

EFFET DE L'ÂGE SUR LA VARIABILITÉ DE LA MESURE DE LA RÉSISTANCE A LA COMPRESSION DU BÉTON

EFFECT OF AGE ON THE VARIABILITY OF COMPRESSIVE STRENGTH MEASUREMENT OF CONCRETE

Réception : 11/11/2024

Acceptation : 03/12/2024

Publication : 10/01/2025

BOUKELLOUDA Abdelhafid¹, KHEFFACHE Toufik² & CHELOUAH Nasser³

¹Université de Bejaia, Faculté de Technologie, Laboratoire de Génie de Construction et d'Architecture (LGCA), 06000 Bejaia, Algérie. E-mail : abdelhafid.boukellouda@univ-bejaia.dz

²Université de Bejaia, Faculté de Technologie, Laboratoire de Génie de Construction et d'Architecture (LGCA), 06000 Bejaia, Algérie. E-mail : toufik.kheffache@univ-bejaia.dz

³Université de Bejaia, Faculté de Technologie, Laboratoire de Génie de Construction et d'Architecture (LGCA), 06000 Bejaia, Algérie. E-mail : nasser.chelouah@univ-bejaia.dz

Résumé- La résistance à la compression des bétons demeure un enjeu de grand intérêt dans le domaine de la construction. L'effet de l'âge de durcissement des éprouvettes influe sur le comportement et la fiabilité des structures en béton, ce qui impose de le prendre en compte dans les calculs de dimensionnement et la conception des pièces réalisées avec ce matériau. Il est également nécessaire d'intégrer ce paramètre dans l'élaboration des modèles de prédiction, ce qui justifie l'utilisation d'approches statistiques probabilistes basées sur la notion d'une probabilité acceptable. Un travail expérimental a été conduit pour étudier l'effet de l'âge sur la variabilité de la mesure des résistances à la compression du béton en utilisant des matériaux locaux. Des essais d'écrasement ont été réalisés sur des cubes d'arête 15 cm à différents âges (7 et 28 jours). Ces essais ont permis d'analyser comment l'âge des échantillons influe les résultats de la résistance à la compression, en tenant compte de l'évolution des propriétés du béton au fil du temps. Les résultats obtenus ont montré des écarts significatifs de résistance à la compression pour tous les âges étudiés.

Cette variabilité souligne l'importance de considérer l'effet de l'âge dans les pratiques de dimensionnement et de conception des structures en béton. Pour prendre en compte la dispersion des réponses mesurées, le modèle statistique de Weibull à deux paramètres a été utilisé. Ce modèle permet de mieux comprendre et prédire la variabilité des résistances à la compression du béton, en tenant compte de l'effet de l'âge observé lors des essais expérimentaux.

Mots - clés : Variabilité, Résistance, Compression, Weibull, Rupture

Abstract- The compressive strength of concrete remains a significant concern in the field of construction. The effect of the curing age of specimens influences the behavior and reliability of concrete structures, necessitating its consideration in the design calculations and the engineering of components made with this material. It is also essential to incorporate this parameter into the development of predictive models, which justifies the use of probabilistic statistical approaches based on the concept of an acceptable probability. An experimental study was conducted to investigate the effect of age on the variability of compressive strength measurements of concrete using local materials. Crushing tests were performed on 15 cm edge cubes at different ages (7 and 28 days). These tests allowed for the analysis of how the age of the samples affects the compressive strength results, taking into account the evolution of concrete properties over time. The results obtained showed significant variations in compressive strength for all ages studied. This variability underscores the importance of considering the effect of age in the design and engineering practices of concrete structures. To account for the dispersion of measured responses, a two-parameter Weibull statistical model was employed. This model facilitates a better understanding and prediction of the variability of concrete compressive strengths, considering the age effect observed during the experimental tests.

Keywords: Variability, Strength, Compression, Weibull, Failure.

