



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Effet du metakaolin sur les propriétés des mortiers à base de chaux aérienne

Effect of metakaolin on the properties of aerial lime-based mortars

Mourad Belaidi ^{a,*}, Messaoud Hamiane ^a, Kamel Bouzetine ^b, Abba Brahmi ^b

^a Unité de Recherche : Matériaux, Procédés et Environnement, Université M'hamed .Bougara de Boumerdès, Algérie

^b Ecole nationale de conservation et de restauration des biens culturels, Alger, Algérie

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 11 juillet 2020

Révisé : 25 janvier 2021

Accepté : 25 janvier 2021

Mots clés:

Chaux aérienne

Metakaolin

Mortier

Caractérisation

Keywords :

Air lime

Metakaolin

Mortar

Characterization

R E S U M E

Le but de ce travail est l'élaboration des mortiers de chaux à caractère hydraulique, compatible et similaire avec les matériaux de l'ancien bâti. Différentes compositions ont été élaborées avec un rapport volumique liant : agrégat de 1 : 3. Des mélanges de mortiers contenant 10 à 50% de metakaolin par substitution à la chaux aérienne ont été préparés. Afin d'améliorer la fluidité des mélanges, un superplastifiant -Médaflow 30- a été incorporé. Une caractérisation physico-mécanique des échantillons de mortiers élaborés a été effectuée à différentes échéances de durcissement. Les résultats obtenus ont montré que l'incorporation du metakaolin aux échantillons de mortiers de chaux, même à faible dosage, provoque des variations considérables dans les valeurs des résistances mécaniques (résistance à la flexion et à la compression) et les propriétés physiques particulièrement l'absorption d'eau.

A B S T R A C T

The aim of this work is to elaborate lime mortars with a hydraulic character, compatible and similar with the materials of the old building. Different compositions were prepared with a volume: aggregate ratio of 1: 3. In order to improve the fluidity of the mixtures, a superplasticizer -Médaflow 30- has been incorporated. A physico-mechanical characterization of the mortar samples was carried out at different hardening ages. The results obtained showed that the incorporation of metakaolin to mortar samples, even at low dosage, causes considerable variations in the values of the mechanical strengths (flexural and compressive strength) and the physical properties particularly the absorption of water.

* Corresponding author. Tel.: +213 792296629.

E-mail address: m.belaidi@univ-boumerdes.dz

1 Introduction

Les liants utilisés pour les mortiers de maçonnerie sont généralement 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 aux seconds. 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 des 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 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 [5].

Le remplacement des matériaux anciens à base de chaux par des matériaux modernes pourrait entraîner le blocage de l'humidité dans les murs et provoquer de nombreuses complications, notamment des dommages causés par l'eau interne [6]. Les mortiers de chaux ont une résistance mécanique élevée et des meilleures propriétés d'imperméabilité [7]. Ils ont la particularité d'absorber de grandes quantités d'eau et peuvent facilement libérer l'humidité dans l'atmosphère en raison de leurs caractéristiques de porosités [8]. Des mélanges de chaux avec l'ajout de métakaolin ont fait l'objet de plusieurs études scientifiques. Le métakaolin a été le principal matériau pouzzolanique étudié dans ce type de mortier et fourni de meilleures performances que les autres matériaux conjointement utilisés avec des mortiers de chaux [9].

Des nouvelles investigations ont été menées sur ces types de mortiers telles que rapporté dans différents travaux issus de la littérature scientifique (E. Vejmelkova et al, E.R. Grist, A. Gameiro et al). En effet, il a été confirmé par leurs résultats que l'ajout du métakaolin à la chaux, provoquent des écarts considérables dans les propriétés physiques et mécaniques des mortiers obtenus [10-12]. C'est en fait depuis les dernières années que les liants dits chaux-pouzzolane 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, HMC 2013 et HMC 2016) [13-15]. On peut également citer les travaux de (J. Válek et al. A. F. N. de Azerêdo et al) 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 [16-18].

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 [19, 20]. 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 super plastifiant 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.

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

Récemment, une étude de (M. Azree Othuman Mydin) 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 [21]. De plus, l'étude de (M. Hamiane et al.) a été mener sur l'étude de caractère hydrofuge des mortiers à 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 [22]. Un autre travail de (E. Aggelakopoulou et al.) 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 [23].

L'élaboration des mortiers nécessite des quantités importantes de liant. Néanmoins, certaines matières premières dites de substitution peuvent remplacer avantageusement la chaux [24]. 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 d'humidité sous température ambiante pour former des composés possédant des propriétés presque similaires à celles du ciment Portland [25].

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 à différents taux pondéraux ont été conçus. Les propriétés physiques et mécaniques ainsi que le suivi du comportement hydrique des échantillons ont été déterminés.

2 Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux utilisés

La chaux utilisée est une chaux aérienne de construction en poudre de la région de Berriane, wilaya de Ghardaïa, Sud de l'Algérie. Le métakaolin provient de la région de Jijel (Nord Est de l'Algérie), employé comme ajout minéral. L'adjuvant employé est un super plastifiant de nom commercial MEDAFLOW 30. Le tableau 1 présente les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour la préparation des mortiers. La composition chimique a été évaluée au moyen de fluorescence X. Deux types de granulats ont été aussi employés dans cette recherche : Un sable noir de rivière d'une densité de 1480 kg/m^3 qui présente des grains de taille inférieures à 5 mm , et un sable fin de couleur jaune d'une densité de 1510 kg/m^3 qui présente des grains de taille inférieures à 1 mm . La figure 1 montre l'analyse granulométrique des deux sables, déterminée selon la norme EN NF P18-560 [26].

Tableau 1 – Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés dans la préparation des mortiers.

