

# Effet des additions minérales sur le comportement physico- mécanique des bétons de sable - Etude micro structurelle

Makhloufi Zoubir<sup>\*1</sup>, Bederina Madani<sup>#2</sup>, Seyed Messaouda<sup>#3</sup>

<sup>#</sup>Department of Civil Engineering, University of Laghouat, 37G Road of Ghardaia, Laghouat 03000, Algeria.

Email 1 - [z.makhloufi@lagh-univ.dz](mailto:z.makhloufi@lagh-univ.dz)

Email 2 - [m.bederina@lagh-univ.dz](mailto:m.bederina@lagh-univ.dz)

Email 3 - [missougc@gmail.com](mailto:missougc@gmail.com)

**Résumé** — Cette étude présente les résultats d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans d'expériences a été utilisée afin d'optimiser le béton de sable (BS) formulés à base de matériaux locaux de la région de Laghouat (Algérie). Les objectifs principaux sont la formulation de nouveaux bétons à base des matériaux locaux. Les matériaux locaux valorisés sont des sables (alluvionnaire et dunaire) et le fillers calcaires avec une addition minérale la pouzzolane est ajoutée par substitution partielle au liant, et l'utilisation d'une nouvelle technique pour l'optimisation des mélanges à travers la substitution partielle au totale du ciment par : (la chaux, le plâtre et le la pouzzolane), ces dernières composants ont été utilisés séparément et en combinaisons binaires et ternaires. Et voir l'effet des variations de ces paramètres sur les résistances à la flexion (Rf) et les résistances à la compression (Rc) à 7, 28 et 90 jours.

**Mots clés** — Béton de sable, fillers calcaires, liants, propriétés physiques, microstructure.

## I. INTRODUCTION

Jusqu'à présent, les principaux liants qui ont été utilisés dans la préparation des mortiers et des bétons sont le ciment et la chaux. Actuellement, le ciment occupe la première place en termes d'utilisation en tant que liant mieux adapté à la fabrication du béton des structures ; néanmoins, il reste toujours très coûteux. Quant à la chaux, un liant plus ancien que le ciment, a été utilisée dans la construction au cours de plusieurs siècles. Elle présente plusieurs caractéristiques intéressantes, telles que la bonne plasticité et la compatibilité avec le ciment. Par ailleurs, le mélange de ciment et de chaux a également été utilisé dans certains usages, tels que les blocs de terre stabilisée comprimés. La substitution du ciment a aussi fait l'objet de plusieurs recherches dans le but de réduire le cout et la pollution de l'environnement par le gaz « CO<sub>2</sub> » causée par la production du ciment. Dans ce contexte, Nagaraj et al.2014 [1] ont découvert dans leur travail expérimental que l'utilisation de chaux, en tant que remplacement de ciment dans des proportions déterminées, a été clairement efficace pour l'amélioration de résistance mécanique à long terme. Ils ont trouvé, qu'avec cette substitution, la durabilité et les performances des bâtiments se sont nettement améliorées par rapport à celles obtenues avec le ciment seul.

D'autre part, de nombreuses études ont été menées dans le but d'améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers et des bétons, en ajoutant ou en remplaçant les liants courants (ciment ou chaux) [2-4] ). Certains d'entre eux ont montré que les matériaux pouzzolaniques peuvent aussi remplacer partiellement le ciment Portland dans les mortiers et les bétons. Alors que d'autres auteurs ont étudié l'effet combiné du ciment (C), de la chaux (Ch) et de la pouzzolane (P) sur les propriétés des mortiers et des bétons [5]). Mais, ce qu'il convient de noter est que jusqu'à maintenant, aucune étude similaire n'a été réalisée pour le béton de sable, où, d'une part, la teneur en ciment est plus faible que celle des mortiers et plus proche de celle des bétons avec une présence essentielle de filler (généralement de nature calcaire), et d'autre part, les agrégats grossiers sont totalement absents [6,7].