1-Introduction

Le béton est un matériau de construction largement utilisé en raison de ses propriétés de durabilité et de résistance [1]. Cependant, le béton peut subir une perte importante de sa force, ce qui pose un défi important [2–3]. L'âge du béton peut également influencer sa résistance, d'où l'importance d'étudier la relation entre l'âge du béton et sa résistance résiduelle à la compression. Dans cette étude on va étudier l'effet de l'âge sur la résistance à la compression des éprouvettes cubiques à 7 jours et 28 jours, en tenant compte de la variation de cette résistance à la compression en utilisant un modèle statistique. De nombreuses études ont été faites sur le béton durci à des âges différents afin de comprendre comment l'âge affecte la résistance et l'élasticité du béton au fil du temps. Selon la norme ASTM C192 [4], l'âge des éprouvettes pour les tests de compression ne doit être inférieur à 28 jours. Cependant, pour assurer le développement de la résistance du béton, il est recommandé de tester les spécimens à l'âge de 28, 90 et 180 jours [5].

Dans la littérature plusieurs études ont montrés que la résistance à la compression du béton évolue lorsque l'âge du béton augmente [6-7], cela est dû aux à l'hydratation continue des grains de ciment avec de l'eau et la diminution de nombre de défauts au fil du temps [8-9]. En outre, la résistance du béton est influencée par l'âge du béton et le type et la nature de granulats utilisés.

2- Matériaux et méthodes

2.1- Matériaux

Un ciment de type CPJ 42,5 provenant de la cimenterie d'Ain El Kebira, a été utilisé pour la confection des bétons d'étude. Ce dernier répond à toutes les exigences de la norme Algérienne (NA 442).

Trois fractions granulaires ont été utilisées pour la fabrication des bétons d'études. Ces granulats proviennent de la carrière Adrar Oufarnou (Bejaia). Ces agrégats sont des produits concassés de nature calcaires. Il s'agit d'un

sable (0/3), d'un gravier (8/15) et d'un gravier (15/25).

Les caractéristiques physiques et mécaniques de ces granulats sont données dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés

Table 1: The physical and mechanical properties of the aggregates used.

Caractéristiques	S (0/3)	G (8/15)	G (15/25)
Densité absolue (g/cm ³)	2,45	2,62	2,55
Densité apparente (g/cm ³)	1,51	1,48	1,45
Module de finesse	2,63	-	-
LA (%)	-	30	30
Nature	Calcaire	Calcaire	Calcaire

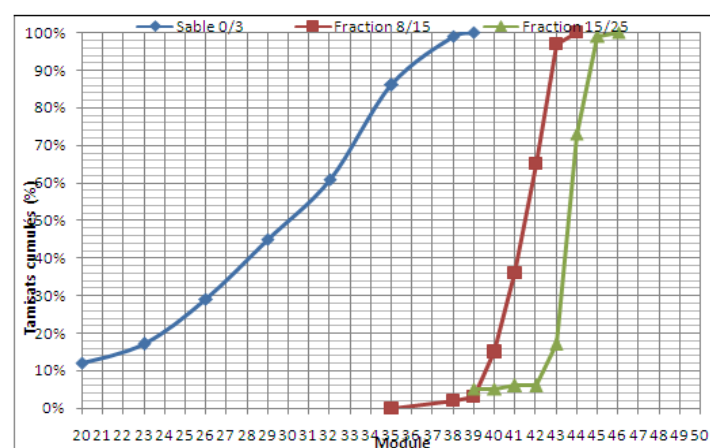
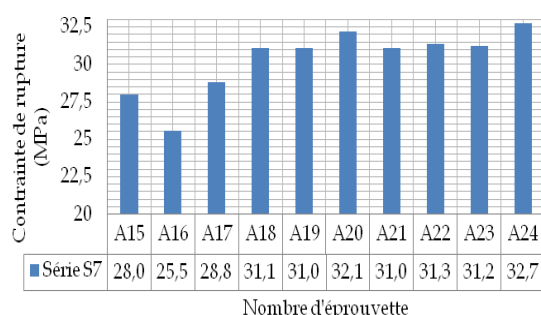
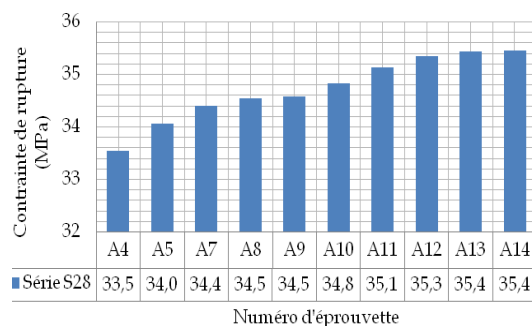