Composition	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	TiO_2 (%)	PAF (%)	d_{app} (g/cm^3)
CXA	-	0,01	0,15	95,7	1,1	0,02	0,02	0,04	2,96	0,91
MK	55,5	39,15	2,65	0,41	-	0,3	0,3	1,6	-	2,4
SN	98,10	1,10	0,06	0,04	0,02	0,07	0,35	0,03	0,20	1,48
SJ	99,30	0,20	0,03	0,03	0,01	0,03	0,10	0,20	0,20	1,51

CXA : chaux aérienne en poudre, MK : métakaolin, SN : sable noire, SJ : sable jaune, d_{app} : densité apparente, PAF : perte au feu.

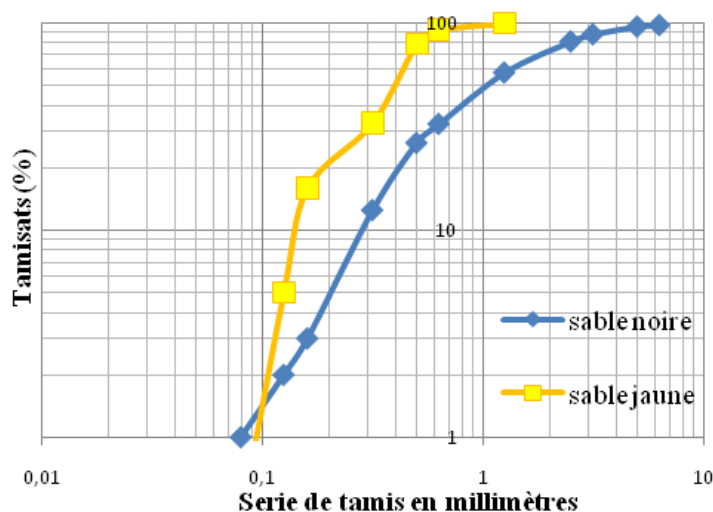


Fig. 1 – Analyse granulométrique des deux sables utilisés.

2.2 Préparation et conditionnement des échantillons

Des mélanges de mortiers contenant 10, 20, 30, 40 et 50% de métakaolin par substitution à la chaux aérienne ont été préparés. Le tableau 2 récapitule les différentes quantités de chaque constituant ainsi que les désignations (codes) des mortiers formulés.

Il est utile de signaler que la quantité d'eau de gâchage est en fonction de la consistance du mélange (diamètre de la galette 180-240 mm), comme montré sur la figure 2.

Les ratios eau/liant (E/L) varie de 1,2 à 1,5 ce qui correspond à la maniabilité appropriée. Il convient de noter que les mortiers élaborés avec des quantités importantes de métakaolin nécessitent plus d'eau que les autres mortiers contenant moins de métakaolin. Une observation qui est également rapportée par d'autres chercheurs [12, 27]. Tous les échantillons de mortier ont été préparés en éprouvettes prismatiques de dimension ($40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$) conformément à la norme EN NF 196-1 [28], voir figure 3. Les mortiers ont été mécaniquement mélangés au laboratoire à l'aide d'un malaxeur à mortier, la chaux et le métakaolin et l'adjuvant ont été mélangés tout d'abord avec l'eau et agité pendant 3 min, ensuite le sable a été progressivement ajouté.



Fig. 2 – Consistance du mortier frais.



Fig. 3 – Aspect des éprouvettes durcies.

Le mélange obtenu a été rempli en deux couches approximativement égales dans le moule. Chaque couche étant compactée mécaniquement 30 secondes à l'aide d'une table à choc et laisser durcir pendant 24 heures avant le démoulage. Ensuite, on procède à la conservation des échantillons à une humidité relative de 55% et une température de 20° C. La conservation s'effectue jusqu'à 14 et 28 jours et qui sont les âges appropriés pour effectuer les tests physiques et mécaniques.

Tableau 2 – Composition et désignation des différents mortiers.

Code du mortier	MO	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10
Chaux (g)	450	387	324	261	198	135	387	324	261	198	135
Métakaolin (g)	0	63	126	189	252	315	63	126	189	252	315
Sable noir (g)	1285	1285	1285	1285	1285	1285	1285	1285	1285	1285	1285
Sable jaune (g)	428	428	428	428	428	428	428	428	428	428	428
Eau (ml)	570	580	590	600	610	620	480	490	500	510	520
Adjuvant (%)	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2

MO : mortier ordinaire, MM1, MM2, MM3, MM4 et MM5 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin, MM6, MM7, MM8, MM9 et MM10 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin et 2% d'adjuvant.

2.3 Techniques de caractérisation

La détermination des contraintes limites en compression et en flexion à trois points à 14 et 28 jours de durcissement a été réalisée selon la norme NF EN196-1. L'essai a été réalisé à l'aide d'une presse avec un capteur de charge max de 50 kN et une vitesse de la traverse de 0,02 kN/s, figure 4.

D'autres tests physiques ont été effectués sur des mortiers à l'état durci à 28 jours, les densités spécifiques et apparentes ont été calculées en mesurant leurs masses à l'aide d'une balance [29]. D'autres essais physiques ont été réalisés telle la porosité, l'absorption d'eau qui reflète la capacité d'un matériau à capter de l'eau dans son réseau poreux. Cette caractéristique est à considérer pour les usages ou les éléments susceptibles d'entrer en contact avec de l'eau, l'humidité et le potentiel d'hydrogène pH.



Fig. 4 - Essai mécanique sur mortiers.

Dans ce travail, l'absorption d'eau par capillarité a été également étudiée. Des éprouvettes prismatiques de dimension $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ préalablement séchées dans une étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante, 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. On mesure alors la masse de l'eau absorbée (M) à $t = 15, 30, 60, 120, 240$ et 1440 minutes. L'installation expérimentale pour cet essai est montrée dans la figure 5. L'essai est réalisé selon la norme EN 1015-18 [30].

