

Effect of W/C ratio on the rheological and physico-mechanical behavior of high performance concrete formulated with natural pozzolana

Effet de rapport E/C sur le comportement rhéologique et physico-mécanique de Béton à Haute Performance élaboré à base de pouzzolane naturelle

Article Info:

Article history: Received 2023-11-11 / Accepted 2024-01-10 / Available online 2024-01-11

doi: 10.18540/jcecv110iss2pp17490



Ismahene Guemidi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-9622>

University Chadli Bendjedid, El Tarf, Algeria

E-mail: ismahene_civil@yahoo.fr

Hosni Abderrahmane Taleb

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8942-9492>

FIMAS Laboratory, Department of Civil Engineering and Hydraulic, Institute of Science and Technology, University Center of Mila, Algeria

E-mail: talebhosni@yahoo.fr

Abdelaziz Yazid

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6198-6967>

University Tahri Mohammed of Bechar, Algeria

E-mail: abdelaziz.yazid@univ-bechar.dz

Résumé

Les bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons qui présentent des résistances mécaniques élevées (> 60 MPa) et une micro texture très dense (faible porosité), qui empêche la pénétration des agents agressifs. Dans le contexte de ce travail une étude expérimentale a été faite à fin d'élaborer un béton BHP à base des matériaux locaux disponible dans la région de Béchar, dont le but de réduire le cout de BHP. Le deuxième objectif de ce travail est de voir l'influence du rapport E/C (0.3, 0.35, 0.4) sur le comportement rhéologique et physico-mécanique (la maniabilité, porosité, résistances à la compression, résistance à la flexion, l'absorption d'eau et la masse volumique) de BHP élaboré à base de pouzzolane naturelle de la région de Boukais (Bechar), et voir aussi l'effet de la pouzzolane naturelle qui a utilisé comme une substitution partielle dans le ciment portland (10% et 20%) sur le comportement physico-mécanique de BHP.

Mots clés: Rapport E/C BHP. Résistances Mécaniques. Maniabilité. L'absorption d'eau. Porosité. Pouzzolane Naturelle.

Abstract

High-performance concretes (HPC) are known for their high mechanical strength (> 60 MPa) and dense microtexture, which hinders the penetration of aggressive agents. In this study, we conducted experiments to create cost-effective HPC using locally available materials in the Bechar region. The second objective is to explore how different water-to-cement ratios (0.3, 0.35, and 0.4) affect the rheological and physico-mechanical properties (workability, porosity, compressive and flexural strength, water absorption, and density) of HPC made with natural pozzolana from the Boukais region. Additionally, we examined the impact of using natural pozzolana as a partial substitute in Portland cement (10% and 20%) on the physico-mechanical behavior of HPC.

Keywords: W/C ratio. HPC (High-Performance Concrete). Mechanical Strengths. Workability. Water Absorption. Porosity. Natural Pozzolana.

1 Introduction

Le béton à hautes performances (BHP) est une nouvelle génération de bétons qui peut répondre aux exigences des constructions soumises à des contraintes très élevées dans des environnements très agressifs. Néanmoins, l'impact environnemental et économique de ce matériau reste l'inconvénient majeur qui limite sa vaste utilisation.

Impact environnemental : La fabrication du ciment cause le rejet de quantités non négligeables de dioxyde de carbone. Elle est une importante source de gaz à effet de serre; elle est à l'origine d'environ 8 % des émissions totales de CO₂ à l'échelle du globe (GCP, 2012).

Impact économique : Le choix des bétons à hautes performances comme matériau de construction a un impact sur les coûts de fabrication. Il faut compter le coût des constituants initiaux (super-plastifiant, fumée de silice, ciment) et également l'énergie nécessaire à la fabrication du ciment. A titre d'exemple indicatif, la consommation énergétique annuelle moyenne des cimenteries en Algérie (1 Milliard KWh, 7 milliards de thermies) équivaut à la consommation annuelle en électricité d'une ville de 750 000 à 800 000 habitants (9700KWh/habitant), (Cetim, 2001).

Plusieurs études ont été effectuées sur des bétons ou mortiers confectionnés avec des ajouts pouzzolaniques ; entrés comme de substitution de ciment, dans le but d'évaluer l'influence de ces additions sur la résistance mécanique et la durabilité. (Ghrici et al., 2006 ; R. Chihaoui et al., 2009 ; Senhadji et al., 2006; Mokhtaria et al., 2009).

L'utilisation de la pouzzolane naturelle comme un remplace partiel du ciment dans les bétons a engendré des résistances à la compression plus élevées que celles du béton témoin à tous les stades de durcissement. (Guemidi et al., 2015).

La qualité du béton est influencée par le choix des matériaux et le processus de mélange. En ce qui concerne les bétons à base de fumée de silice, la résistance à la compression dépend fortement du rapport eau/matière cimentaire, représentant la proportion d'eau par rapport aux matériaux cimentaires tels que la fumée de silice, les cendres volantes, le sable dunaire concassé et le laitier, utilisés dans le mélange. (Kadri et al., 2012; et Agha et al., 2023) indiquent qu'une réduction de ce rapport peut significativement accroître la résistance à la compression du béton. De plus, l'addition de fumée de silice est mentionnée comme un moyen d'améliorer la résistance du béton en remplissant les espaces entre les particules de ciment et en favorisant la formation de composés cimentaires supplémentaires.

Plusieurs études ont confirmé que l'incorporation de minéraux pouzzolaniques tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier granulé de haut-fourneau concassé dans la microstructure du béton améliore ses propriétés mécaniques et physiques, comme l'ont souligné Kiskou et al., (2017), Yin et al., (2018) et Herath et al., (2020).

