



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Valorisation de la poudre de marbre comme substitut partiel au sable dans la formulation d'un mortier autoplaçant

Valorization of Marble Powder as a Partial Sand Substitute in the Formulation of a Self-Compacting Mortar

Lydia Meziane ^{a,*}, Ahmed Ziregue ^a, Youcef Ghernouti ^b

^a Civil Engineering Research Laboratory, University of Laghouat, Algeria

^b Research Unit: Materials, Processes and Environment, University of Boumerdes, Algeria.

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 28 Février 2026

Révisé : 16 Mars 2026

Accepté : 17 Mars 2026

Mots clés:

Mortier autoplaçant

Valorisation

Coproduits industriels

Déchets calcaires et de marbre

Keywords :

Self-compacting mortar

Valorization

Industrial by-products

Calcareous and marble waste

RESUME

Cette étude évalue l'utilisation de la poudre de marbre (PM), coproduit industriel local, comme substitut partiel du sable (7–25%) dans des mortiers autoplaçants (MAP) intégrant un sable calcaire concassé à module de finesse élevé (MF = 3.0). Les essais à l'état frais montrent que l'ajout de PM augmente le diamètre d'étalement tout en allongeant le temps d'écoulement au V-funnel. Sur le plan mécanique, la résistance à la compression progresse avec le taux de substitution, avec une performance optimale à 22 %, tandis que la résistance à la flexion reste comparable au témoin. La réduction de l'absorption par immersion et de la sorptivité capillaire pour des taux de 7–12 % atteste une densification microstructurale favorable à la durabilité. Au-delà de 22 %, une dégradation de ces indicateurs est observée.

ABSTRACT

This study investigates the use of marble powder (MP), a local industrial by-product, as a partial sand substitute (7–25%) in self-compacting mortar (SCM) formulations incorporating crushed calcareous sand (fineness modulus = 3.0). Fresh-state tests (mini-cone flow, V-funnel) show that MP incorporation increases flow diameter while raising flow time, reflecting modified rheological behavior. Mechanically, compressive strength improves progressively with substitution rate, while flexural strength remains comparable to the reference mix, with optimal performance at 22%. Durability indicators — immersion absorption and capillary sorptivity — both decrease at moderate substitution levels (7–12%), indicating microstructural densification. Beyond 22%, a decline in durability performance is observed. These results confirm that MP can effectively correct the granulometric deficiency of coarse calcareous sand while enhancing SCM properties within a circular economy framework.

* Corresponding author. Tel.: +213 65915566

E-mail address: l.meziane@lagh-univ.dz

1 Introduction

Le secteur de la construction constitue l'un des principaux consommateurs de ressources naturelles et génère parallèlement de grands volumes de déchets industriels, soulevant des préoccupations environnementales croissantes. Dans ce contexte, l'économie circulaire encourage la valorisation de résidus industriels comme substituts aux matériaux conventionnels.

Parmi ces sous-produits, les fines calcaires issues du concassage sont produites en grandes quantités mais restent souvent peu valorisées, en raison de la morphologie angulaire des grains et de leur forte teneur en fines, considérées comme défavorables à la maniabilité des bétons conventionnels [1, 2]. Toutefois, les avancées récentes dans le domaine des bétons et mortiers autoplaçants (BAP/MAP) ont montré qu'une proportion contrôlée de fines peut au contraire améliorer les performances des mélanges. En effet, une teneur adéquate en fines favorise une meilleure compacité du squelette granulaire, réduit la porosité capillaire et améliore la dispersion des particules de ciment, contribuant ainsi à une meilleure maniabilité et à une matrice cimentaire plus dense [3-6].

Dans cette perspective, la poudre de marbre, sous-produit issu des opérations de sciage, de découpage et de polissage des blocs de marbre, est générée en volumes considérables par l'industrie de la pierre et demeure largement éliminée sans valorisation. En Algérie, son accumulation à proximité des sites de transformation engendre des impacts environnementaux et fonciers significatifs [7, 8]. D'un point de vue minéralogique, cette poudre est principalement constituée de carbonate de calcium (CaCO_3), ce qui lui confère une grande finesse et un comportement de charge minérale relativement inerte. Ces propriétés physico-chimiques en font un matériau d'addition pertinent pour les systèmes cimentaires, comme en attestent de nombreux travaux ayant démontré son effet bénéfique sur la rhéologie à l'état frais, la réduction de la porosité et le maintien de performances mécaniques satisfaisantes pour des taux de substitution modérés [9-11].

De nombreux travaux se sont intéressés à l'intégration de cette poudre dans les matériaux cimentaires, soit comme substitut partiel du ciment, soit comme remplacement des granulats fins. S'inscrivant dans la première approche, Ofuyatan et al. [12] ont étudié l'incorporation de déchets de marbre et de granulats recyclés dans le béton autoplaçant et ont montré que ces matériaux permettent de conserver une bonne ouvrabilité et des résistances mécaniques satisfaisantes à des taux de substitution modérés. Chahour et al. [13] ont quant à eux mis en évidence que l'addition de PM dans un mortier écologique améliore le comportement rhéologique et la compacité de la matrice cimentaire, tout en préservant des résistances mécaniques adéquates pour des taux d'incorporation contrôlés.

Concernant la substitution du ciment, plusieurs études ont mis en évidence l'influence de la poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires. Tayeb et al. [14] ont observé que l'augmentation de la teneur en poudre de marbre dans le béton autoplaçant améliore l'étalement et le temps d'écoulement, mais entraîne une diminution de la résistance à la compression à 28 jours. Gupta et al. [15] ont précisé que des performances mécaniques supérieures au béton de référence ne sont atteintes que pour des taux de substitution n'excédant pas 10 %, tandis que Singh et al. [16] ont quantifié un gain de 15 à 20 % sur les résistances à la compression et à la traction par fendage pour des taux de 10 à 15 %. Boukhelkhal et al. [17] ont par ailleurs confirmé que cette substitution prolonge la fluidité du béton autoplaçant dans le temps, malgré une légère réduction de la résistance à la compression.