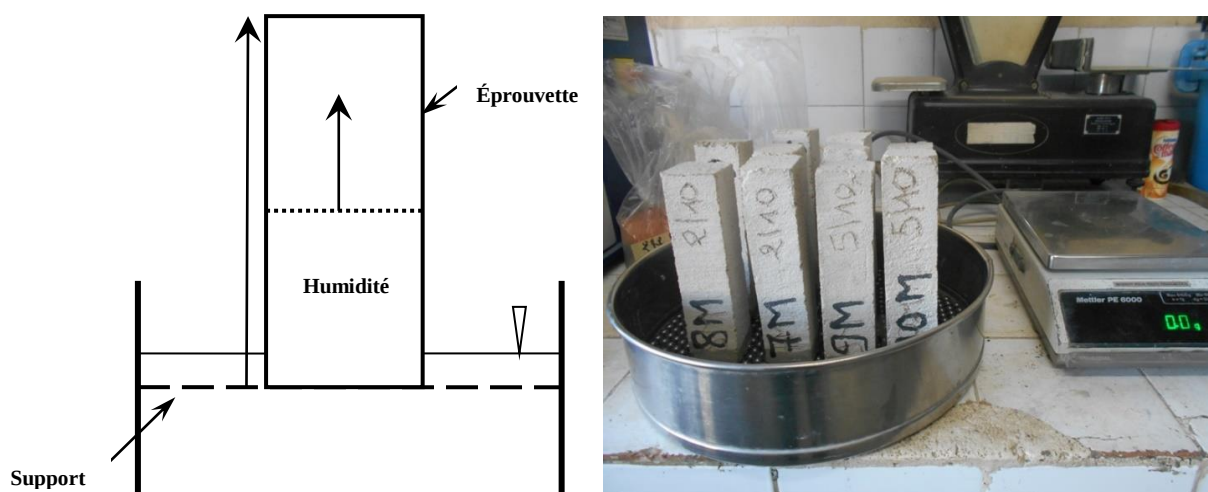


Fig. 5 – Schéma du dispositif d'essai d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient d'absorption capillaire (i) correspond aux valeurs de la masse d'eau absorbée par unité de surface en contact de l'eau (en g/cm^2), il peut être calculé à l'aide de la formule 1

$$i = \frac{M}{A} \quad [\text{g}/\text{cm}^2] \quad (1)$$

M : étant la masse de l'eau cumulée (g) et A : la surface de l'éprouvette en contact avec l'eau (soit $4 \times 4 = 16 \text{ cm}^2$).

3 Résultats et discussions

3.1 Essais mécaniques

Les résultats de la résistance à la flexion et à la compression, 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 3 et illustrée dans les figures 6 et 7.

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 figures 6 et 7. Un coefficient de corrélation est bien distinct.

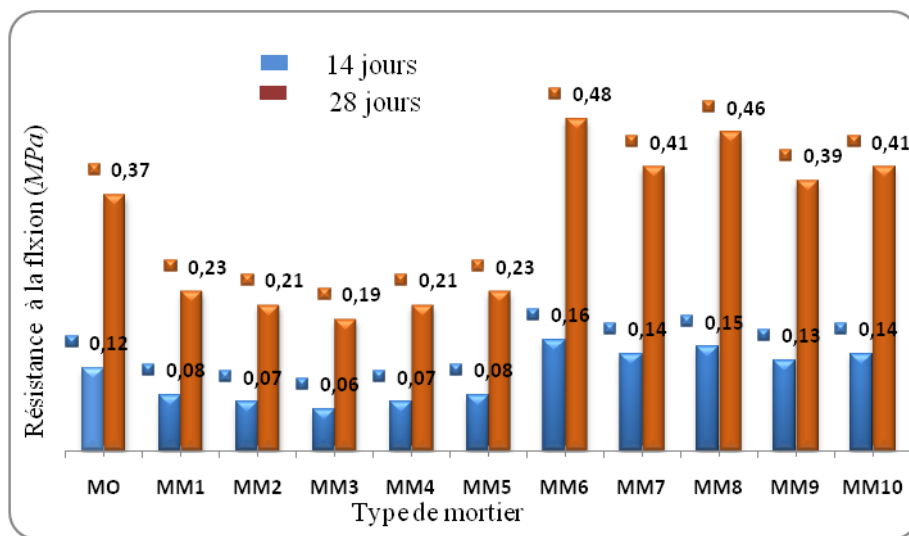


Fig. 6 – La résistance à la flexion des mortiers étudiés.

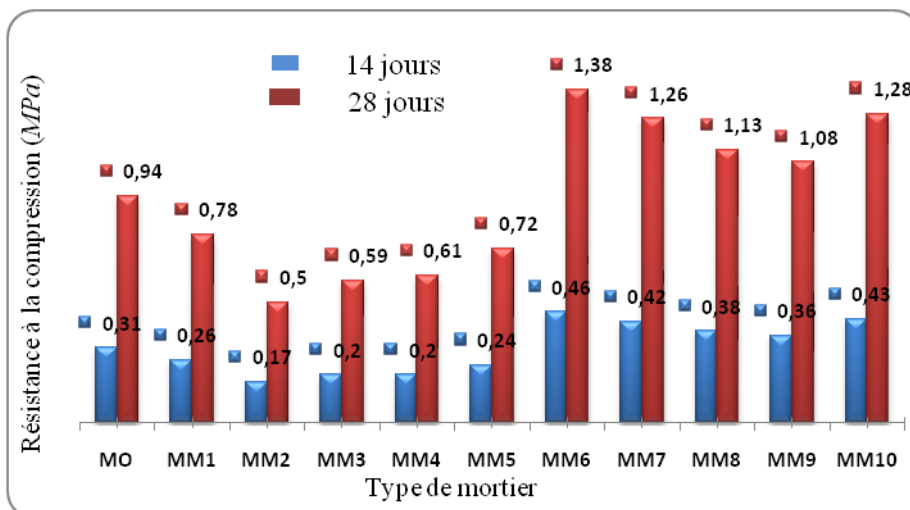


Fig. 7- La résistance à la compression des mortiers étudiés.