Sur la base de plusieurs travaux antérieurs menés sur le béton de sable [8] et dans le but de poursuivre les recherches sur ce matériau, le présent travail a principalement porté sur la recherche de la possibilité de substituer, partiellement ou totalement, le ciment de ce nouveau béton par d'autres ajouts. Dans ce contexte, une partie du ciment (C) a été remplacée par diverses proportions de Chaux (ch), plâtre (P) et Pouzzolane (Pz), afin d'apprécier l'effet de ces remplacements et d'optimiser leur effets combinés sur les propriétés mécaniques du béton de sable. Pour atteindre ces objectifs.

## II. MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Le sable (SAD) utilisé est un mélange de deux sables ; un sable dunaire « SD » et un sable alluvionnaire « SA ». Le rapport SA"/SD" = 1.76 a été déterminé dans une étude antérieure [1].

SA" : Sable alluvionnaire dont le diamètre des grains est supérieur à 0.4 mm ;

SD" : Sable de dune dont le diamètre des grains est inférieur ou égal à 0.4 mm.

Le sable SA possède une granulométrie étalée qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons et mortiers ordinaires [2].

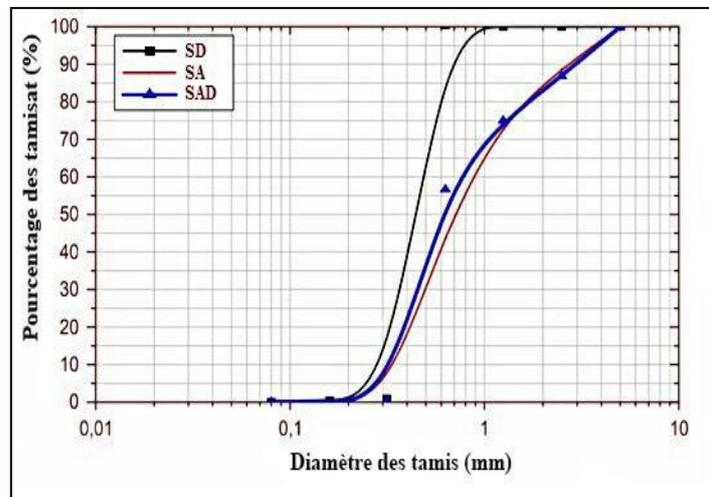


Fig. 1 Courbes granulométriques des sables utilisés.

Le Tableau 1 montre que le sable utilisé est très propre. Le module de finesse de sable SAD confirme l'existence de gros grains. Il est compris entre 2,20 et 2,80 [3]. Le pourcentage des vides est assez élevé, ce qui impose l'ajout des fillers pour combler les vides et éviter un surdosage en ciment [4].

Tableau. 1 Propriétés physiques du sable mélange utilisé (SAD)

Masse vol. app. (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol. abs. (kg/m <sup>3</sup> )	Compacité (%)	Equivalent de sable visuel	Equivalent de sable au piston	Absorption d'eau (%)
1511	2583	2.28	58	87	0.58

Le ciment utilisé est de type CEM I 42.5 N constitué de 98% de clinker et de 2% de fines de cru. Les principales caractéristiques physiques, mécaniques et la composition minéralogique du ciment utilisé sont données dans le Tableau 2.

Tableau. 2 Propriétés chimique (%) du ciment utilisé

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	PF
20.66	4.77	2.88	63.31	1.17	2.32	1.06

Tableau. 3. Propriétés chimiques du filler calcaire utilisé (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Perte au feu
0.42	0.13	0.06	56.01	0.12	0.01	0.01	0.01	0.43	0.03	42.78

L'analyse minéralogique du plâtre, montre une forte teneur en CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O (environ 96%), ce qui nous a permis de le classer en « classe I » qui correspond à une teneur en CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O supérieure à 90%. Les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans le tableau 4.

Tableau. 4 Propriétés chimiques du plâtre utilisé

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CL
Pourcentage ( % )	0,70	0,10	0,08	32,15	0,53	44,95	0,09	0,002

Les propriétés physiques des ajouts minéraux (chaux pouzzolane et plâtre) sont résumées dans le Tableau 5.

Tableau. 5 Propriétés physiques plâtre, chaux et pouzzolane.

