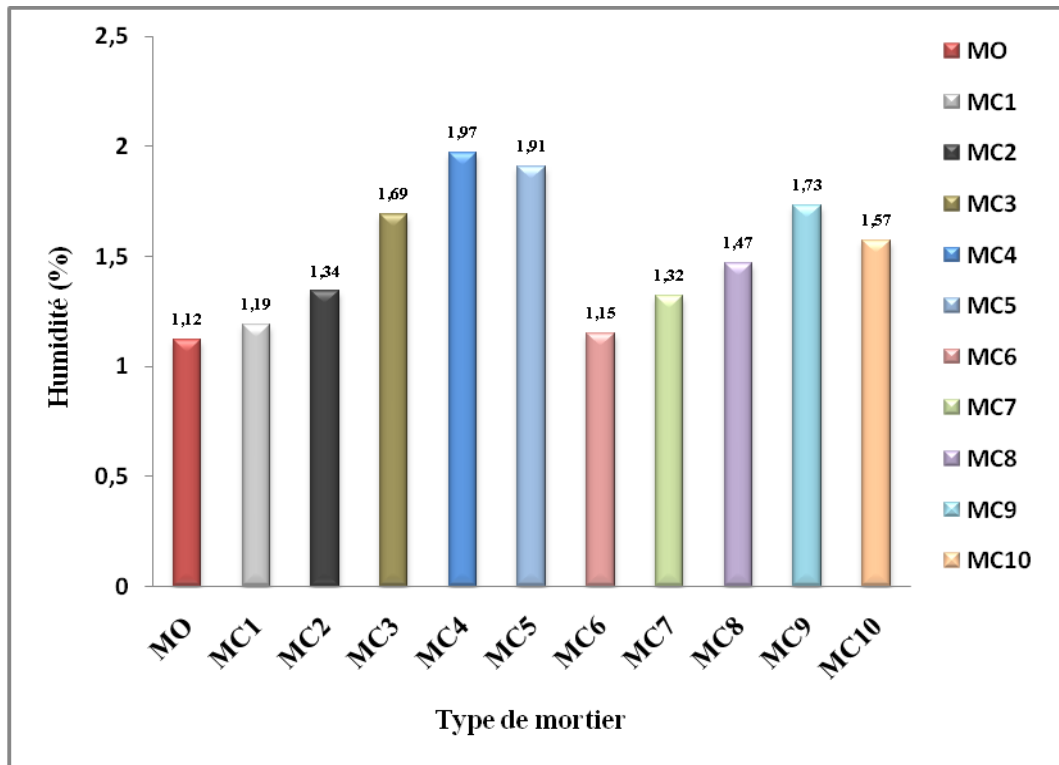


Fig.126. L'humidité des mortiers formulés.

Les résultats reportés dans le tableau 41, montrent bien que les valeurs des humidités pour tous les mortiers varient entre (1,12 et 1,97 %). Cela est par le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés, quelque soit le volume ciment naturel substitué et le type d'ajouts ajouté.

La Fig. 127. Illustre les valeurs des pH des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par le ciment naturel à différents volumes.

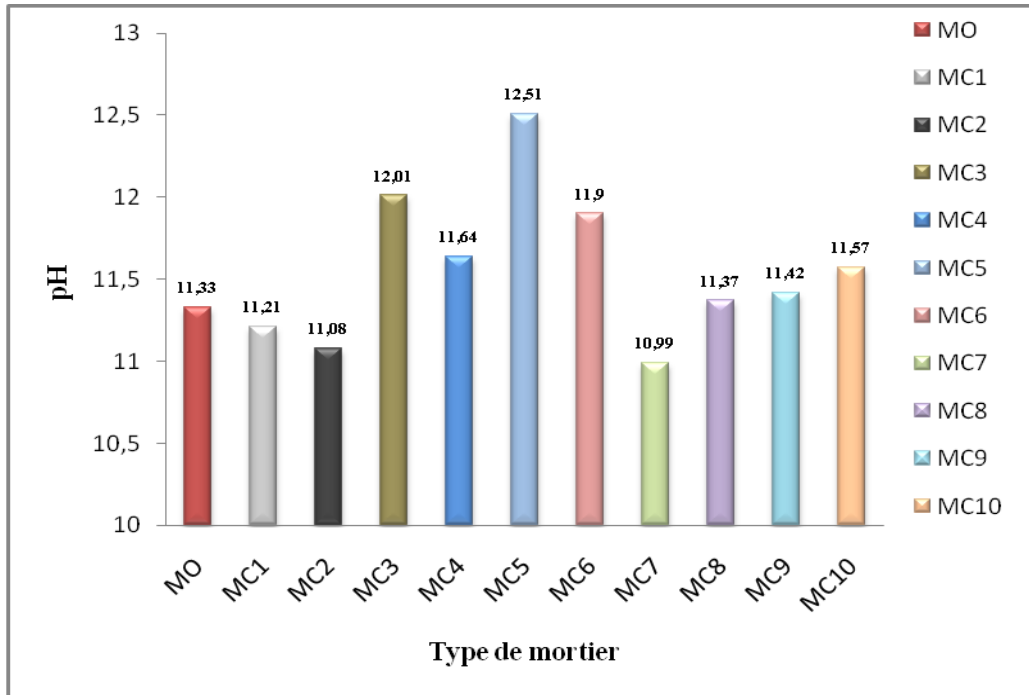


Fig. 127. Le pH des mortiers formulés.

Les résultats reportés dans le tableau 41, montrent bien que les valeurs des pH pour tous les mortiers varient entre (10.99 et 12,51), cela explique le caractère basique des mortiers élaborés.

La Fig.128. Illustre les valeurs des porosités ouvertes des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par le ciment naturel à différents volumes.

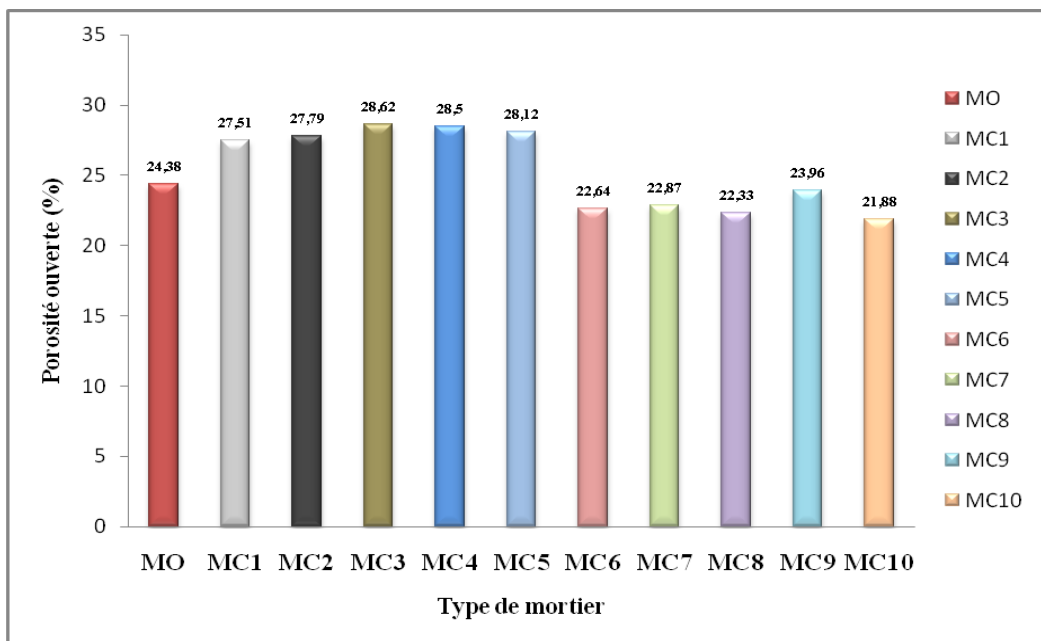


Fig.128. La porosité ouverte (Po) des mortiers formulés.

Le test de porosité, réalisé sur des éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce quelque soit le volume de ciment naturel substitué et le type d'ajouts ajouté.

Les résultats reportés dans le tableau 41, montrent que d'échantillon (MC3) mortier avec substitution de 30 % de la chaux par le ciment naturel et sans adjuvant est le plus poreux avec une valeur maximale de porosité ouverte estimée à 28,62 %.

On peut noter que l'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MC6, MC7, MC8, MC9 et MC10) à induit une diminution des valeurs de la porosité avec des valeurs respectives de (22,64, 22,87, 22,33, 23,96 et 21,88 %). Cela montre bien que le super plastifiant était à peine adsorbé sur les particules de chaux et les cristaux de C-S-H, ce qui conduit à la présence de molécules libres de super plastifiant dans la dispersion. Cela réduit également la quantité d'eau ajoutée lors de malaxage (tableau 40), et améliore la structure interne et par conséquent, la diminution des pores.

La Fig. 129. Illustre les valeurs de l'absorption des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par le ciment naturel à différents volumes.

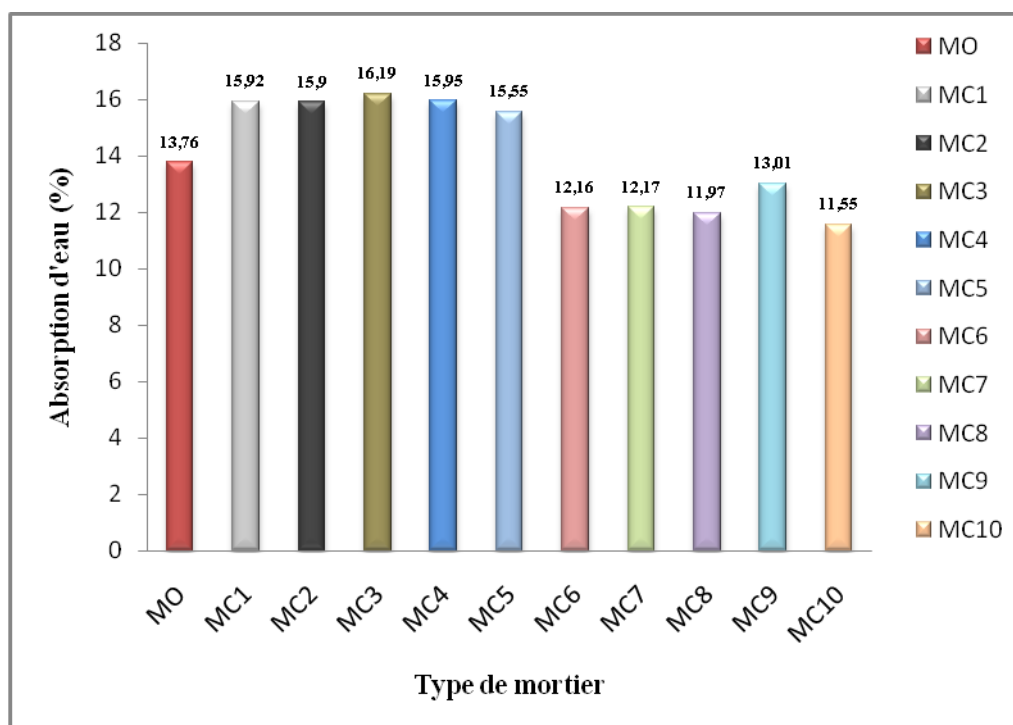


Fig.129. L'absorption d'eau des mortiers formulés.

Toujours selon le tableau 41, on trouve que l'évolution de l'absorption suit le même comportement de la porosité ouverte. Les résultats montrent que l'échantillon (MC3) mortier

avec substitution de 30 % de la chaux par le ciment naturel et sans adjuvant présente une valeur d'absorption maximale estimée à 16,19 %. On peut observer également que le l'échantillon (MC10) mortier avec substitution de 50 % de la chaux par le ciment naturel avec adjuvant, enregistre la plus petite valeur de l'absorption elle est égale (11,55 %).

5.5.1.2. Caractérisation mécanique.

5.5.1.2.1. Résistance mécanique à la flexion.

Les résultats de la résistance à la flexion, ont été calculés par la moyenne de trois échantillons de chaque type de mortier testé. L'évolution des valeurs de la résistance à 14 et à 28 jours de durcissement est montrée dans le tableau 51. Et illustrée dans la Fig. 130.

Tableau 51. Les résistances mécaniques à la flexion des mortiers.