2. Matériaux de construction utilisés

2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland CEM I 52.5 N (ciment blanc Malaki)

2.2. Adjuvant

Super-plastifiant haut réducteur d'eau (MEDAPLAST SP)

2.3. Eau de gâchage

L'eau potable du robinet de la ville de Béchar

2.4. Granulat :

2.4.1. Gravier

Gravies concassés de fraction 3/8, leur nature pétrographique est carbonatée, proviennent de la station de concassage « PRODAG, 2000 » qui s'est installé au pied de djebel Béchar.

2.4.2. Sables

Le sable utilisé dans cette étude est le mélange de (40% sable alluvionnaire de la région de Ksiksou + 60% sable à prédominances andésitique de la région de Boukais).

2.5. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est une roche d'origine volcanique de la région de Boukais (Figure 1). Après l'opération de broyage, nous avons obtenus une poudre fine dont la finesse est de l'ordre de 80 μm .



Figure 1– Roches d'origine volcanique de la région de Boukais.

2.5.1. Identification chimique

L'addition est une pouzzolane naturelle extraite des roches volcaniques de la région de Boukais. La composition chimique de cette pouzzolane naturelle est illustrée dans le tableau 1.

Tableau 1 – Caractéristiques chimiques de pouzzolane.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
51.89	16.74	10.05	3.34	4.03	0.02	1.71	4.77	3.86	0.35	3.25

Selon les résultats de la diffraction aux rayons X de la pouzzolane naturelle, on observe une forte intensité des pics qui caractérisent le quartz et la calcite (Figure 2).

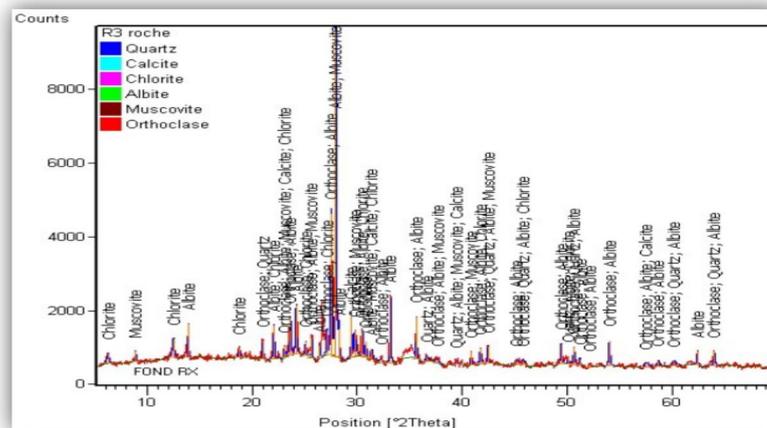


Figure 2 – DRX radiogramme de la pouzzolane naturelle.

2.5.2. Indice d'activité pouzzolanique

Pour déterminer la pouzzolanité de cette roche broyée, l'étude expérimentale a été menée sur des éprouvettes de mortiers de 4x4x16cm (Figure 3). Les mortiers sont élaborés selon la norme EN 206-1, avec les rapports massiques suivants :

$$\frac{2}{3} \text{ Sable (0/2)}, \frac{1}{9} \text{ d'eau}, \frac{2}{9} \text{ ciment}$$



Figure 3 – Eprouvettes de mortiers de 4x4x16cm.

L'indice d'activité pouzzolanique « I » est le rapport entre les résistances à la compression du mortier contenant P % (25%) de pouzzolane et celle du mortier sans pouzzolane en substitution de ciment, il est donné par la formule suivante :

$$I(\%) = 100 \frac{R_p}{R_0} \quad (1)$$

R_p : Résistance à la compression de mortier 25% PN en MPa.

R₀ : Résistance à la compression de mortier sans PN en MPa.

Tableau 2 – Indice d'activité pouzzolanique.

Roche broyée	Indice d'activité pouzzolanique (%)
R	0.81

Après la détermination de l'indice d'activité pouzzolanique « I » de cette roche broyée et d'après les analyses chimiques de cette dernière ; on peut confirmer que la pouzzolane naturelle extraite des roches volcaniques de la région de Boukais (wilaya de Béchar), conforme à la norme ASTM C 618 :

- SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ = 78.68 % ($> 70\%$)
- L'indice d'activité I = 0.81% ($0,67 < I < 1$)
- teneur en verre ; SiO₂-CaO = 48.55 % ($> 34\%$)

3. Formulation de béton à haute performance

Pour déterminer la formulation de béton à haut performance nous avons réalisé plusieurs essais expérimentaux. La formulation des différents bétons est montrée dans le tableau 3.

Tableau 3 – Formulation des bétons BHP.