Propriétés physique	Plâtre	Chaux	Pouzzolane
Surface spécifique Blaine cm <sup>2</sup> /g	1500-8000	650	388
Masse volumique apparente g/cm <sup>3</sup>	840-915 KG/M3	666	1005
Masse volumique absolue	1100-1300 KG/M3	2750	2850

La composition optimale du béton de sable étudié est inspirée de travaux antérieures [1].

Après malaxage, le mélange a été introduit dans des moules de (4x4x16) cm<sup>3</sup>. Les éprouvettes sont démoulées après 24 h et les échantillons sont conservés jusqu'au jour de l'essai, dans les mêmes conditions climatiques en laboratoire dans des conditions climatiques proches des conditions du chantiers, à savoir température, et humidité.

La maniabilité du mortier frais a été déterminée à l'aide du maniabilimètre B, elle est effectuée selon la norme NF P18-452

Concernant la caractérisation du béton durci, pour chaque composition, six éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm<sup>3</sup> ont été soumises à la flexion (3 points) pour obtenir la résistance à la flexion. Puis les demi-éprouvettes résultant de cet essai ont été soumises à la compression selon des cubes 4x4x4 cm<sup>3</sup> selon les normes NF EN 12390-5,

La structure des bétons étudiés a été effectuée par analyse d'images en utilisant un microscope optique où les grossissements peuvent aller jusqu' à 700x et par DRX

#### IV. RESULTS

L'identification des phases cristallines formées dans tous les bétons étudiés, dans le cas 1 : 50% Ciment, a été suivie par diffraction des rayons X.

Pour cette étude, de petits morceaux ont été extraits des différents échantillons étudiés (SC09 (100% C), SC17 (100% L), SC12 (100% P), SC14 (80% P + 20% L)) et SC20 (20%P + 80% L) et ont été broyés jusqu'à obtenir des poudres fines (<80 µm). Ces derniers ont été exposés aux rayons X afin de se faire une idée des nouveaux produits formés. L'analyse par diffraction des rayons X (figures 1 et 2) montre que les principaux produits présents dans les bétons de sable étudiés sont :

- (1) le quartz (SiO<sub>2</sub>) ;
- (2) le carbonate de calcium (calcite), (CaCO<sub>3</sub>) ;
- (3) les silicates de calcium hydratés (C-S-H) ;
- (4) la portlandite (Ca (OH)<sub>2</sub>) ;

Premièrement, toutes les figures 2, 3, 4 et 5 montrent que le quartz ( $\text{SiO}_2$ ) est présent dans tous les échantillons étudiés. C'est tout à fait logique puisque le sable utilisé pour le développement des bétons de sable étudiés est principalement composé de silice. De plus, on peut également constater que le pic de quartz est plus élevé lorsque la pouzzolane naturelle est présente dans le composite, ce qui ressort clairement des diagrammes relatifs aux échantillons SC12 (100% P) et SC14 (80% P). Cela est également logique puisque le quartz est l'un des principaux composants minéralogiques de la pouzzolane naturelle.

La calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) est également présente dans tous les échantillons mais avec des proportions différentes. Le taux le plus élevé de calcite est enregistré dans le cas de SC09 (100% C). À 100% de chaux, le SC17 produit moins de calcite que le SC09 et à 100% de pouzzolane, le SC12 contient moins de calcite que le SC09.

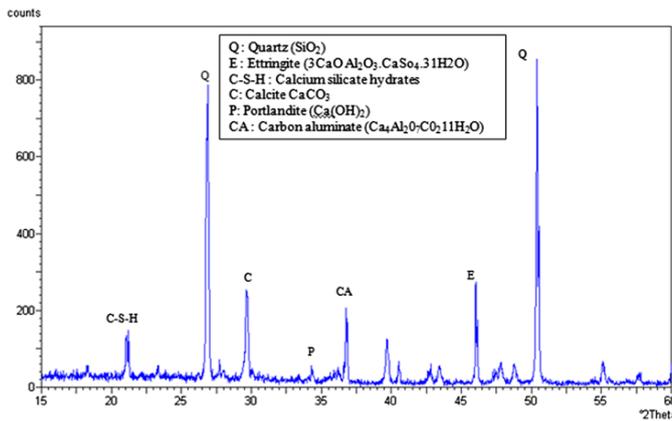


Fig. 2. Analyse DRX de SC12 (100% P).