Resistances mécaniques	Echantillon de mortier	âges	
		14 jours	28jours
Résistance à la flexion 3 points (MPa)	MO	0,12	0,37
	MC1	0,08	0,25
	MC2	0,12	0,36
	MC3	0,14	0,43
	MC4	0,18	0,55
	MC5	0,22	0,65
	MC6	0,11	0,34
	MC7	0,17	0,52
	MC8	0,31	0,92
	MC9	0,36	1,07
	MC10	0,42	1,25

La Fig. 130. Illustre les valeurs de la résistance mécanique à la flexion des mortiers élaborés avec la substitution de la chaux par le ciment naturel à différents volumes.

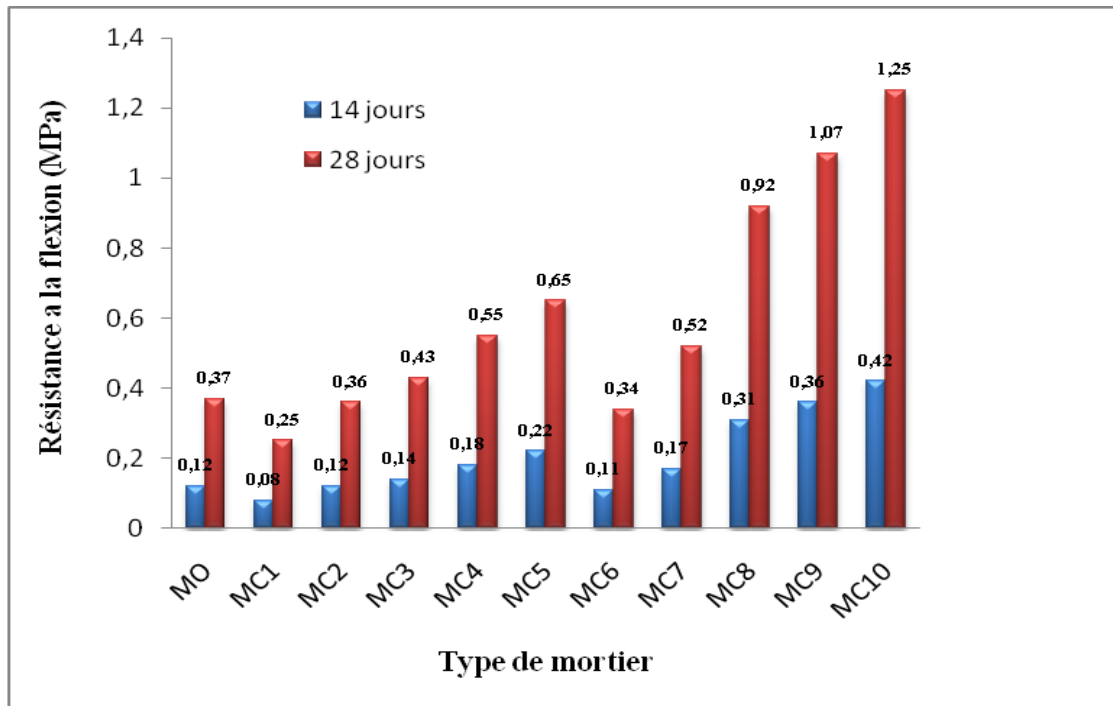


Fig.130. La résistance a la flexion des mortiers formulés.

Tous les mortiers ont présenté une maniabilité proportionnée. La quantité d'eau utiliser pour chaque mortier est présentés dans le tableau 40, En outre, du tableau 40, on voie bien que l'ajout de l'adjuvant Médaflow 30 à provoqué une diminution considérable d'eau, par conséquent, une diminution du rapport eau/liant. Cela était nécessaire pour réaliser des augmentations comparables des résistances.

D'après la Fig.130. À 14 jours, les résultats de la résistance à la flexion des mortiers sans ajout varient de (0,08 à 0,22 MPa). Alors que le mortier témoin (MO) à une résistance à la flexion égale a 0,12 MPa. La résistance à la flexion des mortiers avec ajout de ciment naturel et de Médaflow 30 varient de (0,11 à 0,42 MPa).

Toujours d'après la Fig.130, À 28 jours, on observe une tendance d'augmentation des valeurs de la résistance à la flexion comparé à ceux à 14 jours. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée est de 1,25 MPa, qui correspond au mortier (MC10) mortier avec la substitution de 50 % de la chaux par le ciment naturel avec adjuvant. Cela est du a la Portlandite non réagi qui a continue à se carbonater et augmenter la résistance à la flexion des mortiers.

5.5.1.2.2. Résistance mécanique à la compression

Après les essais de flexion, des essais de compressions sont réalisés sur les demi-prismes. La Fig. 131. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours, chaque valeur est la moyenne de 02 valeurs de compression.

Le tableau 52. Représente les résultats de la résistance à la compression à des échéances de 14 et 28 jours.

Tableau 52. Les résistances mécaniques à la compression des mortiers .

Resistances mécaniques	Echantillon de mortier	âges	
		14 jours	28jours
Résistance à la Compression (MPa)	MO	0,31	0,94
	MC1	0,22	0,67
	MC2	0,32	0,97
	MC3	0,42	1,26
	MC4	0,63	1,9
	MC5	0,75	2,24
	MC6	0,47	1,41
	MC7	0,69	2,07
	MC8	0,96	2,87
	MC9	1,01	3,03
	MC10	0,69	2,07

Les valeurs de la résistance à la compression des mortiers sont rapportées sur la Fig. 131. D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la résistance à la compression des mortiers suit le comportement de la résistance à la flexion

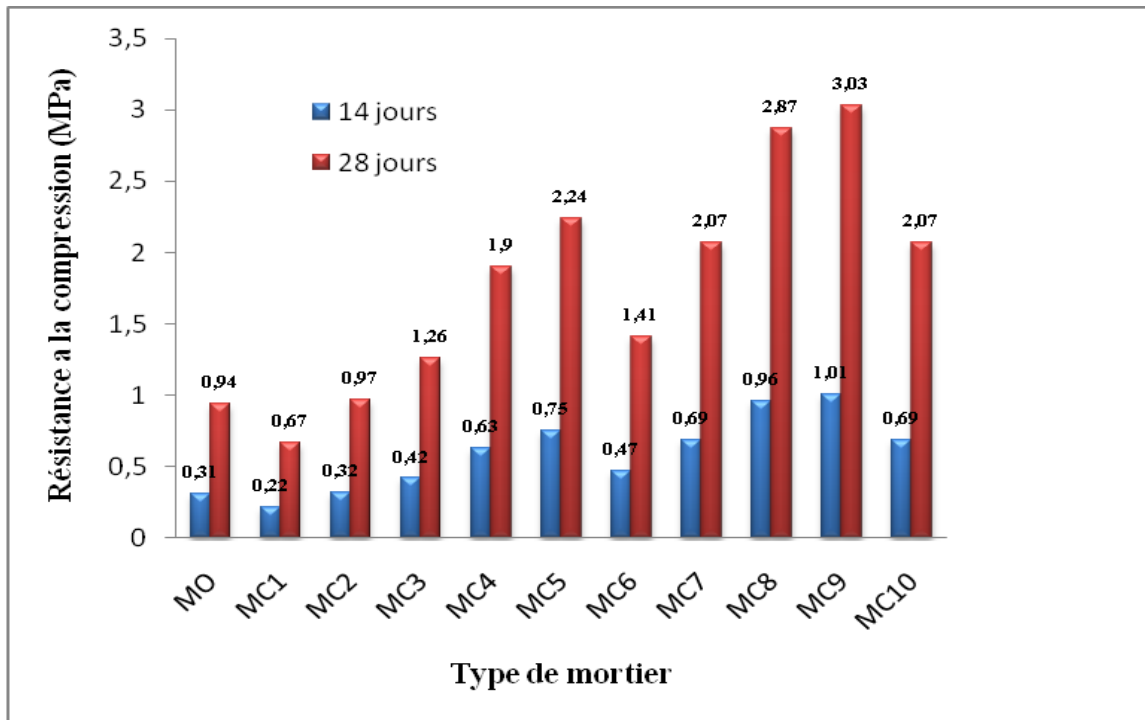


Fig.131. La résistance a la compression des mortiers formulés.

À 28 jours, les résultats de la résistance à la compression changent dans une plus grande dimension comparée aux valeurs de la résistance à la flexion et avec des valeurs qui varient de (0,67 à 3,03 MPa). Les meilleures valeurs sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée de la résistance à la compression est de 3,03 MPa, qui correspond au mortier (MC9). Mortier avec substitution de 40 % de la chaux par le ciment naturel avec adjuvant. Par ailleurs, les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de ciment naturel et sans adjuvant. Qui varient entre (0,67 à 2,24 MPa).

A priori, on peut distinguer que les valeurs des résistances à la flexion sont inférieures à celles enregistrées à la compression. Les valeurs des résistances à l'âge de 14 jours sont triplées à 28 jours et cela pour l'ensemble des échantillons comme illustré dans les Fig. 130 et Fig. 131. Un coefficient de corrélation est bien distinct.

5.5.1.3. Caractérisation hydrique

5.5.1.3.1. Absorption d'eau par capillarité

Les résultats des masses cumulées de l'eau absorbées (M) par les échantillons en fonction de temps des différents mortiers sont montrés dans la (Fig. 132)

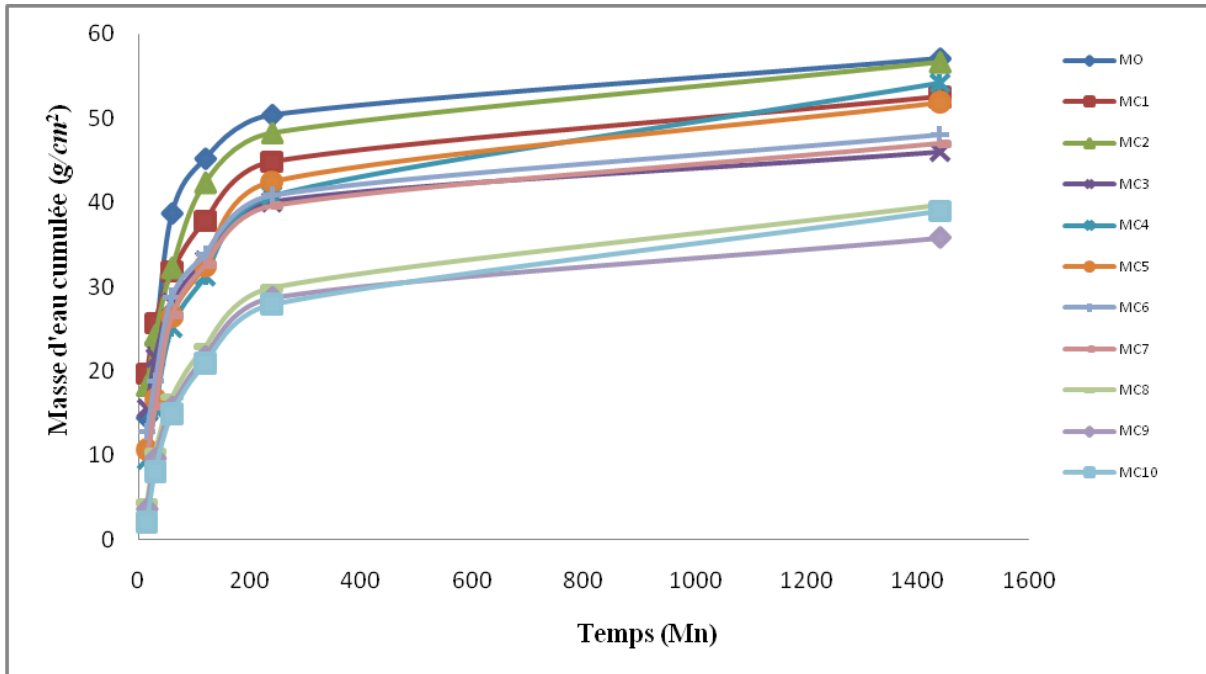


Fig.132. La masse d'eau cumulée des mortiers formulés.

Les mesures (masse cumulée des échantillons) ont été réalisées tout au long de 1440 minutes, soit 24 heures, entre des intervalles de temps bien précis (tableau 53).