Parallèlement, d'autres recherches se sont intéressées à l'utilisation de la poudre de marbre en substitution partielle du sable. Les travaux disponibles mettent en évidence un effet de densification microstructurale attribuable au remplissage des pores intergranulaires par les particules fines de marbre. Messaoudi et al. [10] ont identifié des taux optimaux de 30 à 40 % pour maximiser les résistances mécaniques des mortiers autoplaçants, tandis que Filali et Nasser [18] ont précisé que l'amélioration de la résistance à la compression se maintient jusqu'à environ 20 % de substitution, au-delà duquel la maniabilité se dégrade. Dans la même optique, Maza et al. [19] ont optimisé une formulation combinant 15 % de PM et 20 % de sable de marbre concassé, obtenant une amélioration significative des performances mécaniques des mortiers. Benhalilou et al. [20] ont également démontré que la substitution partielle du sable dunaire par des déchets de marbre, à des taux variant de 5 à 20 %, conduit à des propriétés satisfaisantes en termes de maniabilité, de résistance mécanique et de durabilité dans les bétons de sable.

Malgré l'abondance des recherches consacrées à l'utilisation de la poudre de marbre comme substitut du ciment, son emploi comme correcteur granulométrique des sables grossiers dans les mortiers autoplaçants demeure encore peu étudié. Cette problématique revêt une importance particulière dans la région de Laghouat (Algérie), où le sable calcaire disponible présente un module de finesse élevé ($\text{MF} = 3.0$), générant un déficit en particules fines incompatible avec les exigences

granulométriques des mortiers autoplaçants. Dans ce contexte, l'utilisation de la poudre de marbre comme correcteur granulométrique apparaît comme une solution pertinente pour pallier cette contrainte locale, encore peu documentée dans la littérature scientifique. L'originalité de cette étude réside également dans la valorisation simultanée de deux coproduits industriels locaux : un sable issu des déchets de concassage calcaire et une poudre de marbre provenant de l'industrie de transformation de la pierre. Cette approche s'inscrit dans une logique d'économie circulaire visant à réduire l'exploitation des ressources naturelles tout en limitant l'accumulation de déchets industriels.

Ainsi, cette recherche vise à évaluer l'effet de la substitution partielle du sable par la poudre de marbre (7–25 % en masse) sur les propriétés des mortiers autoplaçants, en analysant leur comportement à l'état frais (fluidité et viscosité) ainsi que leurs performances à l'état durci, notamment la résistance mécanique et l'absorption d'eau.

2 Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux utilisés

Les matériaux retenus pour cette étude ont été choisis en fonction de leur disponibilité locale et de leur représentativité des pratiques courantes en Algérie. Tous les mélanges ont été élaborés à partir d'un ciment Portland composé de type CEM II/B 42.5 R NA 442, conforme à la normalisation algérienne. Ce ciment présente une masse volumique absolue de 3.1 g/cm³, une masse volumique apparente de 1.4 g/cm³ et une finesse Blaine comprise entre 4150 et 5250 cm²/g, garantissant une bonne réactivité. Ses résistances mécaniques dépassent 10 MPa à 2 jours et 42.5 MPa à 28 jours.

Le granulat fin utilisé est un sable calcaire 0/3 issu des déchets de concassage des gisements calcaires du Turonien de Laghouat. Il se caractérise par des grains anguleux et une texture rugueuse, liées au procédé de concassage et à la nature de la roche. Les résultats de sa caractérisation sont présentés dans le tableau 1, tandis que sa granulométrie et son analyse par diffraction des rayons X (DRX) sont illustrées respectivement aux figures 1 et 2.

Tableau 1- Caractéristiques physiques du sable

Type de Sable	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Équivalent de sable (%)	Absorption (%)	Module de finesse	Porosité (%)
Sable Calcaire	1450	2670	74.68	4.27	3	45.66

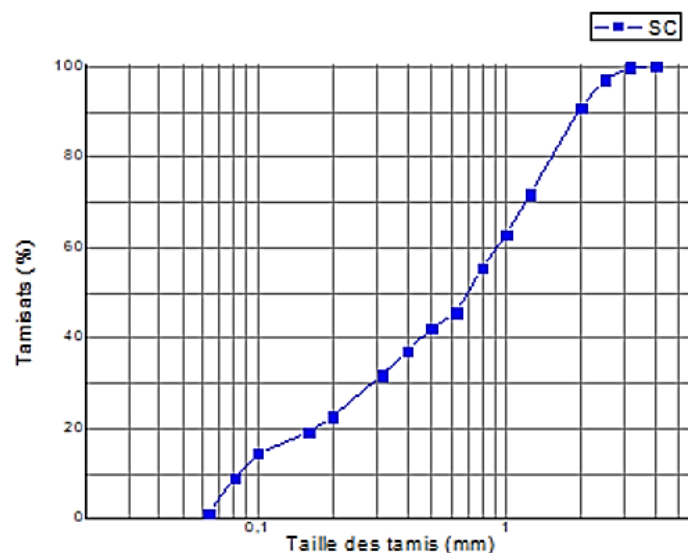
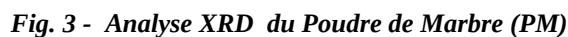


Fig. 1 - Analyse granulométrique du sable.

La poudre de marbre employée est un sous-produit des opérations de sciage, façonnage et polissage des pierres marbrières. Fournie par l'entreprise MCA (Marbre Carrelage et Agglo-marbre) située à Bordj Bou Arréridj, elle présente une finesse Blaine de 2550.60 cm²/g. Avant son incorporation, elle a été tamisée à 0.08 mm afin de ne retenir que les particules inférieures à 80 µm. Son analyse par diffraction des rayons X est présentée à la figure 3. La composition chimique de l'ensemble des matériaux est regroupée dans le tableau 2.



Composants (%)	Ciment	Poudre de Marbre (PM)	Sable Calcaire (SC)
SiO ₂	12.776	0.746	2.061
CaO	57.487	61.315	54.491
MgO	2.183	0.245	0.311
Al ₂ O ₃	3.331	0.0917	0.522
Fe ₂ O ₃	2.6612	0.028	0.179
SO ₃	2.907	0.016	0.057
K ₂ O	0.661	-	0.052
TiO ₂	0.176	-	-
P ₂ O ₅	0.099	0.038	0.039

Un superplastifiant de troisième génération, le Sika ViscoCrete-775 Flow, a été utilisé pour l'ensemble des formulations. À base de polycarboxylates, cet adjuvant à haut pouvoir réducteur d'eau améliore significativement les propriétés rhéologiques à l'état frais. Il se présente sous forme liquide brun foncé, avec un pH de 4,7 et une densité de 1,1.