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) [31]. 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 ($SSB = 3000 \text{ cm}^2/g$). 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 et ce, 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.

Tableau 3 – Evolution des résistances mécaniques des mortiers étudiés.

Type de mortier	Age	MO	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10
RF (MPa)	14 jours	0,12	0,08	0,07	0,06	0,07	0,08	0,16	0,14	0,15	0,13	0,14
	28 jours	0,37	0,23	0,21	0,19	0,21	0,23	0,48	0,41	0,46	0,39	0,41
RC (MPa)	14 jours	0,31	0,26	0,17	0,2	0,2	0,24	0,46	0,42	0,38	0,36	0,43
	28 jours	0,94	0,78	0,5	0,59	0,61	0,72	1,38	1,26	1,13	1,08	1,28

MO : mortier ordinaire, MM1, MM2, MM3, MM4 et MM5 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin, MM6, MM7, MM8, MM9 et MM10 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin et 2 % d'adjuvant. RF : Résistance à la flexion, RC : Résistance à la compression.

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 [32]. Globalement, les valeurs des résistances des échantillons restent néanmoins assez faibles à cet âge de durcissement.

3.2 Caractéristiques physiques

Les valeurs moyennes des propriétés physiques après 28 jours de durcissement sont rapportées dans le tableau 4. 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 [33, 34]. 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.

Tableau 4 – Caractéristiques physiques des mortiers élaborés.

Type de mortier	MO	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10
MVab (g/cm^3)	2,05	3,42	2,05	3,55	1,66	2,13	2,14	2,5	2	2,76	2,37
MV sp (g/cm^3)	1,77	1,76	1,79	1,82	1,81	1,83	1,81	1,84	1,87	1,88	1,87
Humidité H (%)	1,12	1,17	1,2	1,17	1,52	1,14	1,28	1,38	1,44	1,15	1,18
pH	11,33	10,21	10,08	10,02	10,64	11	10,95	11,04	11,28	10,92	10,57
Absorption (%)	13,76	13,98	13,24	12,53	11,98	11,77	11,31	10,73	10,79	10,74	10,17
Porosité ouverte Po (%)	24,38	24,64	23,79	22,81	21,74	21,56	20,62	19,76	20,19	20,13	19,08

MO : mortier ordinaire, MM1, MM2, MM3, MM4 et MM5 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin, MM6, MM7, MM8, MM9 et MM10 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin et 2% d'adjuvant, MVab : masse volumique absolue, MV sp : masse volumique spécifique.

Les caractéristiques physiques à savoir les masses volumiques absolues et apparentes, l'humidité et le pH sont présentées respectivement dans les figures 8, 9, 10 et 11.

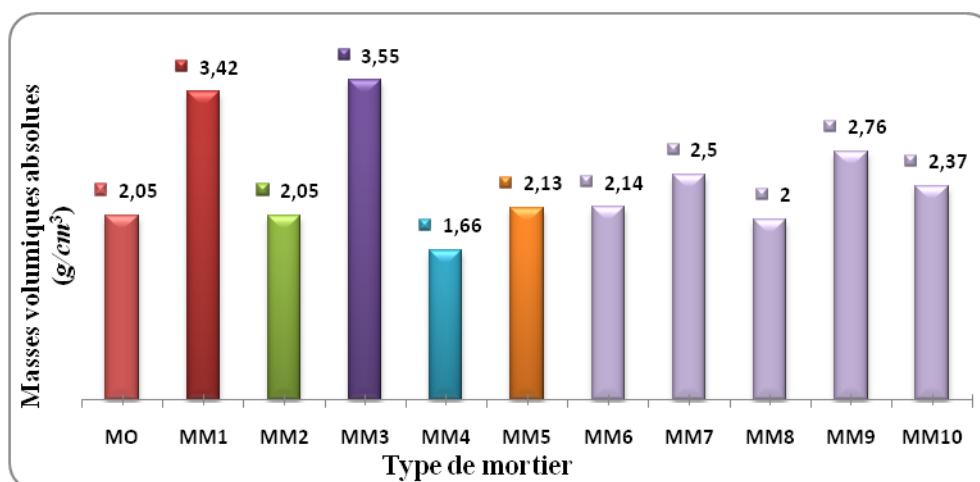


Fig. 8 – Les masses volumiques absolues des mortiers.

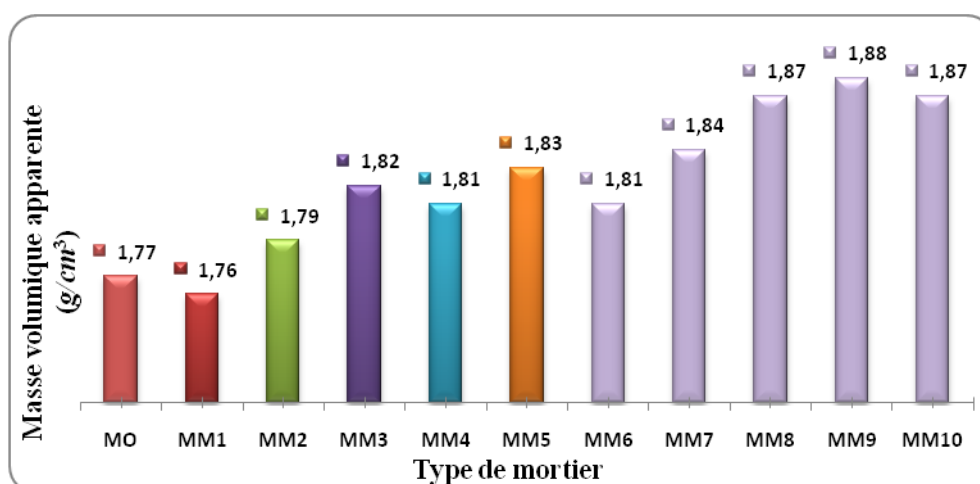


Fig. 9 – Les masses volumiques apparentes des mortiers.