Bétons BHP	BHP 0%	BHP 10%	BHP 20%
Constituants			
Ciment (Kg/m³)	500	450	400
Pouzzolane naturelle (Kg/m³)	0	50	100
Gravier 3/8 (Kg/m³)	1055.66	1055.66	1055.66
Sable KS (40%) (Kg/m³)	264.36	264.36	264.36
Sable BK (60%) (Kg/m³)	396.54	396.54	396.54
Super plastifiant (Kg/m³)	15	15	15
Eau (E/C= 0.3)	150	150	150
Eau (E/C= 0.35)	175	175	175
Eau (E/C= 0.4)	200	200	200

4. Essai sur le béton BHP à l'état frais

4.1. La maniabilité [la norme (NF P 18-452, 1988)]

La détermination de la maniabilité des bétons à l'état frais se fait à l'aide d'un maniabilimètre B, cet essai consiste de mesurer le temps nécessaire d'un volume de béton pour atteindre un repère tracé sur le maniabilimètre sous l'effet des vibrations. Dès que l'opération de malaxage est terminée, le mélange de BHP frais est introduit dans le plus grand compartiment de moule, délimité par la cloison et il est mis en place par piquage en quatre couches. Le déclenchement d'un chronomètre se fait simultanément avec le retraitage de la cloison

amovible (le vibreur se met en marche). Le chronomètre est arrêté lorsque le niveau de béton atteint un trait repère sur la paroi du moule (Figure 4). Le temps (t) mis par le béton pour s'écouler caractérise sa consistance (Tableau.4).

Tableau 4 – Le temps d'écoulement de béton et sa consistance.

Classe de consistance	Durée en (s)
fermet	≥ 40 s
plastique	$20 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$
très plastique	$10 \text{ s} \leq t \leq 20 \text{ s}$
fluidet	≤ 10 s

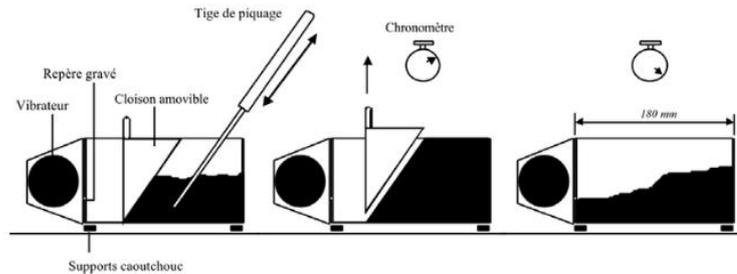


Figure 4 –Essai au maniabilimètre B (Cyr M. 1999).

La Figure 5, présente le temps d'écoulement des bétons BHP (0%, 10% et 20%PN) en fonction des différents rapports E/C (0.3, 0.35 et 0.4)

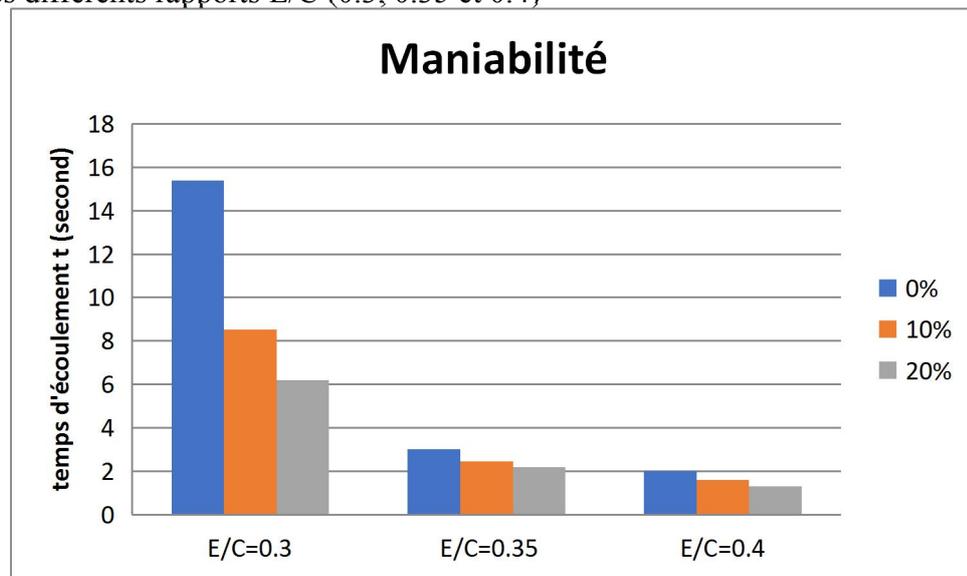


Figure 5 – Effet de rapport E/C sur la maniabilité des bétons BHP (0,10 et 20% PN).

D'après les résultats illustrés sur le graphe ci-dessus, il est possible de constater que:

L'utilisation de la pouzzolane naturelle comme remplacement partiel du ciment a permis d'obtenir une amélioration de la maniabilité pour les différents rapports E/C (0.3, 0.35 et 0.4), à titre indicatif, un remplacement de 20% du ciment diminue le temps d'écoulement de 59.80%, 27.48% et 35% pour les rapports E/C= (0.3, 0.35 et 0.4) respectivement par rapport le BHP 0%.

Pour les différents bétons élaborés (BHP 0,10 et 20% PN), le temps d'écoulement est diminué avec l'augmentation du rapport E/C (0.3, 0.35 et 0.4), à titre d'exemple, pour le béton BHP 0% les valeurs du temps d'écoulement obtenues sont de l'ordre de 15.4, 3.02 et 2 seconde.

La présence de la pouzzolane dans les mélanges (les trois rapports E/C=0.3, 0.35 et 0.4) à améliorer la maniabilité. La substitution partielle de 20 % de ciment portland par la pouzzolane naturelle montre une amélioration de la maniabilité avec un meilleur temps d'écoulement (1,3

secondes). Cette augmentation de la maniabilité peut s'expliquer par la finesse des particules de pouzzolane.

5. Essai sur le béton BHP à l'état durci

5.1. Caractéristiques mécaniques « Résistance à la flexion et à la compression »

Sur la base de la norme européenne NF EN 196-1, les essais de flexion sont conduits sur des éprouvettes de forme prismatique 40 x 40 x 160 mm. Les demi-prismes des éprouvettes obtenues après rupture en flexion sont rompus en compression (Figure 6).