Les données du tableau 1 indiquent que le sable utilisé est grossier, propre et peu impur, ce qui le rend apte à conférer au béton les performances mécaniques requises. Son taux d'absorption, relativement élevé par rapport à un sable siliceux, doit être pris en compte lors de l'ajustement de la quantité d'eau de gâchage.

L'analyse granulométrique du sable, réalisée conformément à la norme NF P18-560 [21], met en évidence une teneur en fillers de 8 %. Cette fraction fine est susceptible d'influencer les propriétés physico-mécaniques des matériaux élaborés. Néanmoins, ce taux demeure conforme aux exigences de la norme EN 12620 [22], qui préconise une teneur en fillers comprise entre 3 % et 22 %.

L'analyse par diffraction des rayons X (Figure 2) révèle que le sable calcaire est principalement constitué de dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, avec quelques éléments de quartz (SiO_2). Par ailleurs, l'étude minéralogique de la poudre de marbre (Figure 3) indique qu'elle est essentiellement composée de calcite, avec de faibles traces de quartz et de dolomite.

2.2 Formulation du mortier autoplaçant

La formulation adoptée consiste en une substitution partielle du sable calcaire issu de déchets de concassage par de la poudre de marbre, à des taux compris entre 7 % et 25 % en masse. Cette approche vise à développer un mortier autoplaçant (MAP) tout en valorisant des coproduits industriels, et à en évaluer les performances rhéologiques et mécaniques.

Six formulations ont été élaborées selon la méthode japonaise de formulation des bétons autoplaçants, adaptée au cas des mortiers [23]. Une composition de référence (MAP-0) a été définie, ainsi que cinq formulations incorporant respectivement 7 %, 12 %, 17 %, 22 % et 25 % de poudre de marbre (MAP-7, MAP-12, MAP-17, MAP-22 et MAP-25). Les proportions correspondantes sont présentées dans le tableau 3.

Le rapport eau/liant (E/L) a été fixé à 0.40 et le rapport sable/mortier (S/M) à 0.50. Trois dosages en superplastifiant (0.9 %, 1 % et 1.1 %) ont été testés afin d'identifier le taux optimal permettant de satisfaire simultanément les critères de fluidité (étalement ≥ 27 cm) et de viscosité (temps d'écoulement au mini-entonnoir en V compris entre 2 et 10 s), requis pour un MAP performant à l'état frais.

Tableau 3- Compositions des mortiers autoplaçants formulés (pour 1L de mortier)

Formulation	MAP-0	MAP-7	MAP-12	MAP-17	MAP-22	MAP-25
Ciment (kg/m ³)	450	450	450	450	450	450
Sable Calcaire (kg/m ³)	875	814	770	727	683	656
Poudre de Marbre (kg/m ³)	0	61	105	148	192	219
Eau (L/m ³)	180	180	180	180	180	180
Superplastifiant (%)	0.9-1.1	0.9-1.1	0.9-1.1	0.9-1.1	0.9-1.1	0.9-1.1

2.3 Procédure expérimentale

Les essais à l'état frais ont été réalisés conformément aux recommandations de l'AFGC (2008) [24] relatives aux mortiers autoplaçants. La fluidité a été évaluée à l'aide du mini-cône d'Abrams (mini-slump) (figure 4), tandis que la viscosité apparente a été déterminée par le temps d'écoulement au mini-entonnoir en V (figure 5), mesuré cinq minutes après la fin du malaxage. Les critères de conformité retenus correspondent à un diamètre d'étalement compris entre 27 et 33 cm et à un temps d'écoulement variant de 2 à 10 s.



Fig. 4 - (a) Schéma du cône d'étalement ; (b) à (d) Essai d'étalement du mortier au cône d'étalement

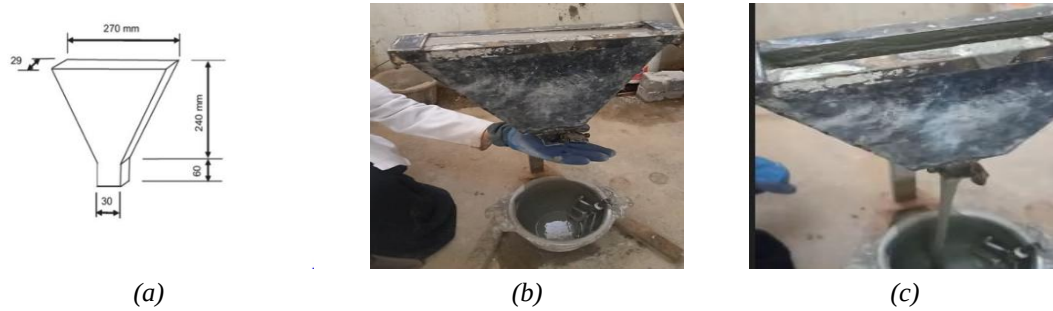


Fig. 5 - (a) Schéma de l'entonnoir en V; (b) et (c) Essai d'écoulement du mortier à l'entonnoir en V

Pour l'état durci, des éprouvettes prismatiques de $40 \times 40 \times 160$ mm (Figure 6) ont été confectionnées, démoulées après 24 h puis conservées en chambre humide ($HR \geq 95 \%$, 20 ± 2 °C) jusqu'aux âges d'essai. La résistance à la traction par flexion (essai trois points) a été mesurée à 3 et 28 jours selon la norme EN 196-1 [25], suivie de la résistance à la compression sur les demi-prismes issus de la flexion. Les résultats correspondent à la moyenne de trois éprouvettes.

L'absorption par immersion totale a été déterminée en conformité avec la norme ASTM C 642-97 [26], l'essai a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques séchées à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante (M_s), puis immergées dans l'eau à 20 ± 2 °C pendant 72 h. Après essuyage superficiel, la masse saturée surface sèche (M_{sat}) a été mesurée. Le coefficient d'absorption (A_i) est calculé par l'équation (1) :

$$A_i(\%) = \left[\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right] \times 100 \quad (1)$$

Ce paramètre reflète la porosité ouverte accessible à l'eau et constitue un indicateur de la compacité et de la durabilité potentielle du matériau.