Tableau 53. Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers.

t (mn)	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.					
	15	30	60	120	240	1440
MO	14,4	23,2	38,7	45,2	50,4	57,1
MC1	19,7	25,7	31,8	37,8	44,8	52,5
MC2	18,2	24,2	32,2	42,3	48,2	56,6
MC3	15,6	21,6	28,1	33,1	40,1	46
MC4	9,5	15,5	25,2	31,2	40,8	54,2
MC5	10,7	16,7	26,5	32,5	42,5	51,9
MC6	12,8	18,8	28,8	33,8	40,8	48
MC7	9,8	15,8	26,6	32,6	39,6	47
MC8	4,4	10,4	16,9	22,9	29,9	39,7
MC9	3,6	9,6	15,7	21,7	28,7	35,8
MC10	2,1	8,1	14,9	20,9	27,9	39

On peut observer que la masse cumulée de l'eau absorbée évolue et augmente de façon quasi-constante jusqu'à $t = 240$ minutes (soit 4 heures) et ce, pour les différents échantillons de mortiers. Au-delà de ce temps, la masse d'eau absorbée par capillarité est nettement freinée, cela est due éventuellement à l'effet de la gravitation (cumul de la masse d'eau absorbée). La

valeur minimale absorbée à $t = 240 \text{ mn}$ a été enregistrée par le mortier MC10 estimée à $27,9 \text{ g/cm}^2$.

Afin de caractériser le coefficient d'absorption capillaire (i) pour toutes les compositions des mortiers étudiés, les valeurs expérimentales calculées sont regroupées dans le tableau 54. et présentées dans la Fig.133. Les résultats obtenus des coefficients (i) varient entre 2,24 et 3,56 g/cm^2 .

Tableau 54. Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers.

t (mn)	Coefficient d'absorption capillaire (i) (g/cm^2)					
	15	30	60	120	240	1440
MO	0,90	1,45	2,42	2,83	3,15	3,57
MC1	1,23	1,61	1,99	2,36	2,80	3,28
MC2	1,14	1,51	2,01	2,64	3,01	3,54
MC3	0,98	1,35	1,76	2,07	2,51	2,88
MC4	0,59	0,97	1,58	1,95	2,55	3,39
MC5	0,67	1,04	1,66	2,03	2,66	3,24
MC6	0,80	1,18	1,80	2,11	2,55	3,00
MC7	0,61	0,99	1,66	2,04	2,48	2,94
MC8	0,28	0,65	1,06	1,43	1,87	2,48
MC9	0,23	0,60	0,98	1,36	1,79	2,24
MC10	0,13	0,51	0,93	1,31	1,74	2,44

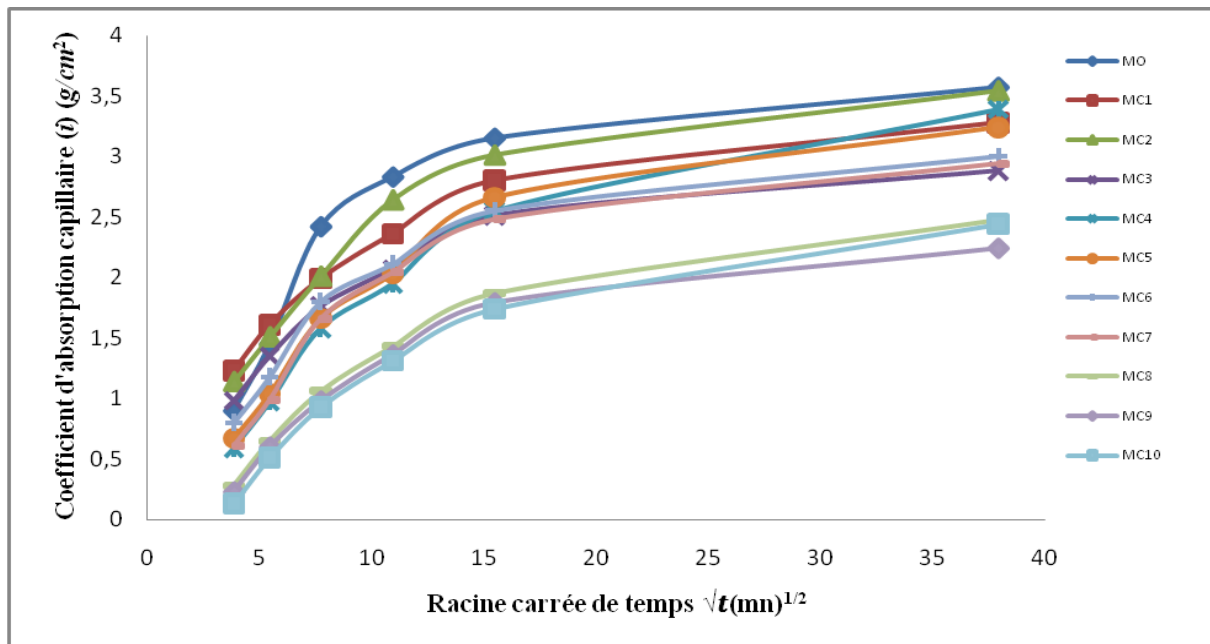


Fig.133. Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.

Les courbes de l'évolution des coefficients d'absorptions capillaires et les masses cumulées d'eau absorbées (Fig.132 et Fig.133) ont une tendance plus ou moins linéaire, ce qui démontre la structure homogène des mortiers préparés. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs

Le mortier (MC9) présente la plus basse valeur d'absorption par capillarité comparée aux autres mortiers. D'autre part, Les résultats des tests des coefficients (i) montrent aussi que plus la teneur en pouzzolane augmente dans les mortiers en particulier ceux adjuvantés, plus les valeurs des coefficients (i) s'éloignent de celle du mortier témoin, ils sont caractérisés par des valeurs d'absorption par capillarité moins importantes. Cette caractéristique permet de les classer dans la catégorie des mortiers adéquats pour des applications en milieux humides

La relation entre l'absorption d'eau, la porosité ouverte (Po) et la résistance à la compression des différents échantillons est illustrée dans les figures Fig.134 et Fig.135.

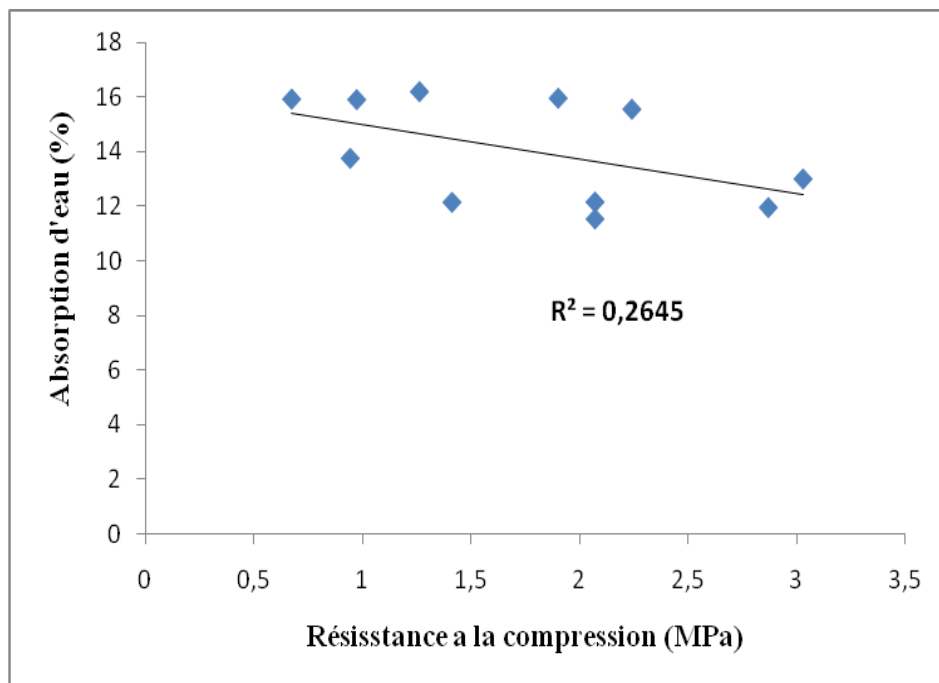


Fig.134. La corrélation entre l'absorption de l'eau et la résistance à la compression des mortiers formulés.

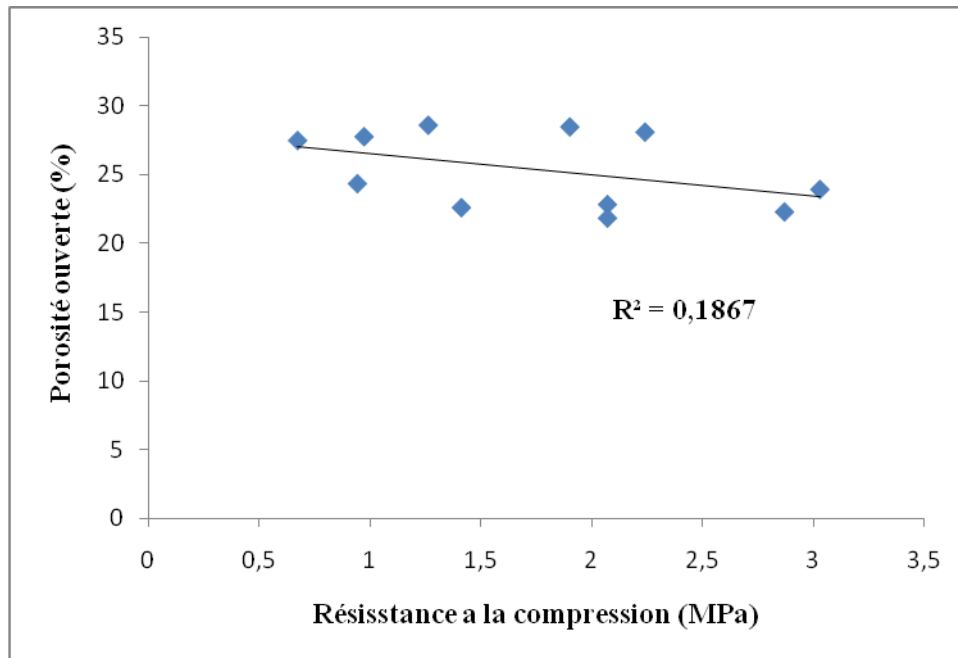


Fig.135. La corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression des mortiers formulés.

La droite de régression linéaire met en exergue une tendance à la baisse qui existe entre l'absorption d'eau et la résistance mécanique des mortiers. En effet, on peut remarquer une diminution de l'absorption d'eau accompagnée d'une augmentation de la résistance à la compression.

La valeur minimale d'absorption de l'eau correspond à la valeur maximale de la résistance à la compression ce qui montre la relation de dépendance entre ces deux propriétés. La même évolution est observée pour la relation entre la porosité des échantillons et la résistance mécanique à la compression.

INTERPRETATION GENERALE

Interprétation générale

- **Etat de conservation de la piscine romaine**

La piscine de Guelma se trouve dans un état de conservation désastreux. Les paramètres principaux responsables de la dégradation de la piscine de Guelma sont : l'abandon du site, les interventions non adéquates, l'altération des matériaux par vieillissement et action des paramètres extérieurs.

- **Caractérisation des matériaux de la piscine romaine**

L'analyse minéralogique et chimique, montrent que la composition des matières premières des mortiers est : chaux+ sable+ ajout pouzzolanique. La chaux est de nature dolomitique et l'ajout est composé d'argile calcinée (ou briques pilées) ce qui lui confère le caractère hydrofuge. C'est la composition typique des mortiers hydrofuges de l'époque romaine.

Caractérisation des mortiers élaborés au laboratoire.

Variante 1 (V1) (Ajout de la brique pillée).

La substitution de sable noir et de sable jaune par la brique pillée mise en œuvre a une influence sur les caractéristiques physiques, mécaniques et hydriques des mortiers étudiés.

Le test de porosité et de l'absorption, réalisé sur les éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce, quelque soit le volume de la brique pillée substitué.

L'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MB4, MB5 et MB6) a induit une diminution des valeurs de la porosité et de l'absorption .Cela montre bien que le super plastifiant est à peine adsorbé sur les particules de chaux et les cristaux de C-S-H, ce qui conduit à la présence de molécules libres de super plastifiant dans la dispersion. Cela réduit également la quantité d'eau ajoutée lors de malaxage, et améliore la structure interne et par conséquent, la diminution des pores.On trouve également une diminution remarquable des valeurs de la porosité et de l'absorption pour les échantillons (MBH1, MBH2 et MBH3), mortiers formulés avec l'ajout de l'huile d'olive.

L'échantillon (MBH2) mortier avec substitution d'1 volume d'agrégats par la brique pillée et avec ajout de l'huile d'olive, enregistre les plus basses valeurs de la porosité (7,22 %) et de l'absorption d'eau (4,72 %). Cela montre bien l'effet joué par le super plastifiant de l'huile d'olive.