Figure 6 – Essai de flexion & Essai de compression

Les résultats de l'effet de rapport E/C sur la résistance de compression et sur la résistance à la flexion des bétons BHP (0,10 et 20% PN) à l'âge de 28 jours sont reportés sur les Figure 7 et Figure 8.

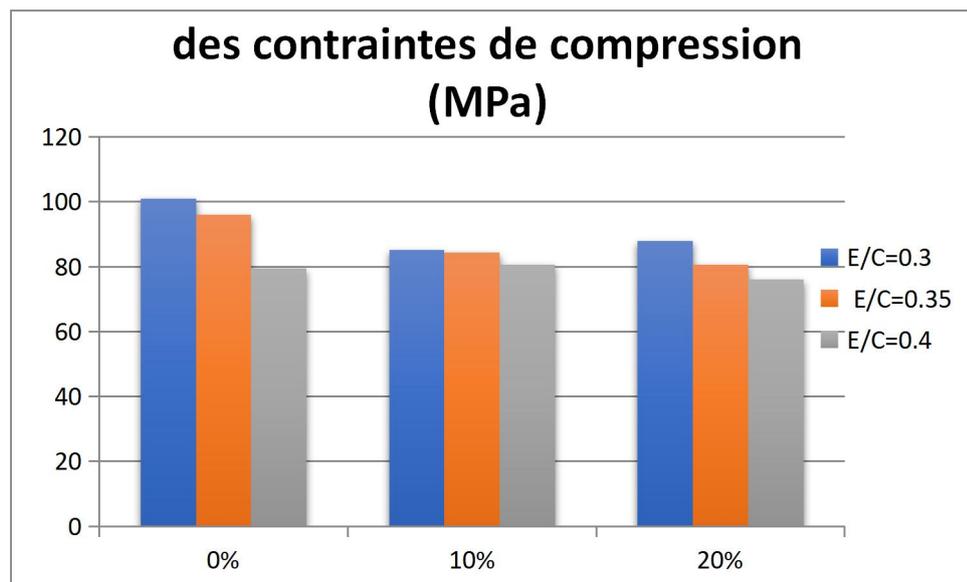


Figure 7 – Effet de rapport E/C sur la résistance de compression des bétons BHP (0,10 et 20% PN).

Dans les différents bétons BHP élaborés (0% PN, 10% PN et 20% PN), la résistance à la compression est diminuée avec l'augmentation de rapport E/C, par exemple pour les différents bétons BHP élaborés (0% PN, 10% PN et 20% PN), la résistance à la compression de bétons BHP élaborés avec un rapport E/C= 0.4 est respectivement diminuée de 21.26%, 5.4% et 13.54% par rapport les bétons BHP élaborés avec un rapport E/C= 0.3.

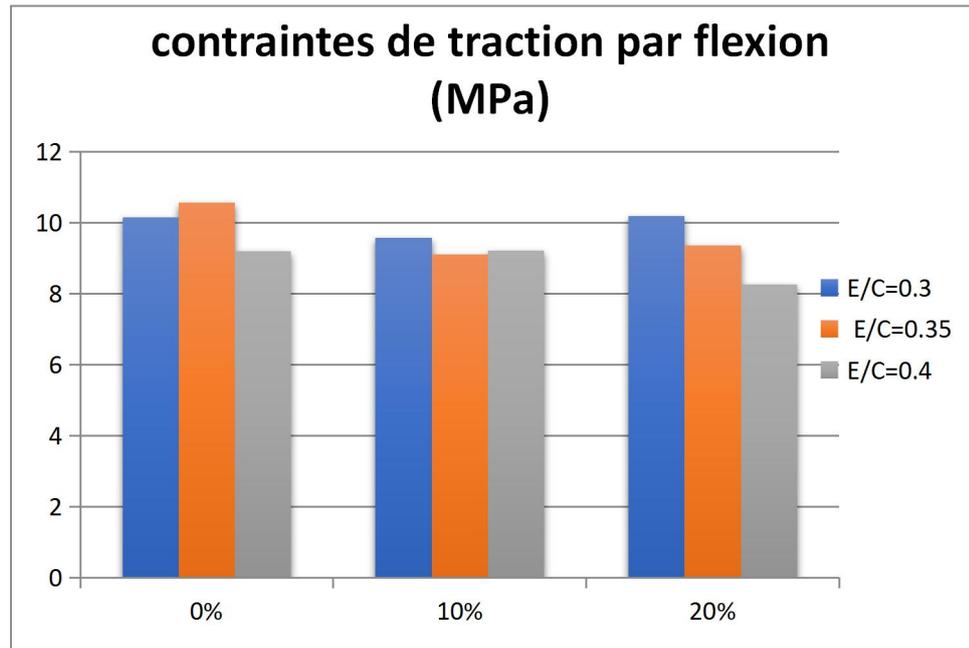


Figure 8 – Effet de rapport E/c sur la résistance de traction par flexion des bétons BHP (0,10 et 20% PN)

Dans les différents bétons BHP élaborés (0% PN, 10% PN et 20% PN), la résistance de traction par flexion est diminuée avec l'augmentation de rapport E/C, à titre indicatif pour les différents bétons BHP élaborés (0% PN, 10% PN et 20% PN), la résistance de traction par flexion de bétons BHP élaborés avec un rapport E/C= 0.4 est respectivement diminuée de 9.41%, 3.81% et 18.85% par rapport les bétons BHP élaborés avec un rapport E/C= 0.3.