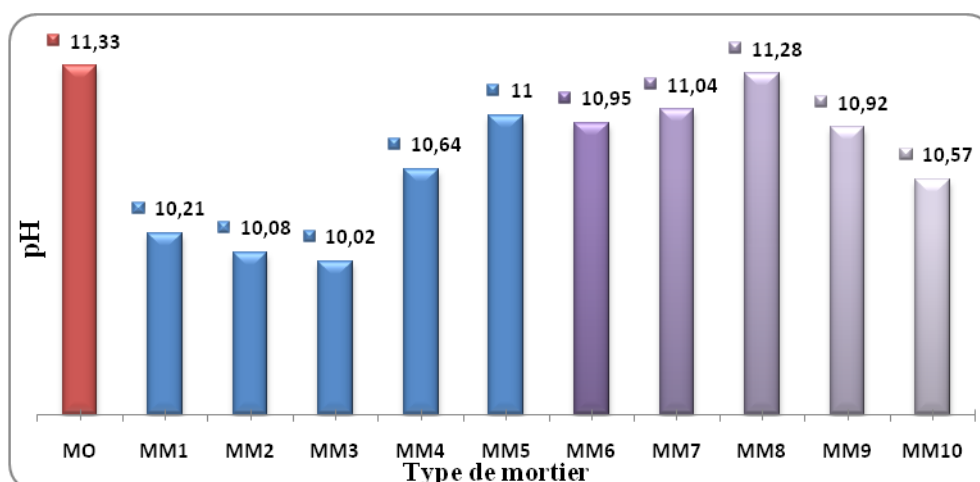


Fig.10 – Le PH des mortiers.

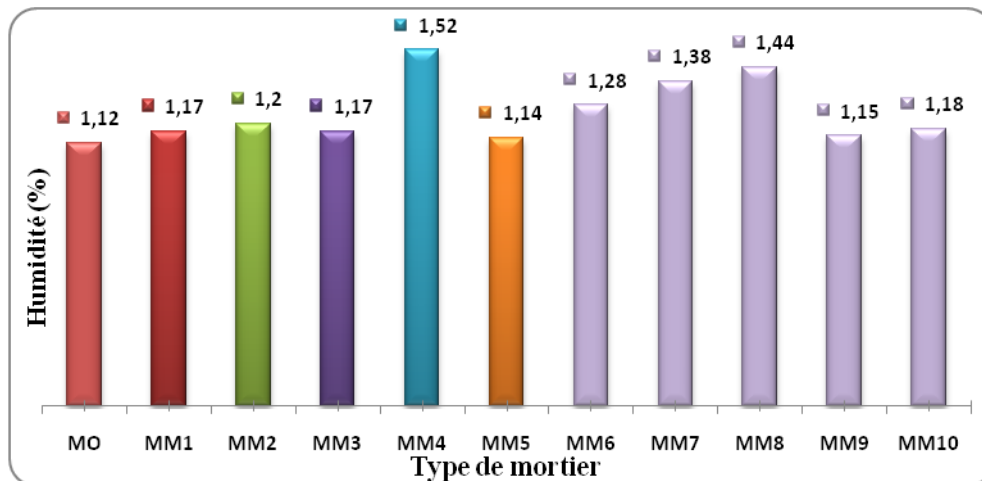


Fig.11 – L’humidité des mortiers.

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%, (figure 12).

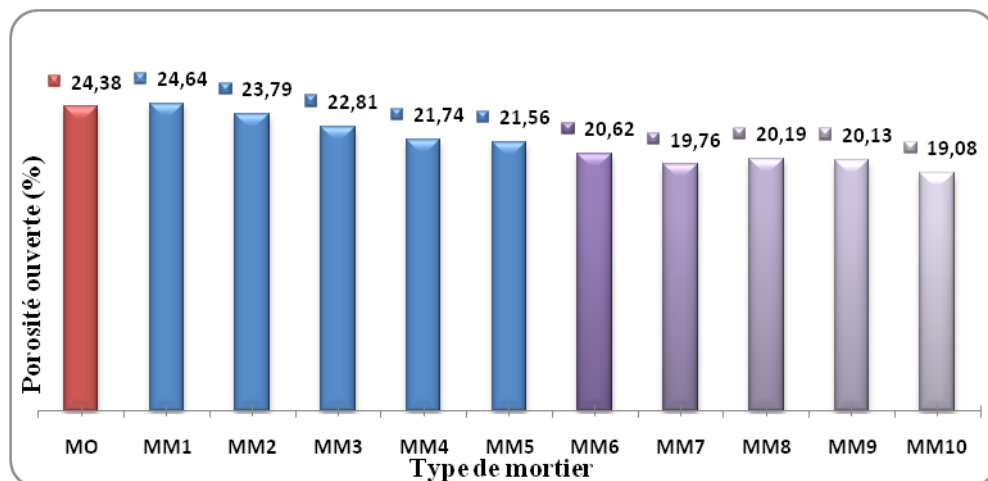


Fig.12- La porosité ouverte (Po) des mortiers étudiés.