L'ajout de l'adjuvant Médaflow 30, à provoqués une diminution considérable d'eau, par conséquent, une diminution du rapport eau/liant. Cela était nécessaire pour réaliser des

augmentations comparables des résistances. À 28 jours, on observe une tendance d'augmentation des valeurs de la résistance à la flexion comparé à ceux de 14 jours. Pour tous les mortiers de cette variante la valeur la plus élevée est de (3,61 MPa), qui correspond au mortier (MB4). Cela est dû à la Portlandite qui n'a pas réagi et qui continue à se carbonater et augmenter la résistance à la flexion des mortiers.

À 28 jours, Les meilleures valeurs sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Pour tous les mortiers. La valeur la plus élevée de la résistance à la compression est de (2,77 MPa), qui correspond au mortier (MB4). Mortier avec substitution de 2/3 de volume d'agrégats par la brique pillée avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Par ailleurs, les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de brique pillée et de l'huile d'olive. Qui varient entre (0,39 à 0,48 MPa).

La masse cumulée de l'eau absorbée évolue et augmente de façon quasi-constante jusqu'à $t = 240$ minutes (soit 4 heures) et ce, pour les différents échantillons de mortiers formulés sans ajout de médaflow ni de l'huile d'olive.

La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier (MB1) estimée à $49,7 \text{ g/cm}^2$. Mortier avec substitution de 2/3 de volume d'agrégats par la brique pillée mais sans adjuvant.

La même évolution des masses cumulées de l'eau absorbée pour les échantillons de mortiers formulés substitution d'agrégats par la brique pillée et avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Mais avec des valeurs inférieures, La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier (MB4) estimée à $32,8 \text{ g/cm}^2$. Mortier avec substitution de 2/3 de volume d'agrégats par la brique pillée avec ajout de l'adjuvant Médaflow.

Par ailleurs, les valeurs des masses cumulées de l'eau absorbée les plus faibles sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de brique pillée et de l'huile d'olive. Une évolution presque linéaire est observée pour ces types de mortiers formulés. La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier (MBH1) et estimée à $2,6 \text{ g/cm}^2$.

L'évolution des coefficients d'absorptions capillaires et les masses cumulées d'eau absorbées ont une tendance plus ou moins linéaire, ce qui démontre la structure homogène des mortiers préparés dans cette variante.

Variante 2 (V2) (Ajout de la pouzzolane).

La substitution de la chaux aérienne par la pouzzolane mise en œuvre influe les caractéristiques physiques, mécaniques et hydriques des mortiers étudiés.

Le test de porosité et de l'absorption, réalisé sur des éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce quelque soit le volume de la pouzzolane substitué et le type d'ajouts ajouté.

Dans cette variante, l'échantillon (MP3) mortier avec substitution de 30 % de la chaux par la pouzzolane mais sans adjuvant est le plus poreux avec une valeur maximale de porosité ouverte estimée à (25,65 %), et une valeur d'absorption estimée à (14,2 %).

L'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers a induit une diminution des valeurs de la porosité et de l'absorption. Pour tous les mortiers confectionnés dans cette variante, l'échantillon (MP10) mortier avec substitution de 50 % de la chaux par la pouzzolane avec adjuvant médaflow 30, enregistre la plus petite valeur de porosité ouverte estimée à (18,92 %), et de l'absorption estimée à (9,55 %).

L'ajout de l'adjuvant Médaflow 30 a provoqué des augmentations comparables des résistances mécaniques. À 28 jours, on trouve une augmentation des valeurs des résistances mécaniques comparées à ceux de 14 jours. Les meilleures valeurs sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée de la résistance à la flexion est (0,78 MPa) et la résistance à la compression (3,07 MPa), qui correspond au mortier (MP10). Mortier avec substitution de 50 % de la chaux par la pouzzolane, avec ajout de l'adjuvant Médaflow.

Les masses cumulées de l'eau absorbées de cette variante évolues et augmentes de façon quasi-constante jusqu'à t = 240 minutes (soit 4 heures) et ce, pour les différents échantillons

de mortiers. La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier (MP7) estimée à $(35,6 \text{ g/cm}^2)$.

Les coefficients d'absorption par capillarité (i) varient entre 2,83 et $3,76 \text{ g/cm}^2$. Le mortier (MP7) présente la plus basse valeur d'absorption par capillarité estimée à (2,83 %) comparée aux autres mortiers. D'autre part, Les résultats des tests des coefficients (i) montrent aussi que plus la teneur en pouzzolane augmente dans les mortiers en particulier ceux adjuvantés, plus les valeurs des coefficients (i) s'éloignent de celle du mortier témoin, ils sont caractérisés par des valeurs d'absorption par capillarité moins importantes.

Variante 3 (V3) (Ajout de la pouzzolane et de la brique pillée).

La substitution de la chaux aérienne par la pouzzolane broyée et la brique pillée mise en œuvre ont une influence sur les caractéristiques physiques, mécaniques et hydriques des mortiers étudiés. L'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MBP6, MBP7, MBP8, MBP9 et MBP10) a induit une diminution des valeurs de la porosité ouverte et d'absorption d'eau. L'échantillon (MBP10) mortier avec substitution de 50 % de la chaux par la pouzzolane et la brique avec adjuvant Médaflow 30, enregistre la plus petite valeur de la porosité ouverte estimée à (23,50 %) et de l'absorption qui est égale à (12,8 %).

À 28 jours, on observe une tendance d'augmentation des valeurs de la résistance à la flexion comparé à ceux à 14 jours. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée est de 0,96 MPa, qui correspond au mortier (MBP7) mortier avec la substitution de 20 % de la chaux par la pouzzolane et la brique avec adjuvant Médaflow 30.

La résistance à la compression des mortiers suit le comportement de la résistance à la flexion. À 28 jours, les résultats de la résistance à la compression changent dans une plus grande dimension comparée aux valeurs de la résistance à la flexion. Les meilleures valeurs sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée de la résistance à la compression est de 3,08 MPa, qui correspond au mortier (MBP7). Mortier avec substitution de 20 % de la chaux par la pouzzolane et la brique pillée avec adjuvant Médaflow 30.

La masse cumulée de l'eau absorbée évolue et augmente de façon quasi-constante jusqu'à $t = 240$ minutes (soit 4 heures) et ce, pour les différents échantillons de mortiers. La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier MBP6 estimée à $31,5 \text{ g/cm}^2$, avec un coefficient d'absorption capillaire (i) égale à $2,44 \text{ g/cm}^2$.

Variant 4 (V4) (Ajout de métakaolin).

La substitution de la chaux aérienne par le métakaolin mise en œuvre influe les caractéristiques physiques, mécaniques et hydriques des mortiers étudiés.

Le test de porosité et de l'absorption, réalisé sur des éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce quelque soit le volume de la pouzzolane substitué .

Le test de porosité ouverte, réalisé sur des éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce quelque soit la teneur en métakaolin ajoutée. Il existe une relation de proportionnalité inverse entre la porosité ouverte et l'absorption et le taux de métakaolin ajouté. En effet, plus le taux du métakaolin augmente, la porosité et l'absorption des échantillons diminue, il a été montré également que les mortiers contenant plus de métakaolin donnent davantage de produits d'hydratation. Ces derniers ont des pores de faibles diamètres, caractéristiques des C-S-H (hydrosilicate de calcium).

Les résultats montrent également que l'échantillon (MM1) contenant 10 % de métakaolin sans adjuvant est le plus poreux avec une valeur maximale de porosité ouverte estimée à (24.64 %) et une valeur d'absorption maximale estimée à (13,98 %). Cette valeur est très proche de celle enregistrée par le mortier témoin (MO), élaboré sans ajout (métakaolin) ni adjuvant.

Les échantillons qui contiennent du métakaolin dosé avec superplastifiant présentent des valeurs de porosité ouverte et d'absorption moins importantes.

Le mortier (MM10) dosé avec 50 % du métakaolin et 2% de superplastifiant possède la plus faible valeur de porosité ouverte qui est égale à (19,08 %), et la plus petite valeur d'absorption qui est égale à (10,17 %).

À 28 jours, on observe une tendance d'augmentation des valeurs de la résistance à la flexion comparé à ceux à 14 jours. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée est de (0,48 MPa), qui correspond au mortier (MM6) mortier avec la substitution de 10 % de la chaux par le métakaolin avec adjuvant. Cela est du à la Portlandite non réagi qui a continué à se carbonater et augmenter la résistance à la flexion des mortiers.

A priori, on peut distinguer que les valeurs des résistances à la flexion sont inférieures à celles enregistrées à la compression. Les valeurs des résistances à l'âge de 14 jours sont triplées à 28 jours et cela pour l'ensemble des échantillons.

Les résultats de la caractérisation mécanique montrent une évolution identique entre la résistance à la flexion et à la compression où les performances mécaniques des échantillons chutent avec l'augmentation du taux massique du métakaolin substitué, il semblerait que la demande en eau du métakaolin est aussi semblable à celle de la chaux. Les auteurs rapportent que la consistance des mortiers diminue avec l'augmentation de la teneur en métakaolin. Cela est expliqué par le besoin important en eau du métakaolin due notamment à sa finesse de mouture.

L'ajout du super plastifiant améliore nettement les résistances mécaniques que ce soit en flexion ou en compression grâce notamment à la diminution de la quantité d'eau versée (réduction du rapport eau/liant), le manque de fluidité des mortiers à l'état frais est compensé essentiellement par le super plastifiant.

La valeur de la résistance mécanique à la flexion la plus élevée est estimée à (0,48 MPa), enregistrée par l'échantillon contenant 10% de métakaolin (MM6). En outre, la plus grande résistance à la compression (1,38 MPa) a été enregistrée par le même échantillon MM6 dosé à 2 % d'adjuvant et la plus petite résistance en compression a été enregistrée par l'échantillon MM2 avec une valeur de (0,50 MPa), qui correspond au mortier contenant 20 % de métakaolin et non adjuvanté. Une amélioration des performances mécaniques est prévisible à long terme grâce notamment aux réactions pouzzolaniques entre le métakaolin et la chaux donnant ainsi naissance à de nouveaux cristaux qui contribuent à l'amélioration des résistances mécaniques.

La masse cumulée de l'eau absorbée évolue et augmente de façon quasi-constante jusqu'à $t = 240$ minutes (soit 4 heures) et ce, pour les différents échantillons de mortiers. Au-delà de ce temps, la masse d'eau absorbée par capillarité est nettement freinée, cela est due éventuellement à l'effet de la gravitation (cumul de la masse d'eau absorbée).

La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier MM10 estimée à $(36,2 \text{ g/cm}^2)$. Les résultats obtenus des coefficients (i) varient entre $(2,95 \text{ et } 3,66 \text{ g/cm}^2)$.

Variante 5 (V5) (Ajout de ciment naturel).

La substitution de la chaux aérienne par le ciment naturel mise en œuvre influe les caractéristiques physiques, mécaniques et hydriques des mortiers étudiés.

Le test de porosité et de l'absorption, réalisé sur les éprouvettes de mortiers montre clairement le caractère moins poreux de tous les échantillons confectionnés et ce quelque soit le volume de ciment naturel substitué.

L'échantillon (MC3) mortier avec substitution de 30 % de la chaux par le ciment naturel sans adjuvant est le plus poreux avec une valeur maximale de porosité ouverte estimée à $(28,62 \%)$ et d'absorption égale à $(16,19 \%)$.

L'ajout de d'adjuvant médaflow 30 aux mortiers (MC6, MC7, MC8, MC9 et MC10) a induit une diminution des valeurs de la porosité ouverte et de l'absorption. L'échantillon (MC10) mortier avec substitution de 50 % de la chaux par le ciment naturel avec adjuvant, enregistre la plus petite valeur de l'absorption elle est égale $(11,55 \%)$.

La résistance à la flexion des mortiers avec ajout de ciment naturel et de Médaflow 30 varient de $(0,11 \text{ à } 0,42 \text{ MPa})$. À 28 jours, on observe une tendance d'augmentation des valeurs de la résistance à la flexion comparé à ceux à 14 jours. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée est de $1,25 \text{ MPa}$, qui correspond au mortier (MC10) mortier avec la substitution de 50 % de la chaux par le ciment naturel avec adjuvant.