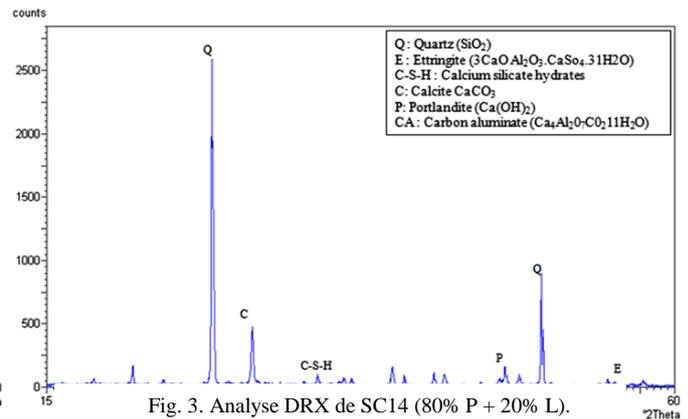


Fig. 3. Analyse DRX de SC14 (80% P + 20% L).

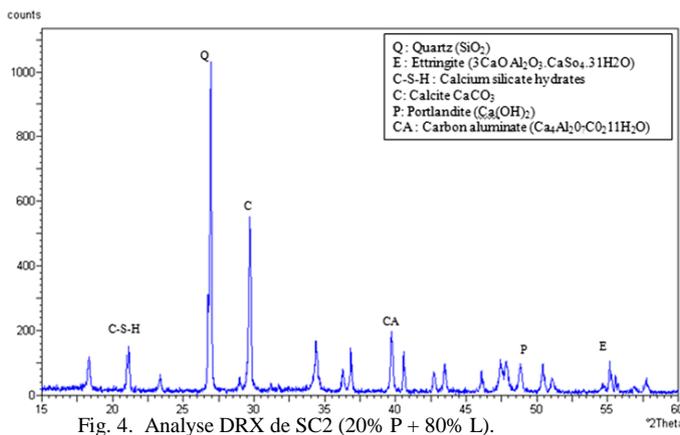


Fig. 4. Analyse DRX de SC2 (20% P + 80% L).

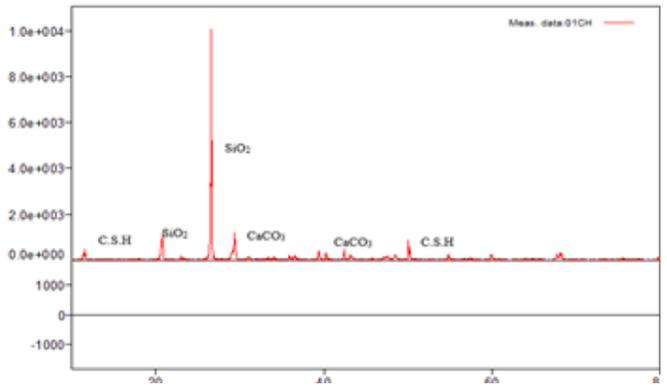


Fig. 5. Aspect général des échantillons d'essai.

En effet, pour un pourcentage de substitution plus élevé en chaux, le remplacement du ciment par la chaux conduit à une modification de la microstructure du mortier, révélée soit par la présence de microfissures dans la matrice, soit par un développement alternatif des hydrates. C'est peut-être ce dernier qui a réduit la résistance mécanique du béton de sable dans le cas du SC17 (100% Ch). En effet, les auteurs ont également soulevé le problème du choix du type de chaux dans les mortiers.

En ce qui concerne l'addition de pouzzolane, des travaux antérieures [9,10] ont également montré que les additions de pouzzolanes naturelles améliorent généralement le comportement mécanique du béton à long terme par l'amélioration de la microstructure et transformation du C-H en C-S-H ou C-A-S-par la réaction pouzzolanique. En revanche, ils ont montré que les pouzzolanes naturelles réduisaient la valeur de la résistance à la compression du mortier à court terme et à tous les niveaux de remplacement par rapport au mortier témoin.

C'est exactement ce qu'on a trouvé dans ce travail. Le SC12 (100% P) montre de faibles valeurs de résistance mécanique à un âge de 7 jours et des valeurs relativement élevées à un âge de 28 jours.