Tableau 2 : Composition du béton selon Dreux-Goriss**Table 2**: Concrete composition according to Dreux-Goriss

Constituants	Dosage des agrégats (%)	Dosage en (Kg/m ³)
Sable (0/3)	35	609
Gravier (8/15)	31	555
Gravier (15/25)	34	571
Ciment	-	350
Eau	-	175

Les bétons ont été préparés et conservés conformément aux spécifications de la norme EN 206-1. Ces derniers ont été coulés et mis dans les moules cubiques d'arête 15 cm par vibration (aiguille vibrante). Les moules cubiques ont été stockés après coulage dans une chambre humide pendant 24 heures à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 90 %. Après le démoulage les éprouvettes ont été conservées dans un bac rempli d'eau jusqu'à l'âge de l'essai.

Trois séries de 10 éprouvettes cubiques ont été confectionnées, soit au total 30 essais de compression afin d'évaluer la résistance à la compression par écrasement respectivement à 7 jours et 28 jours. Afin d'assurer une grande planéité des surfaces qui seront en contact avec les plateaux de la presse, les éprouvettes ont été préalablement surfacées pour engendrer le moins de frottement possible [10]. Les résultats de la résistance à la compression pour les différents âges sont illustrés sur les figures 2 et 3 ci-dessous.

**Figure 2** : Variation des résistances à la compression pour la série S7**Figure 2**: Variation of compressive strengths for series S7.**Figure 3** : Variation des résistances à la compression pour la série S28**Figure 3**: Variation of compressive strengths for series S28

Selon les figures 2 et 3, la résistance à la compression varie au fil du temps, en raison de l'hydratation continue des grains de ciment avec l'eau présente dans le béton, ainsi que de la réduction du nombre de défauts. Il est également observé que des écarts significatifs subsistent, notamment pour la série S7, où la différence atteint environ 7 MPa. En revanche, cette variabilité tend à diminuer avec l'âge, atteignant environ 2 MPa pour la série S28.

Les résultats expérimentaux relatifs à la résistance à la compression montrent une variabilité significative en fonction de l'âge du béton. Cette dispersion résulte de la diminution des défauts internes et du processus de durcissement progressif du matériau. Pour modéliser cette variabilité, il est approprié d'utiliser un modèle statistique de type Weibull à deux paramètres, qui permet de mieux appréhender les fluctuations observées dans les mesures.

3-Analyse de la dispersion avec le modèle de Weibull

Le béton est un matériau fragile, la distribution des défauts est la principale cause de la rupture. Le modèle de Weibull est employé dans cette étude afin de prendre en compte la dispersion des résultats de mesure. L'objectif de cette statistique de Weibull est de déterminer un critère de rupture plus représentatif des constatations expérimentales, car ce critère permet de prendre en compte l'hétérogénéité du béton qui est la source

principale de la dispersion des résultats de mesures [14].

Selon la statistique de Weibull, la probabilité de rupture est donnée par la formule (1) suivante :

$$P_r = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

Où :

σ est la contrainte de rupture, σ_0 est le facteur d'échelle sans signification physique et m le module de Weibull : il est caractéristique de la dispersion et donc de la forme de la courbe.

La formule (1) peut s'écrire sous la forme (2) suivante :

$$1 - P_r = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

Et encore :

$$-\ln(1 - P_r) = \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

On peut écrire encore la formule (3) sous la forme (4) suivante :

$$\ln[-\ln(1 - P_r)] = m \ln(\sigma) + m \ln(\sigma_0) \quad (4)$$

On applique la méthode de régression linéaire sur la formule (4) en posant :

$$X = \ln(\sigma_R) \quad \text{et} \quad Y = \ln[-\ln(1 - P_R)]$$

On obtient finalement la formule (5) suivante :

$$Y = mX + B \quad (5)$$

4 - Résultats et discussions

En traçant Y en fonction de X pour chaque série d'éprouvettes, on obtient des droites de régression illustrées sur les figures (4 et 5) qui décrivent au mieux la tendance du nuage observé et nous permettent d'identifier les paramètres de Weibull correspondants à chaque série d'éprouvettes cubiques.