À 28 jours, les résultats de la résistance à la compression changent dans une plus grande dimension comparée aux valeurs de la résistance à la flexion.

Les meilleures valeurs sont enregistrées dans les mortiers avec ajout de l'adjuvant Médaflow. Pour tous les mortiers la valeur la plus élevée de la résistance à la compression est de (3,03 MPa), qui correspond au mortier (MC9). Mortier avec substitution de 40 % de la chaux par le ciment naturel avec adjuvant.

Récapitulatif

Il ressort des différents essais réalisés que l'introduction de différents matériaux (briques pillées, pouzzolane, métakaolin, ciment naturel, le médaflow et l'huile d'olive) dans la composition des mortiers par substitution de la chaux, a influencé les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers :

La substitution partielle de la chaux aérienne par (la brique pillée, la pouzzolane, le métakaolin, et le ciment naturel), contribue à l'équilibre entre les produits d'hydratation et les réactions pouzzolaniques.

La résistance mécanique des mortiers a été améliorée par la substitution partielle de la chaux aérienne par chaque type d'ajout, elle augmente en augmentant le pourcentage et en ajoutant l'adjuvant médaflow.

Une amélioration des caractéristiques physiques telle que l'absorption d'eau a été également constatée. L'utilisation de l'huile d'olive comme adjuvant améliore les performances physiques du mortier en diminuant ses teneurs d'absorption d'eau et de porosité, ce qui explique son utilisation dans les mortiers hydrofuges.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale.

- La valeur ajoutée apportée dans ce travail est l'usage des matériaux traditionnels (chaux aérienne, pouzzolane, brique pilée, l'huile d'olive, métakaolin, ciment naturel,) pour l'élaboration d'un mortier hydrofuge.
- Le travail est réalisé au niveau des laboratoires avec des moyens matériels modernes est des méthodes d'analyse scientifique précises. Cela nous a conduit à apporter une contribution au domaine de conservation et restauration des monuments historiques en Algérie (encore méconnu) avec la formulation d'un mortier hydrofuge pour restauration compatible avec les matériaux de la piscine romaine de Guelma. Il peut être utilisé dans d'autres monuments se trouvant dans les mêmes conditions et environnement.

- **Approche historique et archéologique**

La piscine antique de Guelma (Héliopolis) date de l'époque romaine, les bords du bassin et sa base ont été construits dans la tradition romaine, c'est-à-dire une vaste piscine de 35 mètres de diamètre, munie d'une bordure en pierre de taille large de 1 mètre. A ce jour, aucune datation n'a pu être établie par les archéologues par manque de repères.

En 1836, Berbrugger signalait la présence de la piscine romaine, en ce point géographique, le long des vestiges de la voie romaine. Une butte voisine était couverte de divers débris dont des inscriptions latines. La piscine a subi des travaux de déblayement et la restauration au début de l'année 1900 par l'archéologue Joly, ou les ruines du site livrèrent un bloc et une grosse plaque, tous deux de calcaire gris, gravés de caractères libyques et latins publiés en 1906.

- **Etat de conservation de la piscine romaine**

La piscine de Guelma se trouve dans un état de conservation désastreux. Les paramètres principaux responsables de la dégradation de la piscine de Guelma sont : l'abandon du site, les interventions non adéquates, l'altération des matériaux par vieillissement et action des paramètres extérieurs.

- **Caractérisation des matériaux de la piscine romaine**

L'analyse minéralogique, chimique et physique, montre que la composition des matières premières des mortiers est : **chaux+ sable+ ajout pouzzolanique**. La chaux est de nature dolomitique et l'ajout est composé d'argile calcinée (ou briques pilées) ce qui lui confère le caractère hydrofuge connu et utilisée durant la période romaine.

- **Caractérisation des mortiers élaborés au laboratoire**

La résistance mécanique des mortiers a été améliorée par la substitution partielle de la chaux aérienne par chaque type d'ajout utilisé dans cette étude, elle augmente en augmentant le

pourcentage et en ajoutant l'adjuvant médaflow. Cela présente une large gamme des résistances mécaniques selon le taux de l'addition ajoutée, ce qui leur confère la possibilité d'être applicables dans différentes maçonneries.

Une amélioration des caractéristiques physiques telle que l'absorption d'eau et la porosité a été également constatée. La formulation des mortiers au laboratoire fait ressortir que les différents ajouts utilisés dans cette étude ont améliorés les caractéristiques physiques et mécaniques. L'huile d'olive et le médaflow (30) diminuent les teneurs d'absorption d'eau et de porosité des mortiers et améliore leurs caractères hydrofuge.

Les valeurs du coefficient d'absorption d'eau par capillarité (*i*) sont faibles pour tous les mortiers étudiés ce qui montre l'aptitude d'un comportement meilleur de ces mortiers dans un environnement humide.

Les meilleures caractéristiques des mortiers formulés et aptes à être utilisées pour la restauration de la piscine de Guelma sont : L'échantillon (MBH1), mortier avec ajout de la brique pilée et 50 (ml) d'huile d'olive, le (MP10), mortier avec ajout de 40% de pouzzolane et 2 % de médaflow, le (MBP9), mortier avec ajout de la brique pillée ,50% de la pouzzolane et 2 % de médaflow et (MM1) mortier avec ajout de 50% de métakaolin et 2 % de médaflow.

- **Finalité**

L'utilisation des différents ajouts avec la chaux et adjuvants nous a permis d'élaborer une large gamme de mortiers à caractère hydrofuge. Nous recommandons leurs utilisations pour la restauration de la piscine romaine et dans d'autres monuments ayant le même environnement. Une fois la piscine est restaurée, nous recommandons de bien protégé ce site par une clôture, afin de garder son aspect esthétique, historique et archéologique et éviter les dégradations de ce site de grande valeur historique.

Liste des tableaux

Tableau 1.	Temps avant le début de la prise en fonction de l'indice d'hydraulicité (d'après Fournier 1975).	36
Tableau 2.	Exemples de valeurs de masses volumiques de métakaolins issues de la littérature.	52
Tableau 3.	Exemples de valeurs de masses volumiques de métakaolins issues de la littérature.	54
Tableau 4.	Composition chimique typique du métakaolin	54
Tableau 5.	Phases minéralogique des métakaolins (d'après Janotka, I)	55
Tableau 6.	Caractéristiques minéralogiques des métakaolins	60
Tableau 7.	Composition chimique et minéralogique type du ciment naturel prompt	61
Tableau 8.	Tableau descriptive des échantillons des mortiers prélevés de la piscine romaine de la ville de Guelma	113
Tableau 9.	La composition minéralogique des mortiers de piscine romaine de la ville de Guelma	115
Tableau 10.	Composition chimique des échantillons de mortiers prélevés de la piscine romaine de la ville de Guelma.	118
Tableau 11.	Les masses volumiques spécifiques des échantillons de mortiers prélevés	120
Tableau 12.	Les masses volumiques apparentes des échantillons de mortier prélevés	121
Tableau 13.	Résultats de l'humidité des échantillons de mortier prélevés	122
Tableau 14.	Résultats de PH des échantillons de mortier prélevés	123
Tableau 15.	Résultats de CaO libre	124
Tableau 16.	Résultats de l'absorption d'eau des échantillons de mortier prélevés	125
Tableau 17.	Tableau récapitulatif des résultats physiques	126
Tableau 18.	Les matières premières utilisées pour la formulation des mortiers	135
Tableau 19.	Masse volumique apparente des matières premières et ajouts utilisés	136
Tableau 20.	Les humidités des matières premières et ajouts utilisés	137
Tableau 21.	L'analyse granulométrique par tamisage du sable jaune	137
Tableau 22.	L'analyse granulométrique par tamisage du sable noire.	138
Tableau 23.	Le module de finesse des sables utilisés.	138
Tableau 24.	Caractéristiques des différentes variantes des mortiers	142
Tableau 25.	Composition de la première variante des mortiers à étudiés (ajout de la brique pilée et l'huile d'olive).	144
Tableau 26.	Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers formulés.	145
Tableau 27.	Les résistances mécaniques à la flexion des échantillons de mortier formulés.	152
Tableau 28.	Les résistances à la Compression des mortiers formulés.	153
Tableau 29.	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.	155
Tableau 30.	Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers étudiés.	156
Tableau 31.	Composition de la deuxième variante des mortiers (chaux+ pouzzolane).	161
Tableau 32.	Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers formulés.	156
Tableau 33.	Les résistances mécaniques à la flexion des mortiers formulés.	160
Tableau 34.	Les résistances mécaniques à la compression des mortiers formulés.	161 230

Tableau 35.	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers	163
Tableau 36.	Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers.	164
Tableau 37.	Composition de la troisième variante des mortiers (chaux+ pouzzolane+ brique pille).	169
Tableau 38.	Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers formulés	170
Tableau 39.	Les résistances mécaniques des mortiers de mortier formulés.	176
Tableau 40.	Les résistances mécaniques à la compression des mortiers formulés.	177
Tableau 41.	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.	179
Tableau 42.	Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers étudiés.	180
Tableau 43.	Composition de la quatrième variante des mortiers (Ajout de Métakaolin).	186
Tableau 44.	Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers .	187
Tableau 45.	Evolution des résistances mécaniques à la flexion des mortiers .	192
Tableau 46.	Les résistances mécaniques à la compression des mortiers	194
Tableau 47.	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers.	196
Tableau 48.	Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers .	197
Tableau 49.	Composition de la cinquième variante des mortiers (chaux+ ciment naturel).	203
Tableau 50.	Résultats des essais physiques des échantillons de mortiers .	204
Tableau 51.	Les résistances mécaniques à la flexion des mortiers.	210
Tableau 52.	Les résistances mécaniques à la compression des mortiers	212
Tableau 53.	Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers.	214
Tableau 54.	Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers.	215

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Fig.1.	Plan de travail général.	6
Fig.2.	villa Mahiédinne d'Alger. (HMC10).	21
Fig.3	.la forteresse de Santa Marta à Cascais et le mur de défense de la ville de Lisbonne (HMC10)	22
Fig.4.	Application des mortiers in-situ (La citadelle d'Alger). M. Belaidi.	23
Fig.5	four à chaux st-Claude .	29
Fig.6	Schéma simplifié de cycle de chaux.	33
Fig.7	.Structure de la kaolinite $Si_2Al_2O_5(OH)_4$.	47
Fig.8	Spectres d'analyses thermiques gravimétrique (TGA) et différentielle de kaolin (ATD). (San Nicolas R)	48
Fig.9.	Photo d'un four rotatif .	50
Fig.10	Four à plateaux (type Herreshoff)	51
Fig.11	Photo de four flash de l'entreprise Malet, (d'après Salvador S).	52
Fig.12	Observations au microscope électronique à balayage de la structure en plaquettes de métakaolin, (d'après Cyr M) ⁸⁷ .	53
Fig.13	Four vertical.	57
Fig.14	Broyeur rotatif à boulets.	58
Fig.15	cinétique de durcissement sur 10 ans. .	59
Fig.16	Cinétique de durcissement en fonction du dosage et du rapport eau/ciment.	59
Fig.17	diagramme de la composition chimique du ciment naturel Prompt.	60
Fig.18	Cinétique de durcissement sur 10 ans.	62
Fig.19	Sceller un gond au ciment naturel prompt.	62
Fig.21	Manque d'adhérence des mortiers	70
Fig.22	Présence de fissure dans le mortier	71
Fig.23	Décomposition des dépôts biologiques sur la surface de matériaux	74
Fig.24	Action de la pollution atmosphérique	75
Fig.25	La détermination de la masse volumique absolue. (M. Belaidi)	86
Fig.26	La détermination de la masse volumique apparente. (M. Belaidi)	88
Fig.27	Calcul de pH à l'aide d'un pH mètre. (M. Belaidi)	89
Fig.28	détermination de la teneur en CaO libre par la méthode de Saccharose. (M. Belaidi)	89
Fig.29	Essai de l'absorption par capillarité. Laboratoire centrale de l'ENGOA. (M. Belaidi).	91
Fig.30	Tamiseuse. (M. Belaidi).	92
Fig.31	Essai de flexion 3 points sur les éprouvettes 4x4x16 cm. (M. Belaidi).	93
Fig.32	Essai de compression sur les éprouvettes 4x4x16 cm. (M. Belaidi).	93
Fig.33	Principe de la fluorescence X.	94
Fig.34	Un spectromètre de fluorescence X	95
Fig.35	Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés	96
Fig.36	Situation géographique de la piscine romaine de Guelma. (M. Belaidi)	101
Fig.37	Le théâtre romain de Guelma.	102
Fig.38	Arc de triomphe (état de 1893).	103
Fig.39	La Piscine romaine Héliopolis	104
Fig.40	La piscine Romaine de Guelma	104
Fig.41	Photo d'effondrement d'une partie situé au nord est d'un mur de la	105