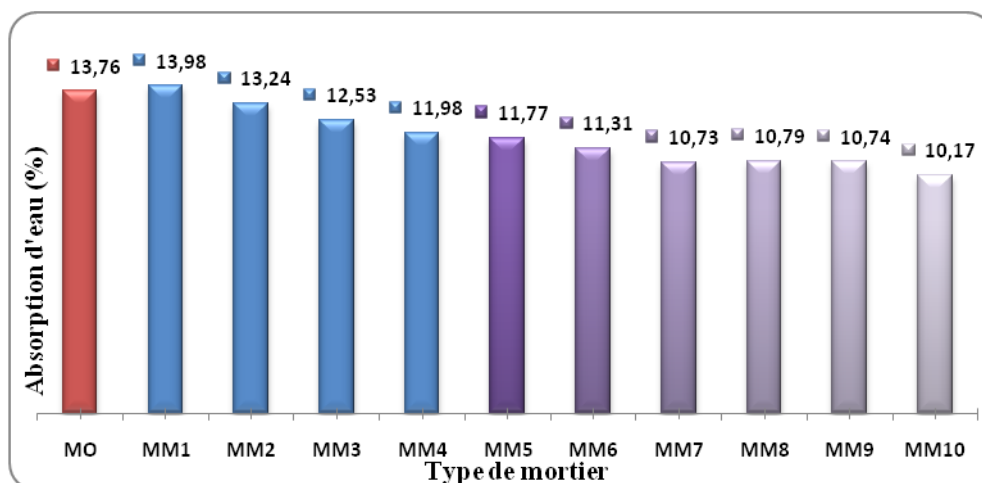


Fig. 13 – L’absorption d’eau des mortiers étudiés.

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%. Toujours selon le tableau 4, 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% (Figure 13).

3.3 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 figure 14.

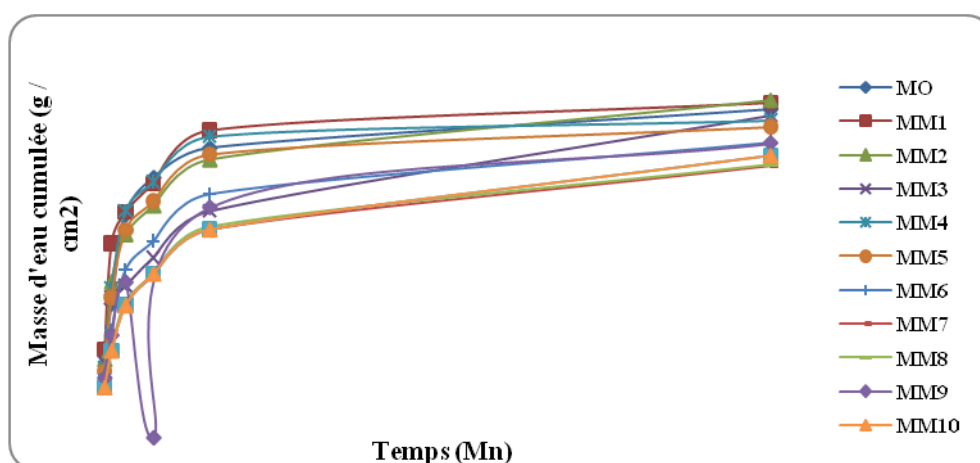


Fig. 14 – La masse d'eau cumulée.

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 5).

Tableau 5 – Masse d'eau cumulée absorbée (M) par unité de surface des mortiers étudiés.

	Temps (mn)	MO	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10
Masse d'eau cumulée absorbée par unité de surface M (g/cm²)	15	14,4	15,3	13,6	13	12,2	11,5	10,8	8,6	9,3	10,4	8,7
	30	23,2	33,8	27,1	24,4	25,9	24,4	18,7	15,2	15,6	17,8	15,1
	60	38,7	39,2	35,3	26,4	39,4	36,1	29,2	23,1	23,5	27	23
	120	45,2	44,2	40,3	31,3	44,5	41,1	34,2	28,2	28,5	32,1	28,5
	240	50,4	53,4	48,3	39,4	52,4	49,3	42,4	36,4	36,7	40	36,2
	1440	57,1	58,2	58,6	56,1	55,2	54,1	51,4	47,2	47,5	51,2	49,1

MO : mortier ordinaire, MM1, MM2, MM3, MM4 et MM5 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin, MM6, MM7, MM8, MM9 et MM10 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin et 2% d'adjuvant.

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) [35]. La valeur minimale absorbée à $t = 240$ mn a été enregistrée par le mortier MM10 estimée à 36,2 g/cm².

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 6 et présentées dans la figure 15. Les résultats obtenus des coefficients (i) varient entre 2,95 et 3,66 g/cm^2 .

Tableau 6 – Coefficient d'absorption capillaire (i) des mortiers étudiés.

	$\sqrt{t}(\text{mn})$	MO	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10
Coefficient d'absorption capillaire (i) (g/cm^2)	3,87	0,9	0,96	0,85	0,81	0,76	0,72	0,68	0,54	0,58	0,65	0,54
	5,47	1,45	2,11	1,69	1,53	1,62	1,53	1,17	0,95	0,98	1,11	0,94
	7,74	2,42	2,45	2,21	1,65	2,46	2,26	1,83	1,44	1,47	1,69	1,44
	10,95	2,83	2,76	2,52	1,96	2,78	2,57	2,14	1,76	1,78	2,01	1,78
	15,49	3,15	3,34	3,02	2,46	3,28	3,08	2,65	2,26	2,29	2,5	2,26
	37,94	3,57	3,64	3,66	3,51	3,45	3,38	3,21	2,95	2,97	3,2	3,07

MO : mortier ordinaire, MM1, MM2, MM3, MM4 et MM5 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin, MM6, MM7, MM8, MM9 et MM10 : mortier avec 10%, 20%, 30%, 40% et 50% respectivement de métakaolin et 2% d'adjuvant.