L'absorption capillaire a été évaluée selon la norme NF P10-502 [27]. Après séchage à 105 ± 5 °C pendant 72h, les faces latérales des éprouvettes ont été imperméabilisées afin d'imposer un flux unidirectionnel. Les éprouvettes ont été mises en contact avec une lame d'eau constante (5 ± 1 mm) et pesées à intervalles réguliers jusqu'à 48 h. La masse d'eau absorbée par unité de surface (i) a été tracée en fonction de $\sqrt{t}$ pour déterminer la phase linéaire d'absorption capillaire selon la loi de Lucas-Washburn. La pente de cette droite correspond au coefficient de sorptivité (S), caractérisant la cinétique de pénétration capillaire. Une faible valeur de S traduit un réseau poreux peu connecté et une matrice plus compacte.

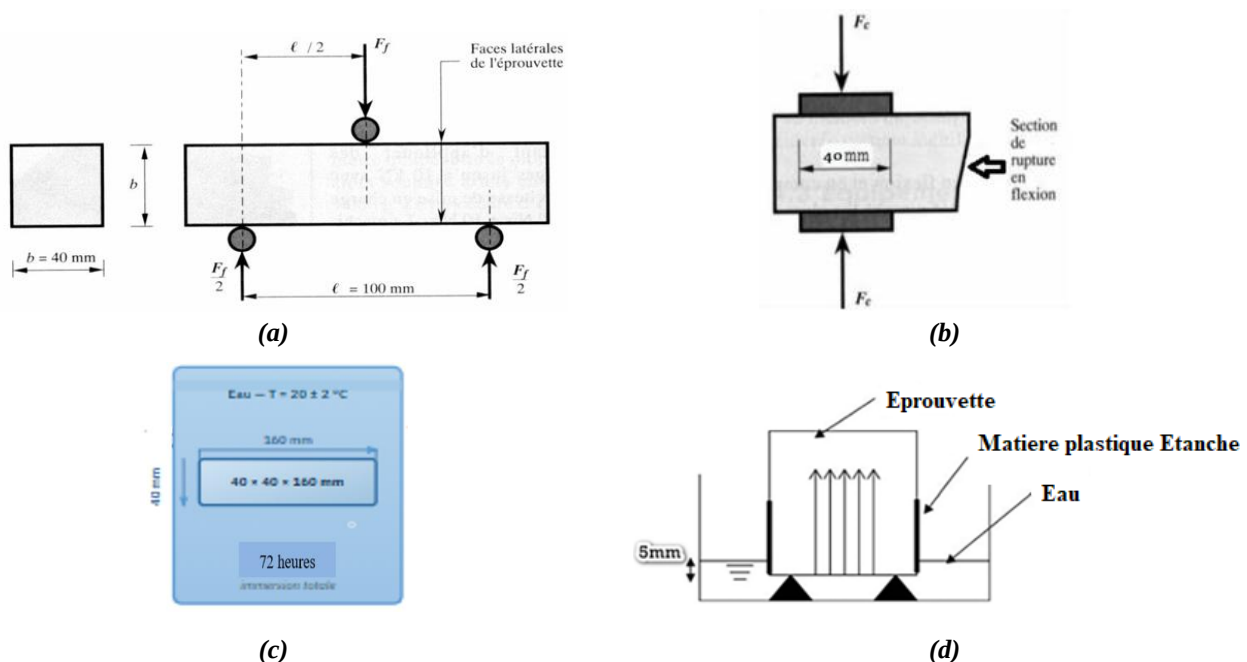


Fig. 6 - Schémas des essais réalisés à l'état durci : (a) essai de flexion trois points ; (b) essai de compression ; (c) essai d'absorption par immersion ; (d) essai d'absorption par capillarité.

3 Résultats et discussion

3.1 Étalement

L'analyse des résultats d'étalement (Tableau 4) révèle un comportement rhéologique fortement dépendant de l'interaction entre le taux de substitution en poudre de marbre et le dosage en superplastifiant. Pour le dosage minimal en SP (0.9 %), on observe une diminution progressive de l'étalement à mesure que la teneur en PM augmente de 0 à 25 %. Cette évolution s'explique par la demande en eau plus élevée de la poudre de marbre par rapport au sable calcaire : les particules ultra fines ($< 80 \mu\text{m}$) de la PM présentent une surface spécifique considérablement plus grande, ce qui augmente la quantité d'eau adsorbée nécessaire à la lubrification de la matrice, réduisant ainsi l'eau libre disponible pour la fluidité. Ce comportement, déjà observé par Belaidi et al. [28] pour les BAP, se retrouve ici à l'échelle du mortier.

L'augmentation du dosage en SP à 1.0 % compense efficacement cette demande en eau supplémentaire : l'étalement se maintient pour toutes les compositions et dépasse même la valeur de référence pour les taux intermédiaires de PM (12 à 22 %), illustrant l'effet combiné bénéfique de la dispersion assurée par le SP et du rôle de roulement des fines de la PM. Avec 1.1 % de SP, l'étalement atteint des valeurs maximales mais approche la limite supérieure acceptable, avec un risque potentiel de ségrégation pour les taux de PM les plus élevés. L'ensemble des valeurs mesurées demeure néanmoins compris dans l'intervalle normatif de 27 à 33 cm, confirmant la conformité des mélanges en termes de fluidité.

Tableau 4 - Variation de l'étalement en fonction de la teneur en poudre de marbre et du dosage en Superplastifiant

Dosage en PM	0.9 % SP	1%SP	1.1 % SP
0% PM	26.95	27.6	28.4
7% PM	28.5	30.75	31.95
12%PM	29.8	31.35	32
17% PM	25.7	31.5	32.5
22% PM	24.1	31.85	32.7
25% PM	23.9	32.2	33.1

3.2 Temps d'écoulement au mini-entonnoir en V

La figure 7 illustre l'évolution du temps d'écoulement après 5min du processus de malaxage en fonction de la teneur en PM. Le temps d'écoulement au mini-entonnoir en V augmente de manière continue avec la teneur en PM, quelle que soit la teneur en SP. Cette tendance reflète l'accroissement de la viscosité plastique du mélange lié à l'incorporation croissante de fines : la multiplication des interactions inter-particulaires dans la phase pâteuse augmente la résistance à l'écoulement. Cependant, toutes les valeurs obtenues restent comprises dans l'intervalle cible de 2 à 10 secondes, indiquant que la viscosité des mélanges demeure adéquate pour un comportement autoplaçant.