5.2. La Porosité

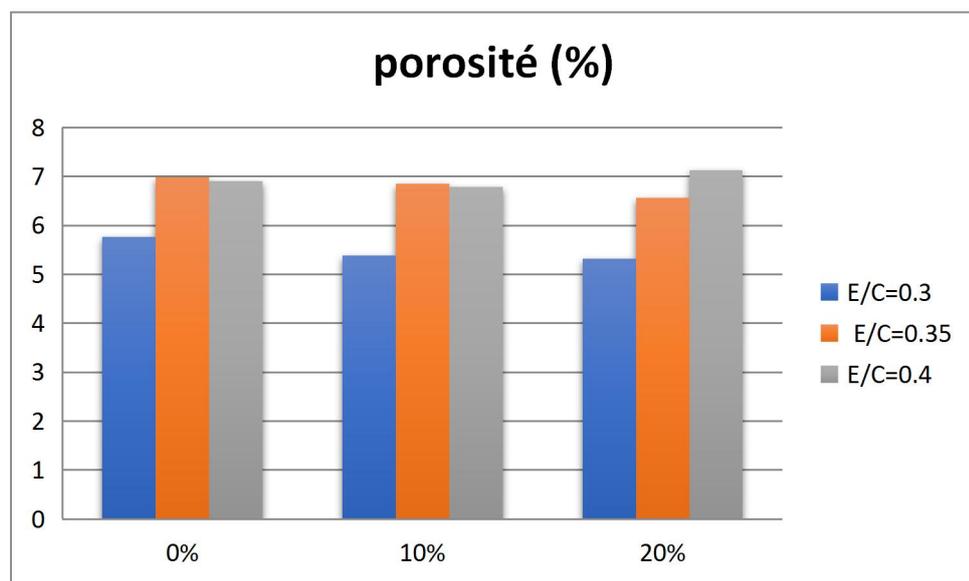


Figure 9 – Effet de rapport E/c sur la porosité des bétons BHP (0,10 et 20% PN)

Concernant la porosité, on a constaté les points suivants :
 Pour les rapports E/C=0.3, E/C=0.35 et E/C=0.4, la porosité des bétons BHP élaborés est diminuée avec l'augmentation de tau de pouzzolane naturelle, à titre indicatif, pour le rapport E/C=0.3, le remplacement de 20% de ciment portland par la pouzzolane naturelle a induit une diminution de 7.8% de la porosité par rapport le BHP0%, cela peut être due à la finesse des particules de pouzzolane naturelle.

Une seule exception pour le rapport $E/C=0.4$, on a constaté une augmentation de la porosité pour le béton BHP 20%.

5.3. La masse volumique

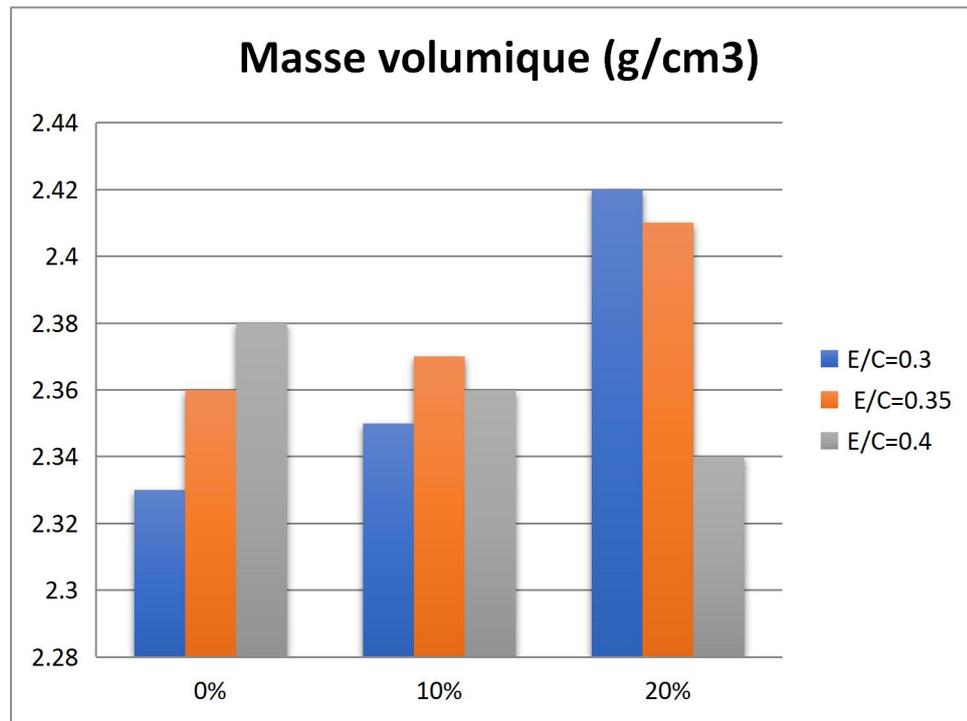


Figure 10 – Effet de rapport E/c sur la masse volumique des bétons BHP (0,10 et 20% PN).

Pour le rapport $E/C=0.3$ et 0.35 , on a constaté que la masse volumique des bétons BHP élaborés est augmentée avec l'augmentation de tau de pouzzolane naturelle, à titre d'exemple, pour le rapport $E/C=0.3$, le remplacement de 20% de ciment portland par la pouzzolane naturelle a induit une augmentation de 3.86% de la masse volumique par rapport le BHP0%. Contrairement au rapport $E/C=0.4$, la masse volumique des bétons BHP élaborés est diminuée avec l'augmentation de tau de pouzzolane naturelle.