	piscine (M. Belaidi).	
Fig.42	Perte de masse des pierres et mortier d'un mur intérieur de la piscine. (M. Belaidi).	105
Fig.43	Perte de masse des pierres à l'intérieur du mur de la piscine. (M. Belaidi).	105
Fig.44	Perforations des pierres du mur intérieur de la piscine. (M. Belaidi).	106
Fig.45	Plantes poussant sur pierres du mur intérieur et fond de la piscine. (M. Belaidi).	106
Fig.46	Fissuration de mortier de jointement du mur extérieur de la piscine. (M. Belaidi).	106
Fig.47	Fissuration de mortier de pose du mur intérieur de la piscine. (M. Belaidi).	107
Fig.48	Localisation de l'échantillon (M01) prélevé de la piscine romaine de Guelma. (M. Belaidi).	107
Fig.49	Localisation de l'échantillon (M02) prélevé de la piscine romaine de Guelma. (M. Belaidi).	108
Fig.50	Localisation de l'échantillon (M03) prélevé de la piscine romaine de Guelma. (M. Belaidi).	108
Fig.51	Organigramme des étapes principales de caractérisation des échantillons prélevés de la piscine romaine.	110
Fig.52	Le diagramme RX de l'échantillon de mortier (M01) prélevé de la piscine romain..	112
Fig.53	Le diagramme RX de l'échantillon de mortier (M02) prélevé de la piscine romaine	113
Fig.54	Le diagramme RX de l'échantillon de mortier (M03) prélevé de la piscine romaine	113
Fig.55	Les étapes de mesure de la masse volumique spécifique avec un pycnomètre. (M. Belaidi).	115
Fig.56	Histogramme des masses volumiques spécifiques des mortiers.	116
Fig.57	Les étapes de mesure de la masse volumique apparente. (M. Belaidi).	117
Fig.58	Histogramme des masses volumiques apparentes des mortiers.	117
Fig.59	Etuve de séchage. (M. Belaidi).	118
Fig.60	Histogramme des humidités des mortiers.	118
Fig.61	"pH" mètre. (M. Belaidi).	119
Fig.62	Détermination de la teneur en CaO libre méthode analytique. (M. Belaidi).	124
Fig.63	Histogramme des teneurs en CaO libre des mortiers.	120
Fig.64	Histogramme des absorptions d'eau des mortiers.	121
Fig.65	Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation des mortiers	128
Fig.66	l'appareillage de la masse volumique apparente. (M. Belaidi).	132
Fig.67	Analyses granulométriques des différent sables (jaune, noir).	135
Fig.68	Malaxeur rotatif des mortiers. Laboratoire centrale de l'ENGOA.	135
Fig.69	Essai d'étalement au cône. (M. Belaidi).	136

Fig.70	Opération de moulage des éprouvettes. (M. Belaidi).	137
Fig.71	Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation de la première variante des mortiers (Ajout de la brique pilée et l'huile d'olive).	139
Fig.72	Les masses volumiques absolues des mortiers formulés.	142
Fig.73	Les masses volumiques apparentes (Mv) des mortiers formulés.	143
Fig.74	Les humidités des mortiers formulés.	144
Fig.75	Les potentiels hydrogènes (pH) des mortiers formulés.	145
Fig.76	La porosité ouverte (Po) des échantillons de mortier de la première variante (Chaux + brique pilée).	146
Fig.77	L'absorption d'eau des échantillons des mortiers formulés.	147
Fig.78	La résistance à la flexion (R _f) des mortiers formulés.	148
Fig.79	La résistance à la compression des mortiers formulés.	150
Fig.80	La masse d'eau cumulée.	151
Fig.81	Le coefficient d'absorption capillaire (i).	153
Fig.82	La corrélation entre l'absorption de l'eau et la résistance à la compression.	153
Fig.83	La corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression	154
Fig.84	Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation de la deuxième variante de mortier (chaux +pouzzolane).	155
Fig.85	Les masses volumiques absolues des mortiers formulés.	158
Fig.86	Les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.	159
Fig.87	Les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.	160
Fig.88	Les pH des mortiers formulés.	160
Fig.89	La porosité des mortiers formulés.	161
Fig. 90	L'absorption des mortiers formulés.	162
Fig.91	La résistance à la flexion à 28 jours des mortiers formulés.	163
Fig.92	La résistance à la compression à 28 jours des mortiers formulés.	165
Fig.92	L'absorption d'eau des échantillons des mortiers formulés.	166
Fig.93	La résistance à la flexion (R _f) des mortiers formulés.	167
	Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.	167
Fig.94	.Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.	168
Fig.95	Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.	168
Fig.96	Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.	169
Fig.97	Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation de la troisième variante de mortier (Ajout de la pouzzolane et la brique pilée).	170
Fig. 82 <u>98</u>	Les masses volumiques absolues des mortiers formulés	173
Fig. 82 <u>99</u>	Fig. 83 <u>99</u> . La masse volumique apparente des mortiers formulés	174
Fig. 82 <u>100</u>	Fig. 84 <u>100</u> . L'humidité des mortiers formulés. M. Belaidi.	175
Fig. 82 <u>101</u>	Fig. 85 <u>101</u> . Le pH des mortiers formulés. M. Belaidi.	175
Fig. 82 <u>102</u>	La porosité ouverte Po des mortiers formulés.	177
Fig. 82 <u>103</u>	L'absorption des mortiers formulés. M. Belaidi.	178
Fig. 82 <u>104</u>	La résistance a la flexion des mortiers formulés.	180
Fig. 82 <u>105</u>	<u>La</u> résistance a la compression des mortiers formulés formulés <u>M.</u>	180

	Belaidi.	
Fig._82106	La masse d'eau cumulée des mortiers formulés. M. Belaidi.	181
Fig._82107	Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.	182
Fig._82108	La corrélation entre l'absorption d'eau et la résistance à la compression des mortiers formulés.	184
Fig._82109	La corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression des mortiers formulés.	184
Fig._82110	La résistance a la compression des mortiers formulés formulés M. Belaidi.	186
Fig._82111	La masse d'eau cumulée des mortiers formulés. M. Belaidi.	183
Fig._82112	Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés. M. Belaidi.	185
Fig._82113	La corrélation entre l'absorption d'eau et la résistance à la compression des mortiers formulés.	185
Fig.114	Organigramme des principales étapes suivies dans la formulation de la deuxième variante de mortier (chaux +pouzzolane).	186
Fig.115	Les masses volumiques absolues des mortiers formulés.	183
Fig.116	Les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.	184
Fig.117	Les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.	185
Fig.118	Les pH des mortiers formulés.	185
Fig.119	La porosité des mortiers formulés.	186
Fig.120	L'absorption des mortiers formulés.	187
Fig.121	La résistance à la flexion à 28 jours des mortiers formulés.	188
Fig.122	La résistance à la compression à 28 jours des mortiers formulés.	180
Fig.123	La masse d'eau cumulée des mortiers formulés.	191
Fig.124	Le coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers formulés.	199
Fig.125	La corrélation entre l'absorption de l'eau et la résistance à la compression des mortiers formulés.	200
Fig.127	La corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression des mortiers formulés.	208
Fig.128	Les masses volumiques absolues des mortiers formulés.	208
Fig.129	Les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.	211
Fig.130	Les masses volumiques apparentes des mortiers formulés.	213
Fig.131	Les pH des mortiers formulés.	213
Fig.132	Les masses volumiques absolues des mortiers formulés.	214
Fig.133	La masse d'eau cumulée des mortiers formulés.	215
Fig.134	La corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression des mortiers formulés.	216
Fig.135	La corrélation entre l'absorption et la résistance à la compression des mortiers formulés.	217

~~M. Belaidi.~~

Bibliographie

- 1.L. Bertolini, M. Carsana, M. Gastaldi, F. Lollini, E. Redaelli ,Binder characterization of mortars used at different ages in the San Lorenzo church in Milan. *Materials characterization* 80 (2013) 9-20.
- 2.D. Miriello , D. Barca, A. Bloise,A. Ciarallo, M .Gino Crisci,T. De Rosea,C. Gattuso, F. Gazineo, F .Mauro, La Russa, Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. *Journal of Archaeological Science* 37 (2010) 2207–2223.
- 3.F .Caro', Riccardi, MP. Mazzilli, MT. Savini. Characterization of plasters and mortars as a tool in archaeological studies: the case of Lardirago castle in Pavia, Northern Italy. *Archaeometry* 50 (2008) 85–100.
- 4.A. Boato, T .Mannoni. Materials and techniques in port Genoa: pozzolana concretes from the modern age to the industrial revolution. *Sci Beni Cult*; 9(1993) 12–20.
- 5.S. Kramara, V. Zalar, M .Urosevic, W. Körner, A .Mauko, B. Mirtič, Mineralogical and microstructural studies of mortars from the bath complex of the Roman villa rustica near Mošnje (Slovenia). *Materials Characterization*.62 (2011) 1042–1057.
- 6.These, sandrine ecrepont, Compatibilité des mortiers de restauration : contribution à l'étude de la migration des fluide
7. E. Aggelakopoulou, A. Bakolas , A. Moropoulou, Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars.*Construction and Building Materials* 225 (2019) 633–641.
- 8.A. Ali Al-Rawas, A. WahidHago , Evaluation of field and laboratory produced burnt clay pozzolans, *Applied Clay Science* 31 (2006) 29– 35.
9. J. Mellaart, et al, une des premières cités du monde, Paris 1971, p. 50.
10. Furlan, Vi nicio .Les mortiers anciens : histoire et essais d'analyse scientifique, *Revue suisse d'Art et d'archéologie*1975, p 2.
11. R. R. Schmidt, Établissements néolithiques dans le Fedeseemoor, Stuttgart 1937, p. 58-67.
12. J. Hoika Einige Analyseergebnisse zur Frage der Inkrustation in Keramikverzierungen der nordischen Trichterbecherkultur, *Archäologisches Korrespondenzblatt*, p. 79.

13. M. Daumas, Histoire générale des techniques, Paris PUF 1962, p. 403.
14. A. Orlandos, Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs, Paris vol2, (1968), p. 13.
15. D.R. Caton, De re rustica. Les agronomes latins, Paris 1861.
16. G. Lugli, La technica edilizia romana con particolare riguardo a Roma et Lazio, Roma 1957, vol. I—II.
17. P. M. Vitruve, OEuvres complètes, Ed. Et trad, par Auguste Choisy, Paris 1971, 2 vol., 1.1, chap. II, V, VI, t. II, chap. IV, VI.
18. M. Daumas, Histoire générale des techniques, Paris PUF 1962, Tome. I, p. 220.
19. C. Granges, Chaux et sels de chaux, Paris, (1894).
20. Coutelas A., Büttner S., Oberlin C., Palazzo-Bertholon B., Prigent D., Sumera F., Le mortier de chaux, Paris, Errance. (2009).
21. Vitruve, De architectura : les dix livres d'architecture, Poitiers, Picon.LII, 1995, p 5
22. Deloye F.-X., « Hydraulicité et pouzzolanité », Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et chaussées, no 184, (1993), p. 94-95.
23. Hughes J. J. et Sugden D, « The use of brick dust as a pozzolanic addition to hydraulic lime mortars », International RILEM Workshop on Historic mortars : characteristics and tests, Paris, RILEM, (1999), p. 351-360.
24. Dron R, « L'activité pouzzolanique », Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et chaussées, no 93, (1978), p. 66-69.
25. Coutelas A., Büttner S., Oberlin C., Palazzo-Bertholon B., Prigent D., Sumera F., , Le mortier de chaux, Paris, Errance. (2009).
26. Furlan, Vi nicio .Les mortiers anciens : histoire et essais d'analyse scientifique, Revue suisse d'Art et d'archéologie 1975, p 4.
27. E. Hennig, et R.D. Bleck. W. Horn, The potential and limitations of Radiocarbon dating in the Middle Ages; the art historians view, Scientific Methods in Medieval archaeology, University of California Press .(1970).
28. A. Naef, Chillon. T.I: La Camera Domini, Genève 1908, p. 50.
29. Furlan, Vi nicio .Les mortiers anciens : histoire et essais d'analyse scientifique, Revue suisse d'Art et d'archéologie 1975, p 5.
30. E. Marcotte, Liants, chaux, ciments, plâtres, goudrons et bitumes, Paris 1929, p. 3-4.
31. Encyclopedia Universalis, cf. article ciment, p. 493.
32. Furlan, Vi nicio .Les mortiers anciens : histoire et essais d'analyse scientifique, Revue suisse d'Art et d'archéologie 1975, p 6.