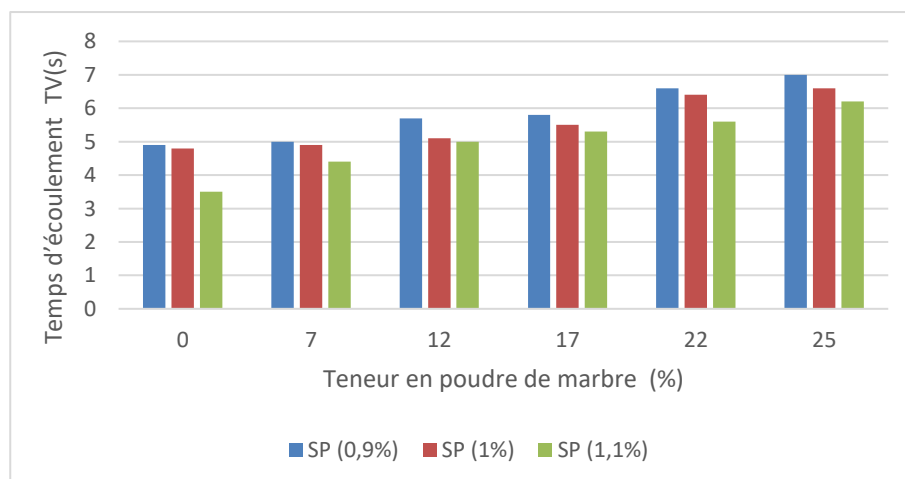


Fig. 7 - Evolution du temps d'écoulement selon la teneur en poudre de marbre et le dosage en superplastifiant

Sur la base de l'analyse croisée des résultats d'étalement et de viscosité, le dosage de 1.0 % en SP a été retenu comme optimal pour la suite de l'étude. Ce dosage garantit simultanément une fluidité conforme (étalement : 27–33 cm), une viscosité appropriée (temps d'écoulement : 2–10 s), et une homogénéité satisfaisante des mélanges sans risque de ressuage ou de ségrégation, pour tous les taux de substitution testés (0–25 % PM).

3.3 Absorption d'eau par capillarité et par immersion

Les figures 8 et 9 ci-dessous illustrent respectivement l'évolution de l'absorption par immersion (A_i) et du coefficient de sorptivité (S) des mortiers autoplaçants en fonction du taux de substitution du sable par la poudre de marbre (PM), pour des éprouvettes testées à 28 jours de cure.

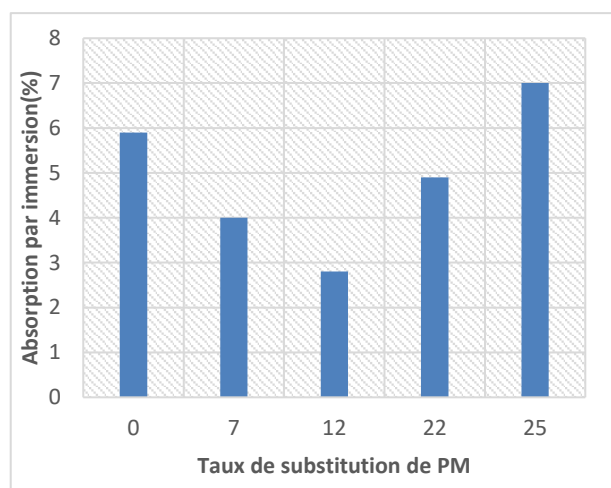


Fig. 8- Absorption d'eau par immersion des mortiers autoplaçants étudiés

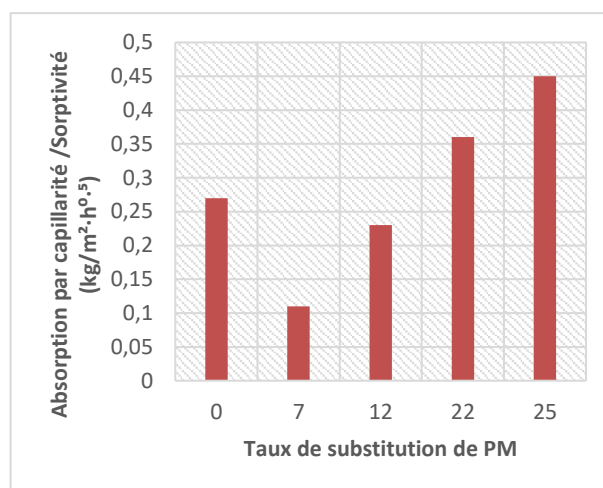


Fig. 9- Absorption d'eau par capillarité des mortiers autoplaçants étudiés

L'introduction de 7 % de PM entraîne une diminution significative de l'absorption par immersion, qui passe de 5.85 % pour le mortier témoin à environ 4.00 %, soit une réduction de 31.6 %. Cette amélioration est encore plus prononcée à 12 % de substitution, où l'absorption atteint sa valeur minimale de 2.85 %, correspondant à une baisse de 51.3 % par rapport à la formulation de référence. Cette performance s'explique principalement par l'effet filler des particules fines de poudre de marbre, qui comblent les pores capillaires de la matrice cimentaire et réduisent ainsi la porosité ouverte accessible à l'eau. Ces résultats concordent avec ceux de Alyousef et al. [29], qui ont montré qu'une substitution de 20 % du sable par des déchets de marbre permet d'obtenir la plus faible absorption d'eau, en raison d'une microstructure plus dense et moins perméable résultant d'un empilement granulaire optimisé et d'une réduction des vides capillaires.