5.4. L'effet de pouzzolane sur la masse d'eau absorbée (capillarité) de BHP élaboré

$E/C=0.3$: Les valeurs moyennes de l'essai de capillarité (M eau) sont présentés sur la Figure 11.

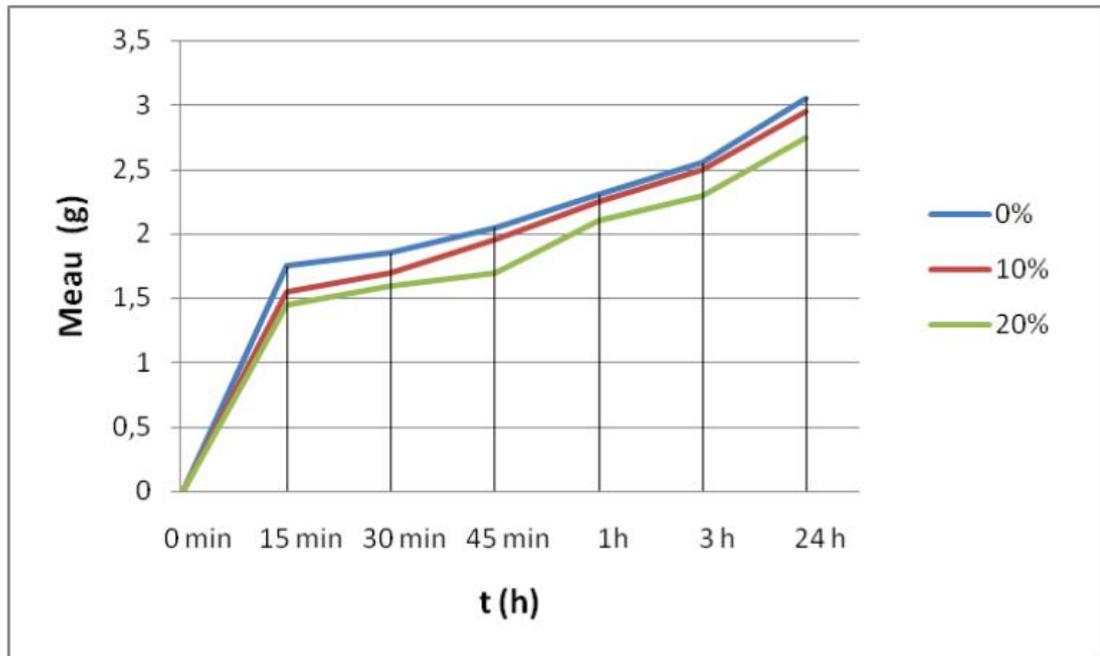


Figure 11 – La masse d'eau absorbée par les différents bétons BHP élaborés (E/C=0.3).

E/C=0.35 : Les valeurs moyennes de l'essai de capillarité (M eau) sont présentés sur la Figure 12.

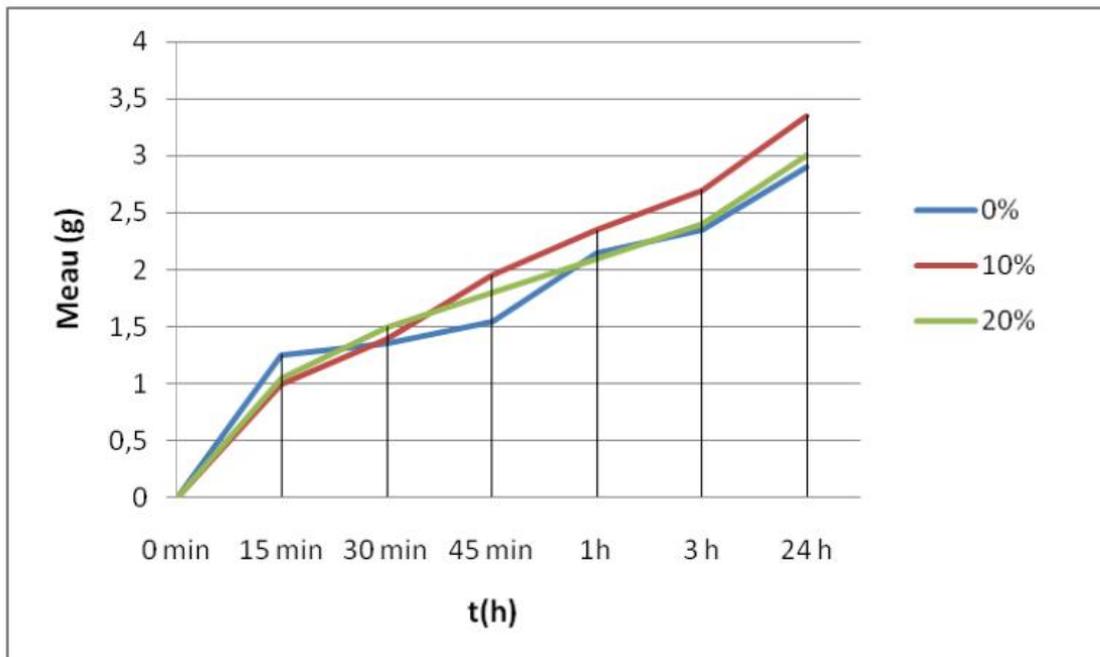


Figure 12 – La masse d'eau absorbée par les différents bétons BHP élaborés (E/C=0.35)

E/C=0.4 : Les valeurs moyennes de l'essai de capillarité (M eau) sont présentés sur la Figure 13.