33. Naima Abderrahim Mahindad and Messaoud Hamiane, 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, Prague, Czech Republic, 22-24 September (2010).
34. Messaoud Hamiane, S.Aitouakli, L.Boumghar, W.Zekagh and M.Saidi, 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, Prague, Czech Republic, 22-24 September (2010).
35. Cristina Borges, Antonio Santos Silva and Maria do Rosário Veiga, 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, Prague, Czech Republic, 22-24 September (2010).
36. M. Hamiane, M. Belaidi, M. Saidi, W. Zekagh, B. Benacer, The characteristics and evolution of different lime plasters used in historical monuments (Case Study - the citadel of Algiers), 3rd Historic Mortars Conference 11-14 September, Glasgow, Scotland, (2013).
37. M. Belaidi, directeur de these M.Hamiane. Etude des caractéristiques des mortiers de chaux pour l'utiliser dans la restauration, cas de la Citadelle d'Alger, mémoire de magister ,Université d'Alger 2, Institut d'archéologie, 2012.
38. M.Hamiane, N. Mahinded, S. Dressi, A. Boukenouf, W.Zekar, M.Saidi, Characterisation of historic mortars, case of Roman, Byzantine and Ottoman periods in Algeria, 4th Historic Mortars Conference - HMC 2016 ,10-12 October , Santorini, Greece, (2016).
38. E. Vejmelková, M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner, R. Černý, Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar. *Cem. Concr. Compos.*, 34(4) (2012), p 486-492.
39. J. Válek, T. Matas. Experimental Study of Hot Mixed Mortars in Comparison with Lime Putty and Hydrate Mortars. Dordrecht: Springer Netherlands. (2012), p269-281.
40. M.A.O. Mydin, Physico-mechanical properties of lime mortar by adding exerted egg albumen for plastering work in conservation work. *J. Mater. Environ. Sci.*, 9(2) (2018) 376-384.
41. M.Hamiane, M.Belaidi, M.SAIDI, B.B. W. Zekagh. The characteristics and evolution of different lime plasters used in historical monuments (Case Study - the citadel of Algiers) in Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13. Glasgow, Scotland (UK): University of the West of Scotland. (2013), p 233-239.
42. E. Aggelakopoulou, A. Bakolas, A. Moropoulou, Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. *Constr. Build. Mater.* 225 (2019) , p 633-641.

38. E. Vejmelková, M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner, R. Černý, Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar. *Cem. Concr. Compos.*, 34(4) (2012), p 486-492.
39. J. Válek, T. Matas. *Experimental Study of Hot Mixed Mortars in Comparison with Lime Putty and Hydrate Mortars*. Dordrecht: Springer Netherlands. (2012), p269-281.
40. M.A.O. Mydin, Physico-mechanical properties of lime mortar by adding exerted egg albumen for plastering work in conservation work. *J. Mater. Environ. Sci.*, 9(2) (2018) 376-384.
41. M.Hamiane, M.Belaidi, M.SAIDI, B.B. W. Zekagh. The characteristics and evolution of different lime plasters used in historical monuments (Case Study - the citadel of Algiers) in *Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13*. Glasgow, Scotland (UK): University of the West of Scotland. (2013), p 233-239.
42. E. Aggelakopoulou, A. Bakolas, A. Moropoulou, Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. *Constr. Build. Mater.* 225 (2019) , p 633-641.
43. Diderot.M, D'alembert (1751-1772.). *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences des arts et des métiers*, Le Breton, Durand, David l'aîne et Briasson, Paris.
44. Bernard A., Millet J., Hommey R. et Poindefert A. Influence de la température de cuisson et de la nature du calcaire sur la minéralogie des chaux vives. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, (1975), p 79, 45-50.
45. Coutelas, (La description de Caton l'ancien, trad. R.Goujard est reportée dans, *De Agri Cultural*, Paris, Société d'édition Les Belles Lettres, coll. «Universités de France», (1975).
46. Lavergne D. et Sumera F. (2000) .La fabrication de la chaux : une activité pérenne ou occasionnelle pendant l'Antiquité gallo-romaine ? Premiers éléments de réponse. *In Pétrequin P., Fluzin P. Thiriot J. et BenoitP. (dir.) – Arts du feu et productions artisanales. XXe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*, 21-23 octobre 1999. Editions APDCA, Antibes, 453-472.
47. Coulthard N. Les activités artisanales gallo-romaines à Touffréville (Calvados, France), et quelques réflexions sur leur importance dans le développement du site. *In POLFER M. dir. – Artisanat et productions artisanales en milieu rural dans les provinces du nord-ouest de l'Empire romain*. Actes du colloque d'Erpeldange, mars (2000). Monographies *instrumentum* 9, éditions Monique Mergoïl, 165-183.
48. Adam J.-P. *La construction romaine : matériaux et techniques*. 3ème édition. Grands manuels Picard, éditions A. et J. Picard. (1995).

49. Moropoulou A., Bakolas A., Aggelakopoulou E. – The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. *Cement and concrete research*, (2001) .31 (4), 633-639
50. Vitruve – livre VII, traduit par Liou B. et Zuinghedau M., commenté par Cam M.-Th., *Vitruve, De Architectura*, Paris, Les Belles Lettres (1995).
51. Pline l'Ancien – *Histoire naturelle*. Livre XXXVI. Texte établi par Andre J., traduit par Bloch R. et commenté par Rouveret A. ; Collection université de France, édition Les Belles Lettres, Paris, 1981.
52. Malinowski r. Concretes and mortars in ancient aqueducts. *Concrete International / January*, (1979). p. 66- 76.
53. Palazzo. Bertholon. *Histoire, archéologie et archéométrie des mortiers et des enduits au Moyen Age*. Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon II, (1998), p.27
54. Pline l'Ancien, *Hist. Nat.*, XXXVI, Texte établi par Andre J., traduit par Bloch R. et commenté par Rouveret A. Collection université de France, édition Les Belles Lettres, Paris, (1981).p55)
55. (Lavergne et Suméra. La fabrication de la chaux : une activité pérenne ou occasionnelle pendant l'Antiquité gallo-romaine Premiers éléments de réponse. In Pétrequin P., Fluzin P. Thiriot J. et BenoitP. (dir.) – *Arts du feu et productions artisanales*. XXe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 21-23 octobre (1999).
56. Canonge p. Autric F., Nourissier G.. *Techniques et pratique de la chaux*. Ecole d'Avignon, Editions Eyrolles. (1998). p 211.
57. Deloye F.-X. La chaux à travers les âges. *Bull. des Labo. P. et Ch.*, 201, (1996). p. 94-98.
58. J.P Adams, la construction romaine. p.76.
59. Canonge p. Autric f., Nourissier g. techniques et pratique de la chaux. ecole d'avignon, editions eyrolles. (1998). p 211 .
60. charola. a.e. and henriques f.m.a. (2000). *hydraulicity in lime mortars revisited*. in bartos p., groot c. and hughes j.j. ed. – historic mortars: characteristics and tests. proceedings (pro 12) of the international rilem workshop, paisley (scotland), 12th-14th may 1999, 95-104.
61. banfill p.f.g. and forster a.m. (2000). a relationship between hydraulicity and permeability of hydraulic lime. *in bartos p., groot c. and hughes j.j. ed. – historic mortars : characteristics and tests. proceedings (pro 12) of the international rilem workshop, paisley (scotland), 12th-14th may 1999, 173-193.*
62. Venuat.M. Le traitement des sols à la chaux, Ed par l'hauteur, Chatillon sur Bagneux. (1980).

63. Frizot. M. *Mortiers et enduits peints antiques. Etude technique et Archéologique*, université de Dijon, centre de recherches sur les techniques gréco-romaines. (1975). p26
64. Canonge p. Autric F., Nourissier G. *Techniques et pratique de la chaux*. ecole d'avignon, editions eyrolles. (1998). p 30.
65. Commentaires de P. Gros du livre II (traduction Callebat, 1999), note 4.1.2.
66. (*De Architectura*, II, 3) Le traité de Vitruve, *De Architectura* constitue l'ouvrage de base qui relate toutes les techniques de construction de l'antiquité, il a été traduit et commenté par plusieurs auteurs.
67. (*De l'architecture*, livre IV, 1) édit. P. Gros, Coll. des Univ. De France, Paris, 1992.
68. Furlan V. et Houst Y. (1980). *Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation*. Chantiers, 7/80, P 30
- 69 Charola A.E. and Henriques F.M.A. *Hydraulicity in lime mortars revisited*. In Bartos P. Groot C. and Hughes J.J. ed. – Historic mortars: characteristics and tests. Proceedings (PRO 12) of the International RILEM Workshop Paisley (Scotland), 12th-14th May (1999) , 95-104.
70. Furlan V. et Houst Y. (1980). *Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation*. Chantiers, 7/80, P 30
71. Furlan V. et Houst Y. (1980). *Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation*. Chantiers, 7/80, P 30
72. Furlan V. et Houst Y. *Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation*. Chantiers, (1980) .7/80, P 30
73. Baronio G., Binda I. and Lombardini N.. *The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks*. Construction and Building Materials, (1997) . p 33-40.
74. Teutonico j.M., Ashall G., Garrod E. and Yates T. *A comparative study of hydraulic lime based mortars*. In Bartos P., Groot C. and Hughes J.J. ed. – Historic mortars : characteristics and tests.Proceedings (PRO 12) of the International RILEM Workshop, Paisley (Scotland), 12th-14th May (1999), P339-349.
75. Baronio g., Binda I. and Lombardini N. *The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks*. Construction and Building Materials, (1997). p. 33-40.
76. Francini et al(1999)48.
77. K. SALHI, performance des mortiers et bétons a base des ciments contenant du metakaolin algerien, these doctorat, université Biskra, (2021), p5.

78. B v B.C.: Proceedings of the 7th International Conference of AAR, Ed. Grattan-Bellow, (1985), p. 66-70,
79. Christelle Bich.: « Contribution a l'étude de l'activité thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2005).
80. Christelle Bich.: « Contribution a l'étude de l'activité thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2005).
81. Brindley G.W., Nakahira M.: «The kaolinite-mullite reaction series: I: survey of outstanding problems. II: metakaolin. III: the high temperature phase.», Journal of American Ceramic Society, vol. 42, (1959), p311-324.
82. Bensted, J. And Barnes, P.: «*Structure and Performance of Cements.*», 2nd ed., New York: Spon Press. (2002).
83. San Nicolas R., « *Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash* », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2011
84. E. Badogiamis, G. Kakali And S. Tsvilis.: « Metakaolin as supplementary cementitious material. », Journal of Thermal Analysis and calorimetry 81,.(2005), p. 457-462
85. F. Moodi, A.A. Ramezani pour, A.Sh. Safavizadeh: «*Evaluation of the Optimal Process of Thermal Activation of Kaolins .*», Sientia Iranica, (2011)
86. Christelle Bich.: « Contribution a l'étude de l'activité thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2005).
87. https://www.impexequip.com/equip_calcination.
88. Christelle Bich.: « Contribution a l'étude de l'activité thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2005).
89. Davies T. W. «*Equipment for the study of flash heating of particle suspension.*», High temperature technology, vol. 2, 3, (1984), , p141-147 .
90. Dunn J.G., : «Pilot-scale study of effect of particles on particle size on flash smiting of nickel sulphide concentrates, vol. 100 ,(1999), p105-109
91. Salvador S. : «*Prototyping flash calciners for manufacture synthetic pouzzolana from kaolinite clay.*», Nato Asi Series Eapplies Sciences, 1995, vol. 282, p295-318.