Au-delà de 12 %, une évolution inverse apparaît : l'absorption par immersion augmente progressivement pour atteindre 4.90 % à 22 %, puis 7.00 % à 25 %, dépassant ainsi la valeur du mortier témoin. Cette dégradation s'explique par un excès de fines inertes qui, à forte teneur, diluent la fraction cimentaire active et favorisent la formation d'une porosité secondaire. Celle-ci est liée à une demande en eau plus élevée et à la création de zones d'interface plus faibles entre la pâte et les granulats. Un comportement similaire a été rapporté par Bendjilali et al. [30], qui ont observé, dans des mortiers autoplaçants de réparation (SCRM), une augmentation de plus de 45 % du coefficient de sorptivité pour des dosages élevés en poudre de marbre, en raison de la réduction des produits d'hydratation et du caractère inerte de ce matériau.

L'évolution du coefficient de sorptivité (figure 9) suit globalement la même tendance que celle de l'absorption par immersion, confirmant la cohérence physique entre ces deux paramètres. Le mortier témoin présente une sorptivité de 0.27 kg/m²·h^{0.5}, valeur qui diminue nettement à 0.11 kg/m²·h^{0.5} pour 7 % de PM (soit une réduction de 59.3 %). À 12 %, la sorptivité remonte légèrement à 0.23 kg/m²·h^{0.5}, tout en restant inférieure à celle du témoin, ce qui traduit une matrice cimentaire toujours plus compacte que l'état de référence.

La sorptivité constitue un indicateur sensible de la structure capillaire, car elle traduit la pénétration de l'eau par succion dans les pores ouverts et interconnectés. Selon Neville [31], ce paramètre dépend directement de la taille et de la tortuosité des pores capillaires : une matrice plus dense, caractérisée par des pores plus fins, présente un coefficient de

sorptivité plus faible. La réduction observée pour 7 % et 12 % de PM peut ainsi être attribuée à l'affinement du réseau poreux induit par l'effet filler, en cohérence avec les observations au MEB rapportées par Khoshakhlagh et al. [32], qui mettent en évidence une matrice plus homogène et moins poreuse pour des teneurs modérées en poudre calcaire fine.

À partir de 22 %, la sorptivité augmente sensiblement ($0.36 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$) et atteint $0.46 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ à 25 %, soit une hausse de 70.4 % par rapport au témoin. Cette augmentation traduit la formation d'un réseau capillaire plus développé et mieux connecté, facilitant la pénétration rapide de l'eau. Ce constat rejoint les conclusions de Uysal et Yilmaz [33], qui ont démontré qu'un excès de fillers inertes dans les matrices cimentaires entraîne une augmentation de la porosité totale et une dégradation des propriétés de transfert hydrique, notamment au-delà d'un seuil de substitution de 20 %.

3.4 Résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression (Figure 10) en fonction du taux de substitution en poudre de marbre (PM) met en évidence une amélioration progressive et régulière, tant à jeune âge (3 jours) qu'à maturité (28 jours). À 3 jours, la résistance augmente de 21.94 MPa pour la formulation de référence (MAP-0) à 25.98 MPa pour MAP-25, soit un gain d'environ 18.4 %. À 28 jours, cette tendance se confirme avec une progression de 39.08 MPa à 47.93 MPa, correspondant à une augmentation de 22.6 %.

Cette évolution favorable résulte de plusieurs mécanismes complémentaires. D'une part, l'effet de remplissage (effet filler) des particules ultrafines de PM ($< 80 \mu\text{m}$) contribue à combler les pores capillaires ainsi que les zones de transition interfaciale entre les granulats et la pâte cimentaire, ce qui induit une densification de la microstructure. Cette réduction de la porosité globale et cette amélioration de l'homogénéité interne se traduisent directement par un accroissement des performances mécaniques. D'autre part, l'ajustement granulométrique apporté par la PM au sable relativement grossier (MF = 3.0) améliore la compacité du squelette granulaire. Cette optimisation de l'empilement réduit le volume de vides intergranulaires, diminue la demande en eau et augmente la fraction volumique de la phase solide porteuse, ce qui favorise le développement des résistances. Ces observations sont cohérentes avec les résultats de Demirel [34] concernant des bétons incorporant de la poudre de marbre, ainsi qu'avec les travaux de Filali & Nasser [18], qui rapportent une amélioration comparable de la résistance à la compression pour des taux de substitution similaires.

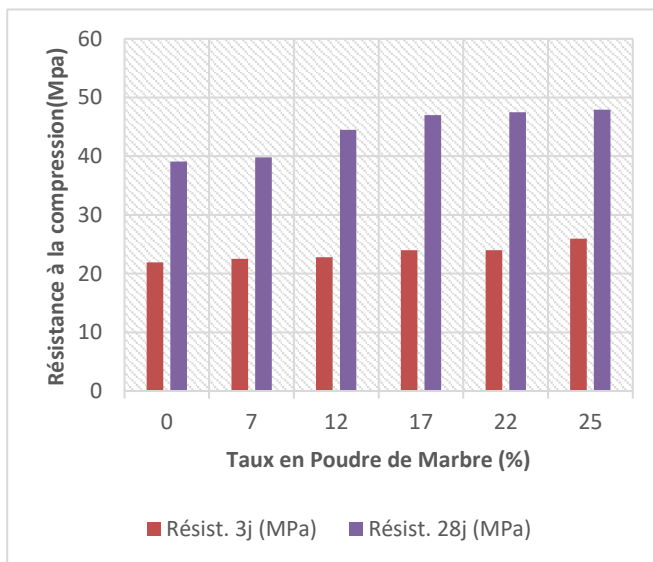


Fig. 10 - Evolution de la résistance à la compression à 3j et à 28j en fonction de la teneur en poudre de marbre