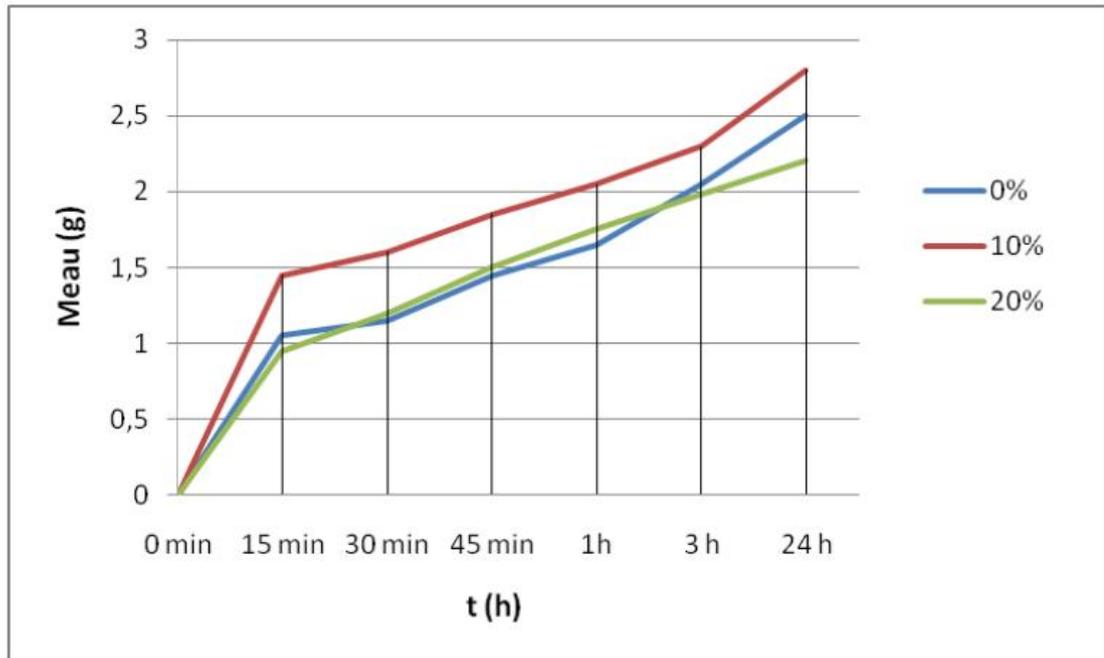


Figure 13 – La masse d'eau absorbée par les différents bétons BHP élaborés (E/C=0.4)

Pour le béton BHP 0%, la masse d'eau absorbée est diminuée avec l'augmentation des rapports E/C. Pour les bétons BHP 10% et BHP 20%, on a constaté une diminution de la masse d'eau absorbée avec l'augmentation des rapports E/C, sauf les bétons élaborés avec un rapport E/C= 0.35, on a constaté une augmentation de la quantité d'eau absorbée par rapport au béton BHP 0%. A titre d'exemple pour les BHP 10% et BHP 20%, la masse d'eau absorbée pour le béton élaboré avec un rapport E/C= 0.35 est respectivement augmentée de 13.56% et 9.09% par rapport les bétons élaborés avec un rapport E/C= 0.3.

5.5. Le coefficient d'absorption d'eau :

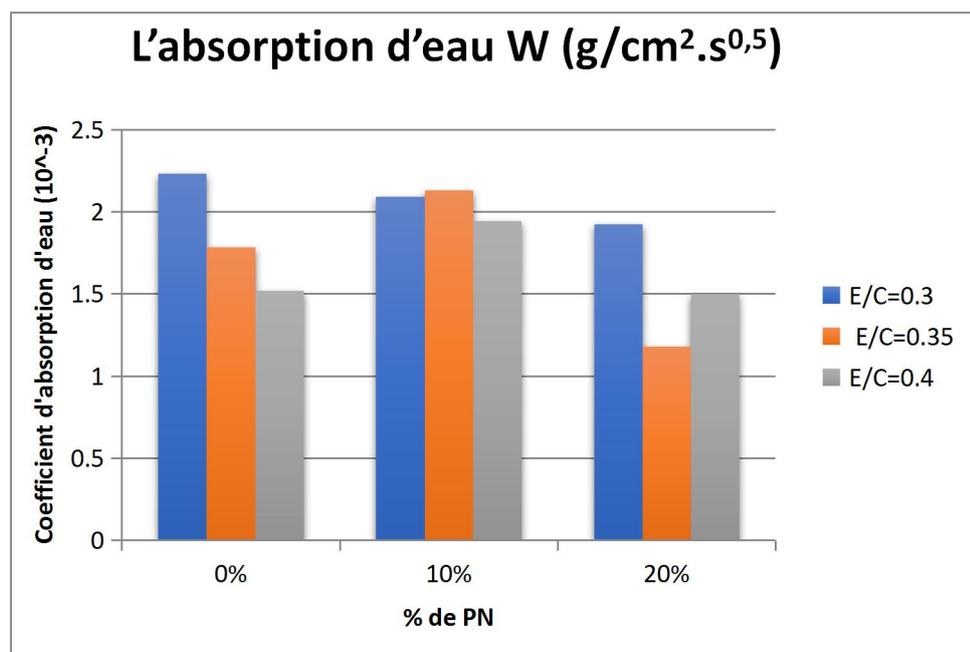


Figure 14 – Effet de rapport E/c sur le coefficient d'absorption d'eau des bétons BHP (0,10 et 20% PN)

Pour le rapport $E/C = 0.3$, on a constaté que l'ajout de 10 et 20 % de pouzzolane naturelle a induit une diminution de coefficient d'absorption d'eau par rapport BHP 0%. Pour le rapport $E/C = 0.35$ et 0.4 , on a constaté que l'ajout de 20 % de pouzzolane naturelle a induit une diminution de coefficient d'absorption d'eau par rapport BHP 0%. Cependant, l'ajout de 10 % de pouzzolane naturelle a provoqué une augmentation de coefficient d'absorption d'eau par rapport BHP 0%.