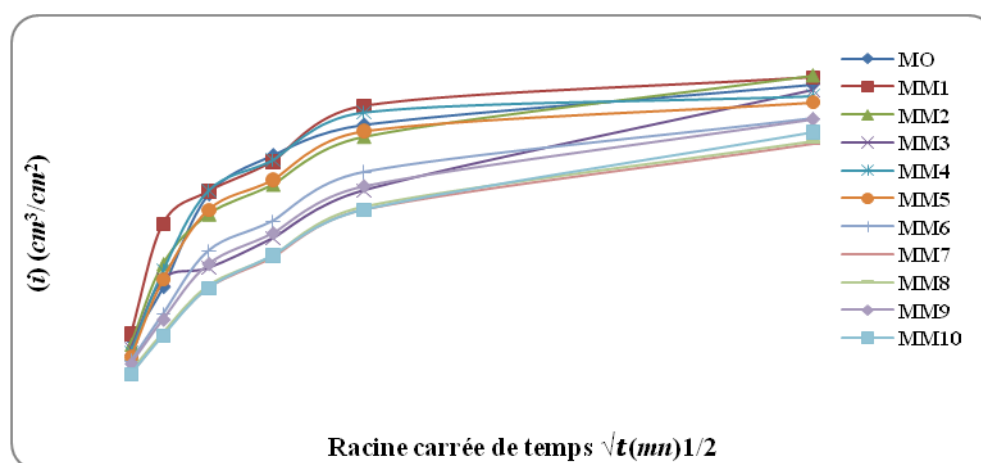


Fig. 15- Le coefficient d'absorption capillaire (i).

Les courbes de l'évolution des coefficients d'absorptions capillaires et les masses cumulées d'eau absorbées (figures 15,16) 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 [36, 37].

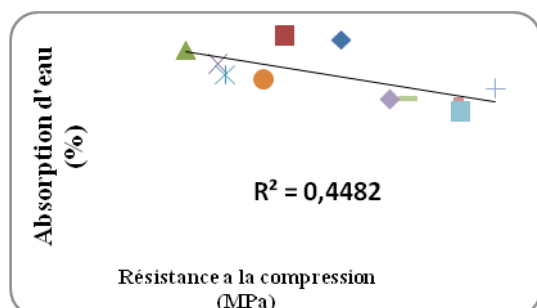


Fig. 16 – Corrélation entre l'absorption de l'eau et la résistance à la compression.

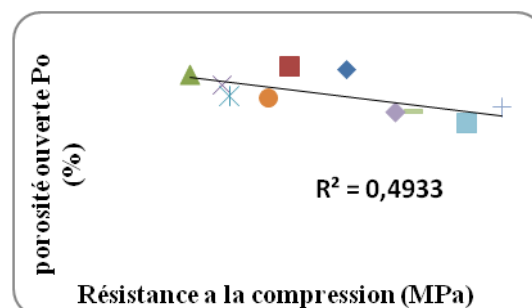


Fig. 17 – Corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression.

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 adjuvés, 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 [38].

La relation entre l'absorption d'eau, la porosité ouverte (P_o) et la résistance à la compression des différents échantillons est illustrée dans les figures 16 et 17.

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 [39]. La même évolution est observée pour la relation entre la porosité des échantillons et la résistance mécanique à la compression.

4 Conclusion

Les résultats de cette campagne d'investigation expérimentale nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- La substitution partielle de la chaux aérienne par le métakaolin 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 le métakaolin, elle augmente en augmentant le pourcentage et en ajoutant l'adjuvant médaflow. La valeur de la résistance mécanique la plus élevée atteinte est de 0,48 MPa pour la flexion et de 1,38 MPa pour la compression, ce qui correspond à l'échantillon contenant 10% de métakaolin et 2% d'adjuvant.
- Une amélioration des caractéristiques physiques telle que l'absorption d'eau a été également constatée. La valeur minimale d'absorption d'eau enregistrée avec ajout de 50% du métakaolin et 2% d'adjuvant est estimée à 10,17 %.
- La valeur minimale de la porosité ouverte est de 19,08 % enregistrée par le mortier contenant 50% du métakaolin et 2% d'adjuvant. L'évaluation globale de l'absorption et de la porosité ouverte est un paramètre significatif, qui varie avec le changement du pourcentage de métakaolin introduit et l'ajout de l'adjuvant.
- Les valeurs du coefficient d'absorption d'eau par capillarité (i) sont inférieures ou égales à 3,66 g/cm², ce qui montre l'aptitude d'un comportement meilleur de ces mortiers dans un environnement humide.
- Les mortiers présentent différentes valeurs de résistance mécanique selon le taux du métakaolin ajouté, ce qui leur donne la possibilité d'être applicables dans différentes maçonneries.

REFERENCES

- [1]- L. Bertolini, M. Carsana, M. Gastaldi, F. Lollini, E. Redaelli, Binder characterisation of mortars used at different ages in the San Lorenzo church in Milan. *Mater. Charact.*, 80 (2013) 9–20. doi:10.1016/j.matchar.2013.03.008.
- [2]- D. Miriello, D. Barca, A. Bloise, A. Ciarallo, G.M. Crisci, T. De Rose, C. Gattuso, F. Gazineo, M.F. La Russa, Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. *J Archaeolog Sci*, 37(9) (2010) 2207–2223. doi:10.1016/j.jas.2010.03.019.
- [3]- F. Carò, M.P. Riccardi, M.T. Mazzilli Savini, Characterization of plasters and mortars as a tool in archaeological studies: the case of lardirago castle in pavia, northern Italy. *Archaeometry*, 50(1) (2008) 85–100. doi:10.1111/j.1475-4754.2007.00337.x.
- [4]- A. Boato, T. Mannoni, Materials and techniques in the port of Genoa: concrete with pozzolana from the modern period to the industrial revolution, *Scienza e beni culturali Italy*. (1993). 11–20.
- [5]- S. Kramar, V. Zalar, M. Urosevic, W. Körner, A. Mauko, B. Mirtič, J. Lux, A. Mladenović, Mineralogical and microstructural studies of mortars from the bath complex of the Roman villa rustica near Mošnje (Slovenia). *Mater. Charact.*, 62(11) (2011) 1042–1057. doi:10.1016/j.matchar.2011.07.019.
- [6]- C. Groot, RILEM TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry - The role of mortar in masonry: an introduction to requirements for the design of repair mortars. *Mater. Struct.*, 45(9) (2012) 1277–1285.