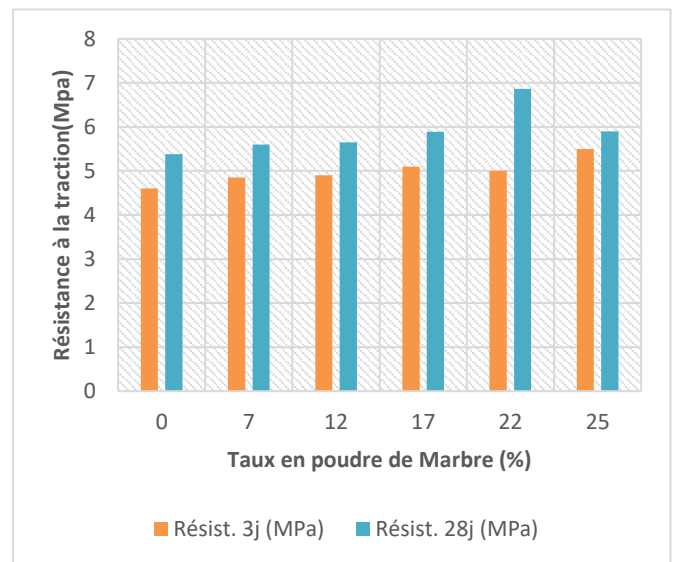


Fig. 11- Evolution de la résistance à la traction à 3j et à 28j en fonction de la teneur en poudre de marbre

Il convient également de souligner que l'augmentation de la résistance demeure continue jusqu'au taux maximal étudié (25 %), sans apparition d'un palier ou d'une diminution dans l'intervalle considéré. Cela laisse supposer que le seuil optimal de substitution pourrait se situer au-delà de 25 %. Toutefois, les contraintes liées à la stabilité à l'état frais notamment le risque de ressuage observé au-delà de cette teneur constituent un facteur limitant pour une application pratique au-delà de ce pourcentage.

3.5 Résistance à la traction

Les résultats de flexion (figure 11) indiquent une influence limitée de la poudre de marbre sur la résistance à la traction, avec des performances globalement similaires à celle du témoin (5.38 MPa à 28 jours), avec toutefois une amélioration notable à 17 % de substitution, atteignant 5.89 MPa (+ 9.5 % par rapport au témoin). La résistance maximale a été enregistrée pour un taux de remplacement de 22 %, avec une valeur de 6.86 MPa, soit une augmentation de 27.5 % par rapport au témoin.

4 Conclusion

Cette étude avait pour objectif de concevoir un mortier autoplaçant (MAP) à la fois économique et à faible impact environnemental, en valorisant des résidus de sable calcaire issus du concassage ainsi que des déchets de marbrerie disponibles sur le marché algérien. Les résultats obtenus démontrent la faisabilité technique et l'intérêt de l'utilisation de la poudre de marbre (PM) comme substitut partiel du sable grossier (MF = 3.0) dans la formulation d'un MAP. Les performances observées à l'état frais, à l'état durci (mécanique) et en termes de durabilité hydrique permettent de dégager les conclusions suivantes.

Sur le plan rhéologique, un dosage de 1.0 % en superplastifiant à base de polycarboxylates s'est avéré optimal pour l'ensemble des taux de substitution étudiés (7–25 %). Il assure un étalement compris entre 27 et 33 cm ainsi qu'un temps d'écoulement de 2 à 10 s, conformément aux exigences normatives. La poudre de marbre joue le rôle de correcteur granulométrique du sable relativement grossier, améliorant la compacité du squelette granulaire et la cohésion de la matrice autoplaçante. Néanmoins, au-delà de 25 % de substitution, la stabilité du mélange se dégrade, avec un risque accru de ressuage, ce qui constitue la limite pratique d'incorporation.

Du point de vue mécanique, l'ajout de PM entraîne une augmentation significative de la résistance à la compression à tous les âges, avec un gain maximal de 22.6 % à 28 jours pour la formulation MAP-25. La résistance à la traction par flexion évolue de manière moins linéaire, atteignant un optimum à 22 % de substitution (6.86 MPa à 28 jours, soit +27.5 % par rapport au témoin). Ces améliorations sont principalement attribuées à l'effet de remplissage des fines de PM, qui densifie la microstructure cimentaire et renforce les zones de transition interfaciale.

En matière de durabilité hydrique, l'incorporation de PM conduit à une diminution progressive de l'absorption par immersion et du coefficient de sorptivité capillaire. Cette amélioration conjointe confirme l'efficacité de la poudre de marbre dans la densification du réseau poreux ouvert, en réduisant la connectivité capillaire et en limitant la pénétration de l'eau. La cohérence observée entre la densification microstructurale, le gain mécanique et la réduction des transferts hydriques constitue une validation croisée de l'effet bénéfique de la PM dans ce système cimentaire.

Ainsi, la poudre de marbre, résidu industriel abondant et encore peu valorisé en Algérie, apparaît comme un matériau à fort potentiel pour l'élaboration de mortiers autoplaçants performants et durables, notamment pour corriger les insuffisances granulométriques des sables locaux. Cette démarche s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire.

REFERENCES

- [1]- D. Belhadj Aissa, A. Semcha, A. Moulay Ali, M. Taïbi, Valorisation des poussières des concasseurs des roches de la région d'Adrar comme addition fine dans les bétons autoplaçants. 2^{ème} séminaire international de Génie Civil SIGC2018, 21 et 22 Novembre 2018, Ecole Nationale Polytechnique Maurice Audin d'Oran, Oran, Algérie
- [2]- Z. Guemmadi, B. Toumi, H. Chabi, M. Resheidat, Analyses des actions des fillers calcaires sur les propriétés physico-chimiques et la microstructure des pâtes de ciment. 7^{ème} séminaire international de la construction, Lafarge, Algérie, 2010.
- [3]- A. Boukhelkhal, L. Azzouz, A.S.E. Belaïdi, B. Benabed, Effects of marble powder as a partial replacement of cement on some engineering properties of self-compacting concrete. J. Adhes. Sci. Technol., 30(22) (2016) 2405–2419. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1184402>
- [4]- A. Ouazir, O. Boukendakdji, E.H. Kadri, F. Debieb, Effect of the fineness of mineral additions on the behavior of low impact environment self-compacting mortars. J. Mater. Eng. Struct., 11 (2024) 33–47.