92. Poon C.S., Lam L., Kou S.C., Wong Y.L., Wong R., : « Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes .», *Cement and Concrete Research*, , Vol. 31, 1306.(2001). p1301.
93. Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S., Vidal, T.: «Metakaolin in the formulation of UHPC.*Construct. Build. Mater.* 23(2), (2009).p 669–674
94. Mindess, S., Young, F.J. and Darwin, D.: *Concrete*, 2nd ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, NJ 07458, U.S.A. (2003).
95. K. SALHI, performance des mortiers et bétons a base des ciments contenant du metakaolin algerien, these doctorat, université Biskra, (2021), p34.
96. San Nicolas R., « Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calnination flash», Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2011.
97. Cyr M,«Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires », Thèse de l'institut National des Sciences Appliquées de Toulouse et de l'Université de Sherbrooke, 1999, p283.
98. Poon C.S., Lam L., Kou S.C., Wong Y.L., Wong R., : « Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes .», *Cement and Concrete Research*, , Vol. 31, p1301-1306.(2001).
99. Khatib J.M., Clay R.M.: «Absorption characteristics of metakaolin Concrete.», *Cement and Concrete Research*. (34). 19-29 (2004).
100. Courard, L., Darimont, A., Schouterden,M., Ferauche, F.,Willem, X., Degeimbre, R., : «Durability of mortars modified with metakaolin.», *Cement and Concrete Research* 33,473–1479. (2003).
101. Ambroise J, Maxmilien S, Pera J: «Properties of metakaolin blended cement.». *Adv Cem Based Mater* 1994, p161–168.
- 102.Wild, S., Khatib, J.M.: «Portlandite Consumption in metakaolin cement pastes and mortars.», *Cem. Concr. Res.* 27(1), (1997). p.137–146
- 103.Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S., Vidal, T.: «Metakaolin in the formulation of UHPC.*Construct. Build. Mater.* 23(2), (2009).p 669–674.
104. Badogiannis, E., Papadakis, V.G., Chaniotakis, E., Tsvivilis, S.: «Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value.*Cem. Concr. Res.* 34(6), (2004). p. 1035–1041.
105. Janotka, I., Puertas, F., Palacios, M., Kuliffayova, M., Varga, C.: «Metakaolin sand-blended cement pastes: rheology, hydration process and mechanical properties. *Construct. Build. Mater.* 24(5), 791–802 (2010).

106. Jacques Coret, *Vicat, deux siècles au service du ciment*, Paris, 2003, p81.
107. Cédric Avenier (dir.), Bruno Rosier et Denis Sommain, *Ciment naturel*, Grenoble, Glénat, 2007, p175.
108. <http://www.cimentetarchitecture.com>
109. Anne Carol-Gélin, Christiane Guichard et Brigitte Riboreau, *L'or gris du grand Grenoble*, Lyon, Patrimoine Rhonalpin / SRI Édition, 2000, p35.
110. R.P.J. Van Hees, L.Binda, I.Papayanni and E.Toumbakari, Characterization and damaged analysis of old mortars, RILEM TC 167-COM: « Characterization of old mortars with respect to their repair », in *Materials and structures*, Vol 37, November 2004, pp 644-648.
111. Ministère de la culture et de la communication, Direction de l'architecture et du patrimoine, Mission ingénierie et référence technique, *Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie*, Juin 2006, p34
112. Gilles fauck, *pathologies de la brique : des maux communs avec la pierre*, les cahiers techniques du bâtiment, 1997.
113. Gilles fauck, *pathologies de la brique : des maux communs avec la pierre*, les cahiers techniques du bâtiment, 1997. p 2
114. ICOMOS-ISCS, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, 2008. p 50-52
115. ICOMOS-ISCS, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, 2008. p 56.
119. R.P.J. Van Hees, L.Binda, I.Papayanni and E.Toumbakari, Characterization and damaged analysis of old mortars, RILEM TC 167-COM: « Characterization of old mortars with respect to their repair », in *Materials and structures*, Vol 37, November 2004, pp 644-648
116. ICOMOS-ISCS, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, 2008. p 70.
117. Gilles fauck, *pathologies de la brique : des maux communs avec la pierre*, les cahiers techniques du bâtiment, 1997. p 3
118. Ministère de la culture et de la communication, Direction de l'architecture et du patrimoine, Mission ingénierie et
Référence technique, *Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie*, Juin 2006, p34
120. Proceedings RILEM TC 203-RHM final workshop. in 2nd Conference on historic mortars and RILEM TC 203-RHM final workshop HMC2010, Prague, Czech Republic. RILEM Publications. (2010).
121. Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13, University of the West of Scotland, . Glasgow. (2013).

122. Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference - HMC 2016. Santorini, Greece.
123. E. Vejmelková, M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner, R. Černý, Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar. *Cem. Concr. Compos.*, 34(4) (2012) 486-492.
124. E.R. Grist, K.A. Paine, A. Heath, J. Norman, H. Pinder, Compressive strength development of binary and ternary lime–pozzolan mortars. *Materials & Design* (1980-2015), 52 (2013) 514-523.
125. A. Gameiro, A. Santos Silva, P. Faria, J. Grilo, T. Branco, R. Veiga, A. Velosa, Physical and chemical assessment of lime–metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio. *Cem. Concr. Compos.*, 45 (2014) 264-271.
126. M. Perez-Nicolas, A. Duran-Benito, R. Sirera-Bejarano, I. Navarro-Blasco, J.M. Fernandez-Alvarez, J.I. Alvarez-Galindo. The use of a lignosulfonate superplasticizer in repair air lime-metakaolin mortars. in Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference HMC2016, Section X-Repair mortars for historic masonry. Aristotle University of Thessaloniki. (2016), 375-382.
127. J.I. Alvarez-Galindo, J.M. Fernandez-Alvarez, I. Navarro-Blasco, M. Perez-Nicolas, R. Sirera-Bejarano, A. Duran-Benito. Behaviour of air lime-metakaolin mortars modified with polynaphthalene sulfonate as superplasticizer. in Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference HMC2016, Section X-Repair mortars for historic masonry. Aristotle University of Thessaloniki. (2016), 383-390
128. C. Borges, A. Santos Silva, R. Veiga , Mortiers anciens sous l'action du milieu marin: une caractérisation physico-chimique.(2010) . p 59.
129. Jason Bolton. 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop
22-24 September 2010, Prague, Czech Republic
130. Jan Elsen , Koenraad Van Balen and Gilles Mertens, Hydraulicity in Historic Lime Mortars 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop 22-24 September 2010, Prague, Czech Republic. p159
131. Maria Tziotziou, Eleni Karakosta, Ioannis Karatasios, Michalis Fardis, Pagona Maravelaki-Kalaitzaki, Application of ¹H NMR in the Hydration Monitoring of Lime-Pozzolan Mortars. Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13, University of the West of Scotland, . Glasgow. (2013).

132. Tamara M. de A Bonilla, Ana Florinda Ferreira, Aline F. Nóbrega, Mortiers à la chaux-métakaolin appliqués sur le palais Soledade, Recife, Brésil, Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference - HMC 2016. Santorini, Greece. (2016).
133. M.A.O. Mydin, Physico-mechanical properties of lime mortar by adding exerted egg albumen for plastering work in conservation work. *J. Mater. Environ. Sci.*, 9(2) (2018),p. 376-384.
134. E. Aggelakopoulou, A. Bakolas, A. Moropoulou, Lime putty versus hydrated lime powder: Physicochemical and mechanical characteristics of lime based mortars. *Constr. Build. Mater.*, 225 (2019) 633-641.
135. http://www.guelma.org/francais/index2.php?rub=sejour&srub=promenades_guelma&got_o=necropoles_dolmeniques_Guelma [archive]
136. Attesté par les inscriptions latines, *Le Corpus Inscriptionum Latinarum*, Volume III, collections louvre. (1658) .p 962
137. Hans-Georg Pflaum, « Les gendres de Marc-Aurèle », *Journal des savants*, 1961, N°1. p. 38.
138. www.delcampe.net
139. www.delcampe.net
140. www.delcampe.net
141. M. Belaidi, Etude caractérisation et élaboration d'un Enduit de chaux pour l'utiliser dans la restauration des monuments archéologiques (Citadelle d'Alger comme exemple),
142. R. Zeroual Etude caractérisation et élaboration d'un mortier de chaux pour l'utiliser dans la restauration des monuments archéologiques (Citadelle d'Alger comme exemple),
143. M. Hamiane et al , HMC 2013 Characterisation of historic mortars, case of Roman, Byzantine and Ottoman periods in Algeria
144. Rabehi (Rabehi été al, 2013).
145. Werner, O.R., et al., 1994. Proposed report: use of natural pozzolans in concrete. *ACI Materials Journal* 232, 91 (4), 410– 426. (Report of ACI (American Concrete.
146. J. Lanas, J.L.P. Bernal, M.A. Bello, J.I.A. Galindo, Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars, *Cem and Con Res.* 34(2004) 2191–2201.
147. V. Nezřerka, Z. Slížřková, P. Tesárek, T. Plachyř, D. Frankeová, V. Petránřová, Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust, *Cem and Con Res.* 64(2014) 17–29.

148. L. Courard, A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre, Durability of mortars modified with metakaolin. *Cem and Conc Res.* 33 (2003) 1473-1479.
149. M. Belaidi, M. Hamiane, Etude comparative des différents enduits de chaux utilisés dans les monuments historiques (cas de la citadelle d'Alger). in: *Proceedings of the séminaire national matériaux procédés et environnement*, Boumerdès, 2012.
151. M. Al-Mukhtar, K. Beck, Formulation and characterization of an appropriate lime-based mortar for use with a porous limestone. *Int Jou of Bui and Env.* (2006) .p.2897–2910.
152. K. Beck, J.D. Mertz, Critères de compatibilité entre des mortiers à base de chaux et des pierres calcaires à forte porosité (tuffeaux blancs). in: *Proceedings of the 25e rencontres de l'AUGC*, Bordeaux, 2007.
153. F. Rendell, R. Jauberthie, M. Grantham, *Deteriorated Concrete, Inspection and physico-chemical analysis*. Thomas Telford, London, 2002.
154. M. Olivia, H. Nikraz, Strength and Water Penetrability of Fly Ash Geopolymer Concrete. *J. Eng. Appl. Sci.*, 6(7) (2011).p. 70-78.

ANNEXES

Annexes

Normes	Intitulé
<i>NF P 15-467 Mars 1985</i>	Méthode pratique instrumentale d'analyse des ciments par spectrométrie de fluorescence des rayons X
<i>NF P18-558 Décembre 1990</i>	Détermination de la masse volumique absolue des fines
<i>NF P94-050 1995</i>	Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.
<i>NF EN 459-2 2012</i>	Chaux de construction. Partie 2 : Méthode d'essai
<i>NF P18 554. Décembre 1990</i>	Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux
<i>NF EN 196-1.</i>	Détermination des masses volumiques réelles
<i>P 18-560 Septembre 1990</i>	Détermination de l'analyse granulométrique par tamisage
<i>NF P 18-406 Décembre 1981</i>	Essai de compression

FICHE TECHNIQUE DE NOTRE CHAUX

Chaux dolométique à forte teneur en magnésie (Mgo) jusqu'à 23 %

Couleur : Blanche

Finesse : Bonne

Composition chimique moyenne

Teneur en :

Cao acif = 59 % à 64 %

Mgo = 21% à 23 %

Fe₂O₃ + Al₂O₃ → Traces

Sulfates → Traces

Chaux Hydratée :

Teneur en Ca (OH)₂ = 70 à 75 %

Densité Apparente = 630 g/l

Refus sur Tamis de 630 μ = 3 à 7 %

Perte au feu = 2 à 5 %

Vitesse d'extinction = 22 à 25 °C/min

Température finale d'extinction = 99 °C

La livraison du produit se fait sous forme de chaux vive broyée en sacs en papier ou en plastique de 20 kg ou 25 kg en moyenne.

*** Pour la chaux hydratée la livraison se fait sur commande .*

OFFRE DE PRIX :

Chaux non hydratée (sac en papier) 6.000.00 DA/ tonne en TTC

Chaux hydratée (sac en papier) 7.500.00 DA/ tonne en TTC



MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2

Superplastifiant – Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

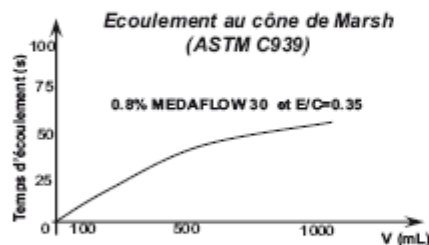
- Forme Liquide
- Couleur Jaunâtre
- pH 6 – 6,5
- Densité $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec 30%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très faible
- l'amélioration considérable de la fluidité
- une très bonne maniabilité
- un long maintien d'ouvrabilité
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton



Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.5 à 1.850 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