- doi:10.1617/s11527-012-9916-0.
- [7]- J.J. Hughes, RILEM TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry - The role of mortar in masonry: an introduction to requirements for the design of repair mortars. *Mater. Struct.*, 45(9) (2012) 1287-1294. doi:10.1617/s11527-012-9847-9.
- [8]- G. Shafabakhsh, S. Ahmadi, Evaluation of coal waste ash and rice husk ash on properties of pervious concrete pavement. *Int J Eng*, 29(2) (2016) 192-201. doi:10.5829/idosi.ije.2016.29.02b.08.
- [9]- M.R. Veiga, A. Velosa, A. Magalhaes, Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: characterization and performance evaluation. *Constr. Build. Mater.*, 23(1) (2009) 318-327. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.12.003.
- [10]- 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. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.01.001.
- [11]- 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. doi:10.1016/j.matdes.2013.05.006.
- [12]- 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. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.06.010.
- [13]- 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).
- [14]- Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13, University of the West of Scotland, . Glasgow. (2013).
- [15]- Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference - HMC 2016. Santorini, Greece.
- [16]- J. Válek, T. Matas. Experimental Study of Hot Mixed Mortars in Comparison with Lime Putty and Hydrate Mortars. Dordrecht: Springer Netherlands. (2012), 269-281. doi:10.1007/978-94-007-4635-0_21.
- [17]- A.d. Azerêdo, L. Struble, A.M.P. Carneiro. Lime-Metakaolin Mortars Produced From Kaolin Wastes: Hardened and Microstructural Properties. in Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13. Glasgow, Scotland (UK): University of the West of Scotland. (2013), 16-26.
- [18]- D. Cardoso, A. Gameiro, A.S. Silva. Influence of curing conditions in air lime-metakaolin blended mortars – A mineralogical and mechanical study. in Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference HMC13. Glasgow, Scotland (UK): University of the West of Scotland. (2013), 102-108.
- [19]- 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.
- [20]- 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.
- [21]- 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. doi:10.26872/jmes.2018.9.2.41.
- [22]- 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), 233-239.
- [23]- 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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.218.
- [24]- B. Mezghiche, R. Chbili, S. Atach, Z. Maekouf. Etude des propriétés-physico-mécaniques du béton et du ciment à base de laitier. in Séminaire national de Génie Civil. M'sila, Algérie. (1997), 70-79.
- [25]- A.A. Al-Rawas, A.W. Hago, Evaluation of field and laboratory produced burnt clay pozzolans. *Appl. Clay Sci.*, 31(1) (2006) 29-35. doi:10.1016/j.clay.2005.07.009.
- [26]- P. NF, P 18-560: Granulats-Analyse granulométrique par tamisage. AFNOR, Paris, (1990).
- [27]- M. Belaidi. 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, 2012.

-
- [28]- N. EN, 196-1. août 1995. Méthodes d'essais des ciments—Détermination des résistances mécaniques.
- [29]- A. Izaguirre, J. Lanas, J.I. Álvarez, Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars. *Cem. Concr. Res.*, 39(11) (2009) 1095-1104. doi:10.1016/j.cemconres.2009.07.026.
- [30]- NF, EN 1015-18. Norme européenne, norme française, Détermination de l'absorption d'eau par capillarité. AFNOR, Paris, (1999).
- [31]- L. Courard, A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre, Durability of mortars modified with metakaolin. *Cem. Concr. Res.*, 33(9) (2003) 1473-1479. doi:10.1016/S0008-8846(03)00090-5.
- [32]- B. M, H. M, Z. R, G. L.S, Z. W, B. B. Etude comparative entre les différents enduits de chaux utilisés dans les monuments historiques (Cas de la citadelle d'Alger). in IVème Séminaire National Matériaux, Procédés et Environnement FSI. Boumerdès (2012).
- [33]- V. Nežerka, Z. Slížková, P. Tesárek, T. Plachý, D. Frankeová, V. Petráňová, Comprehensive study on microstructure and mechanical properties of lime-pozzolan pastes. *Cem. Concr. Res.*, 64 (2014) 17-29. doi:10.1016/j.cemconres.2014.06.006.
- [34]- J. Lanas, J.L. Pérez Bernal, M.A. Bello, J.I. Alvarez Galindo, Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cem. Concr. Res.*, 34(12) (2004) 2191-2201. doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.005.
- [35]- A. Amira. Contribution à l'élaboration et la caractérisation d'un Eco-mortier d'enduit à base de chaux et déchets de briques pour la réhabilitation du vieux bâti. Université du 20 Août 1955, Skikda, 2015.
- [36]- K. Beck, J.-D. Mertz, J.-P. Bigas, X. Brunetaud, M. Al-Mukhtar, Critères de compatibilité entre des mortiers à base de chaux et des pierres calcaires à forte porosité (tuffeaux blancs), in 25e rencontres Universitaires de Génie Civil Conception et vie des ouvrages Bordeaux. (2007).
- [37]- K. Beck, M. Al-Mukhtar, Formulation and characterization of an appropriate lime-based mortar for use with a porous limestone. *Environ. Geol.*, 56(3) (2008) 715-727. doi:10.1007/s00254-008-1299-8.
- [38]- F. Rendell, R. Jauberthie, M. Grantham, Deteriorated concrete: Inspection and physicochemical analysis. London: Thomas Telford, 2002.
- [39]- M. Olivia, H. Nikraz, Strength and Water Penetrability of Fly Ash Geopolymer Concrete. *J. Eng. Appl. Sci.*, 6(7) (2011) 70-78. doi:hdl.handle.net/20.500.11937/43922.