- [5]- L. Opoczky, Progress of the particle size distribution during the intergrinding of a clinker–limestone mixture. *Zement–Kalk–Gips*, 45(12) (1992) 648–651.
- [6]- O. Boukendakdji, Étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : Optimisation des conditions opératoires. Thèse de Doctorat, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie, 2010.
- [7]- H. Hebhouh, H. Aoun, M. Belachia, H. Houari, E. Ghorbel, Use of waste marble aggregates in concrete. *Constr. Build. Mater.*, 25(3) (2011) 1167–1171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>
- [8]- R. Djebien, H. Hebhouh, M. Belachia, S. Berdoudi, L. Kherraf, Incorporation of marble waste as sand in formulation of self-compacting concrete. *Struct. Eng. Mech.*, 67(1) (2018) 87–91. <https://doi.org/10.12989/sem.2018.67.1.087>
- [9]- H. Dada, H. Soualhi, A.S.E. Belaidi, E-H. Kadri, B. Benabed, A study of the rheological behaviour of eco-friendly mortar made with metakaolin and marble powder at various ambient temperatures. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 27(3) (2022) 1088–1103. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2072404>
- [10]- F. Messaoudi, O. Chaalal, M. Baazouzi, Rheological and mechanical behavior of self-compacting mortars containing marble waste as partial replacement of sand. *Rev. Mater.*, 30 (2025) e20240781. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0781>
- [11]- R. Chaid, N. Haddadou, M.S. Hamza, H.A. Mesbah, Valorisation de la poudre de marbre comme additif dans la formulation de bétons autoplaçants. *Environ. Ing. Devt.*, 1 (2021) 11–19.
- [12]- O. Ofuyatan, D. Omole, K.T. Enoch, O. Ogundeyi, Marble waste and recycled concrete aggregates in self-compacting concrete (SCC): an evaluation of fresh and hardened properties. *Aust. J. Civ. Eng.* 20(1) (2022) 67–79. <https://doi.org/10.1080/14488353.2021.1921342>
- [13]- K. Chahour, H. Mechakra, B. Safi, N.M. Dehbi, C. Chaibet, Étude du comportement rhéologique et mécanique d'un mortier de ciment écologique à base de poudre de marbre. *Int. J. Appl. Mech. Eng.*, 29(1) (2024) 19–35. <https://doi.org/10.59441/ijame/176204>
- [14]- T. Bouziani, A. Benmounah, M. Bederina, M. Lamara, Effect of Marble Powder on the Properties of Self-Compacting Sand Concrete. *Open Constr. Build. Technol. J.*, 5 (2011) 25–29. <http://dx.doi.org/10.2174/1874836801105010025>
- [15]- S. Gupta, S. Srivastva, N. Kumar, A. Tripathi, S. Jaiswal, An Experimental Study on Utilization of Marble Powder for Sustainable Construction. *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 9(4) (2022) 3638–3643.
- [16]- S. Singh, H.S. Singh, N. Gupta, K. Hemalatha, T.A. Sudarshan, N. Singh, Praveen, Q. Mohammad, Effect of Marble Dust Powder on the Properties of Fresh and Hard Concrete. *E3S Web Conf.*, 529 (2024) 01018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452901018>
- [17]- A. Boukhelkhal, S. Kenai, Assessment of fluidity retention, mechanical strength and cost production of blended cement self-compacting concrete using the concept of a performance index. *Frattura ed Integrità Strutt.*, 16(60) (2022) 89–101. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.60.07>
- [18]- S. Filali, A. Nasser, Evaluating the impact of marble waste and fly ash as sand replacements on concrete's compressive strength and workability. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, 14(5) (2024) 16797–16801. <https://doi.org/10.48084/etasr.8234>
- [19]- M. Maza, N. Tebbal, S. Zitouni, Z.E.A. Rahmouni, Combined Effect of Marble Waste as Powder and Aggregate Form on the Properties of the Mortar. *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 45(6) (2021) 467–476. <https://doi.org/10.18280/acsm.450605>
- [20]- M.I. Benhalilou, M. Belachia, H. Houari, A. Abdelouahed, The study of the characteristics of marble waste sand. *Civ. Environ. Eng. Rep.*, 30(1) (2020) 130–144. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0010>
- [21]- AFNOR, NF P 18-560. Granulats — Analyse granulométrique par tamisage. Association Française de Normalisation, Paris (1990).
- [22]- CEN, EN 12620:2002+A1:2008. Granulats pour béton. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles (2008).
- [23]- H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete. *J. Adv. Concr. Technol.*, 1(1) (2003) 5–15. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>
- [24]- AFGC, Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants. Association Française du Génie Civil, Document technique, Paris, France (2008).
- [25]- CEN, EN 196-1:2016. Méthodes d'essais des ciments — Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles (2016).

-
- [26]- ASTM International, ASTM C642-97. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA (1997).
- [27]- AFNOR, NF P 10-502. Pierres calcaires — Mesure de l'absorption d'eau par capillarité. Association Française de Normalisation, Paris (1999).
- [28]- A.S.E. Belaidi, L. Azzouz, E. Kadri, S. Kenai, Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.*, 31 (2012) 251–257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109>
- [29]- R. Alyousef, O. Benjeddou, M.A. Khadimallah, A.S. Mohamed, C. Soussi, Study of the effects of marble powder amount on the self-compacting concretes properties by microstructure analysis on cement-marble powder pastes. *Adv. Civ. Eng.*, (2018) 6018613. <https://doi.org/10.1155/2018/6018613>
- [30]- F. Bendjilali, M.S. Mansour, A. Makhlof, M. Ghrici, A.S.E. Belaidi, The combined effect of marble powder and polypropylene fibre on the properties of self-compacting repair mortar. *J. Eng. Fibers Fabr.*, 20 (2025) 1–13. <https://doi.org/10.1177/15589250251322922>
- [31]- A.M. Neville, *Properties of Concrete* (5ème édition). Pearson Education Limited, Harlow, Essex (2011).
- [32]- W. Wang, A. Sha, X. Li, F. Zhang, W. Jiang, D. Yuan, Z. Liu, Water resistance and luminescent thermal stability of SiO₂ coated phosphor and self-luminous cement-based materials: View from the perspective of hydration balance. *Constr. Build. Mater.*, 319 (2022) 126086. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126086>
- [33]- M. Uysal, K. Yilmaz, Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 33(7) (2011) 771–776. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005>
- [34]- B. Demirel, The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. *Int. J. Phys. Sci.*, 5(9) (2010) 1372–1380. <https://doi.org/10.5897/IJPS.9000564>