En ce qui concerne le mélange de pouzzolane et de chaux, il est clair que le développement de la calcite soit plus élevé lorsque la proportion de chaux est dominante par rapport à la pouzzolane (SC20 (80% L + 20% P)), c'est-à-dire que la quantité de calcite est délimitée par une certaine quantité de chaux.

Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui résultent généralement de l'interaction entre le ciment et l'eau (dans la pâte de ciment durcie) sont présents dans tous les échantillons étudiés car tous ces bétons contiennent une quantité de ciment de  $175 \text{ kg} / \text{m}^3$  (C = 0%) à  $350 \text{ kg} / \text{m}^3$  (C = 100%).

[10,11].

En ce qui concerne la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), il est clair que sa proportion est réduite dans la pâte de ciment en raison de la réaction pouzzolanique. Le taux le plus bas de portlandite a été enregistré dans l'échantillon SC12 (100% P). Les échantillons SC14 et SC20, contiennent une proportion de pouzzolane ; les taux de portlandite enregistrés sont inférieures à celles des échantillons SC09 et SC17 où il n'y a pas de pouzzolane.

## V. CONCLUSIONS

A partir des essais de cette étude on a pu arriver aux résultats suivants : L'effet de la pouzzolane semble être plus bénéfique pour la résistance mécanique de la chaux.

Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui résultent généralement de l'interaction entre le ciment et l'eau (dans la pâte de ciment durcie) sont présents dans tous les échantillons étudiés car tous ces bétons contiennent une quantité de ciment de  $175 \text{ kg} / \text{m}^3$  (lorsque C = 0%) à  $350 \text{ kg} / \text{m}^3$  (lorsque C = 100%).

En ce qui concerne la **portlandite** ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), il y a lieu de noter que sa proportion est réduite dans la pâte de ciment en raison de la réaction pouzzolanique. Le taux le plus bas de portlandite a été enregistré dans l'échantillon SC12 (100% P). Les échantillons SC14 et SC20, contiennent une proportion de pouzzolane ; les taux de portlandite enregistrés sont inférieurs à celles des échantillons SC09 et SC17 où il n'y a pas de pouzzolane.

## REFERENCES

- [1] Bederina M. *Caractérisation mécanique et microstructures des bétons de sables locaux, Effet de fillers et de la nature des sables sur le comportement du matériau*. mémoire de magister, université de Laghouat .2000.
- [2] Bouziani T. *Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach* .Constr. Build.Mater.Vol.9, PP308-314, 2013. Mater. 2013;49:308–314.
- [3] Arandigoyen M, Alvarez J I. *Pore structure and mechanical properties of cement–lime mortars* . Cem Concr Res, Vol.37, PP 767–775, 2007.
- [4] Metwally AA, Abd Elaty A, Mariam F G. *Performance of Portland cement mixes containing silica fume and mixed with lime-water*. HBRC Journal, Vol.10, PP247–257, 2014.
- [5] Grist E R, Paine K A, Heath A. *Compressive strength development of binary and ternary lime-pozzolan mortars*. Mater. Des, Vol.52,PP 514–523 ,2013.
- [6] Neville A M, Brooks J J . *Concrete Technology* . 2nd ed. Pearson education, prentice Hall ,2010.
- [7] Siad H, Khelafi H, Mouli M . *Comportements physico-mécaniques des mortiers et briques à base de liant (pouzzolane-chaux)*. Colloque Cmedimat ,(06-07) (12).2005.
- [8] Walker R, Pavía S. *Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes*. Materials and structures, Vol.44, PP 1139–1150, 2011.
- [9] Mosleh M S, muttar A A. *The mechanical properties of lime concrete*. Journal of engineering and sustainable development, Vol. 21, N°02, 2017.
- [10] Čáchová1 M, Koňáková1 D, Vejmelková1 E, Vyšvařil M. *Ternary binder based plasters with improved thermal insulating ability*. Materials Science and engineering, Vol.251, 2017.
- [11] YU Q I, Brouwers H J H *Microstructure and mechanical properties of b-hemihydrate produced gypsum: An insight from its hydration process*. Construction and building materials, Vol.25, PP3149–3157, 2011.