6. Conclusion:

Cette étude liée au développement durable, motivée par le besoin croissant de ressources en matériaux et les exigences de préservation de l'environnement. Les objectifs principal de l'étude étaient : premièrement ; l'élaboration d'un béton à hautes performances en utilisant des matériaux locaux disponibles dans la région du sud-ouest de l'Algérie. L'accent est mis sur la valorisation des ressources locales pour minimiser les coûts de production des bétons à hautes performances. Deuxièmement voir l'influence du rapport E/C (0.3, 0.35, 0.4) sur le comportement rhéologique et physico-mécanique de BHP élaboré à base de pouzzolane naturelle de la région de Boukais (Bechar).

D'après les résultats de cette étude, on peut conclure que : Tout d'abord, l'utilisation de la pouzzolane naturelle comme remplacement partiel du ciment a entraîné une amélioration de la maniabilité pour les différents rapports E/C (0.3, 0.35 et 0.4), a titre indicatif, un BHP 20% avec $E/C=0.4$ présente un meilleur temps d'écoulement (1,3 secondes).

De plus, le béton BHP ($E/C=0.3$) élaboré atteint des résistances mécaniques très élevées jusqu'au 101 MPa pour la résistance à la compression et 10.6 MPa pour la résistance a la traction par flexion, cependant, le remplacement partiel de ciment par 20% pouzzolane naturelle a induit une diminution de la résistance a la compression de l'ordre de 12%, cette diminution n'a pas une grande influence sur les bétons BHP élaborés, parce que sa résistance reste toujours dans l'intervalle des bétons BHP > 60 MPa.

De plus, les différents bétons BHP élaborés présentent un intervalle de porosité entre [5.3 et 7.1], cette faible porosité est attribuable à l'effet de remplissage et à l'effet pouzzolanique, qui réduisent la porosité totale et améliorent la compacité de la matrice cimentaire.

Concernent le rapport $E/C=0.3$ et 0.35 , la masse volumique des bétons BHP élaborés est augmentée avec l'augmentation de tau de pouzzolane naturelle.

L'ajout de 10 et 20 % de pouzzolane naturelle a induit une diminution de coefficient d'absorption d'eau par rapport BHP 0% ; cela est constaté pour le rapport $E/C = 0.3$.

D'après ces résultats, on peut dire que les bétons à hautes performances fabriqués à partir de matériaux locaux présentent des caractéristiques similaires à celles des bétons à hautes performances décrits dans la littérature. Ainsi, il est possible de développer un béton à hautes performances en utilisant des matériaux locaux disponibles dans la région de Bechar.

References

- Agha, N., Makkani, A., Taфраoui, A., & Zaouai, S. (2023). Improving the physical and mechanical properties new concrete containing crushed dune sand and demolition waste as coarse aggregate. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 9(5), 16002–01e. <https://doi.org/10.18540/jcecvl9iss5pp16002-01e>
- Benkaddour, M., Kazi aoual, F., Abdelaziz, S. (2009). 'Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle'.
- Cetim, (2001). 'Centre d'Etude et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction' Bulletin N 4.
- Chihaoui, R , Khelafi, H , Mouli, M, Senhadji, Y. (2009) . 'Effets de la Pouzzolane Naturelle sur la Durabilité des Mortiers Exposés aux Attaques Sulfatiques.

- Cyr M. (1999). Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires, Thèse de doctorat, (INSA de Toulouse).
- GCP, [http://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/changement climatique-GES.php](http://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/changement_climatique-GES.php) (2012).
- Ghrici, M. (2006). Etude des propriétés physico Mécaniques et de la durabilité des ciments à base de pouzzolane naturelle , Thèse de doctorat d'état en génie civil, USTMB d'Oran, Algérie.
- Guemidi, I. Abdelaziz, Y . & Nebbou, A. (2015). High-performance concrete reinforced with fibres from waste. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Waste and Resource Management*. Issue WR4. Pages 158–165. <http://dx.doi.org/10.1680/warm.14.00008>
- Herath, C., Gunasekara, C., Law, D.W., & Setunge, S. (2020). Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review, *Construction and Building Materials*, 258, pp.1–13.
- Kadri, E. H., Aggoun, S., Kenai, S. and Kaci, A. (2012). The compressive strength of highperformance concrete and ultrahigh-performance. In *Advances in Materials Science and Engineering* (Vol. 2012). <https://doi.org/10.1155/2012/361857>
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S.K., Nayak, S., & Dutta, S.C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, *Construction and Building Materials*, 131, pp. 721–740.
- NF P 18-452, (1988). Norme Française-Bétons – Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres, AFNOR, Paris, France.
- Senhadji, Y. (2006). L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques)', Mémoire de magistère en génie civil, USTMB d'Oran, Algérie.
- Yin, K., Ahamed, A., & Lisak, G. (2018). Environmental perspectives of recycling various combustion ashes in cement production–A review, *Waste Management*, 78, pp. 401–416.