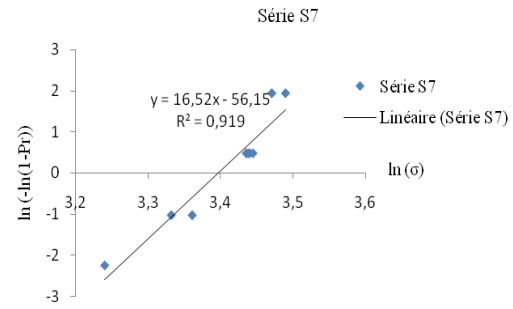


Figure 4 : Diagramme de Weibull pour la série S7

Figure 4: Weibull diagram for series S7

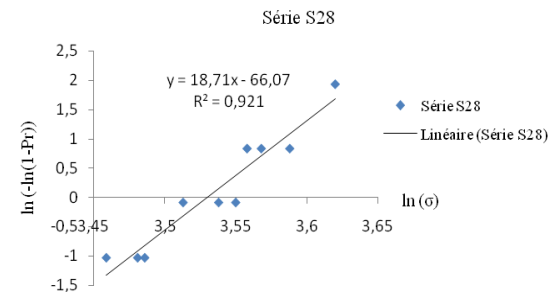


Figure 5 : Diagramme de Weibull pour la série S7

Figure 5: Weibull diagram for series S28

Les paramètres de Weibull pour chaque série sont donnés par le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3: Weibull parameters for each series
Table 3: Concrete composition according to Dreux-Goriss

Eprouvette	R²	B	m	$\sigma_0 = \exp(-B/m)$
S7	0,919	-56,15	16,52	29,931
S28	0,921	-66,07	18,71	34,167

Les résultats expérimentaux ont été comparés à ceux générés par le modèle de Weibull et cette analyse est illustrée dans les figures 6 et 7.

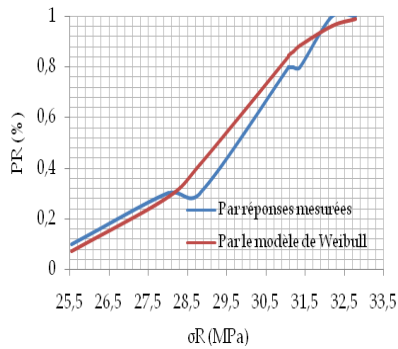


Figure 6 : Comparaison des résultats obtenus pour la série S7

Figure 6: Comparison of the results obtained for series S7.

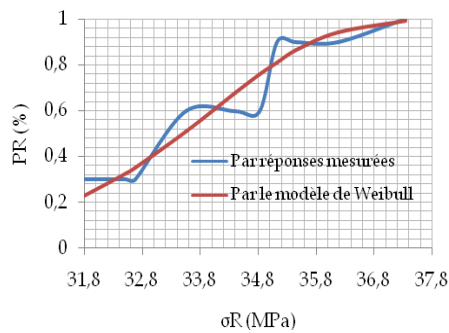


Figure 7 : Comparaison des résultats obtenus pour la série S28

Figure 7: Comparison of the results obtained for series S28

Les droites de régressions figures (4 et 5) obtenues permettront de décrire au mieux la tendance du nuage observé et permettront aussi d'identifier les paramètres de Weibull correspondant à chaque série d'éprouvettes.

La linéarisation des courbes, par la loi statistique de Weibull, montre une tendance linéaire et le module de Weibull (m) dans ce cas correspond à la pente de la droite de régression et varie en fonction de l'âge de l'éprouvette.

Pour l'ensemble des séries, le paramètre de Weibull (m) se situe dans la plage typique des bétons, allant de 5 à 50 [11]. Une valeur de (m) élevée indique une moindre dispersion des contraintes de rupture [12-13]. Dans le cas de la série S7, nous avons observé une valeur de (m) relativement faible, ce qui suggère une plus

grande dispersion des résistances à la compression à un jeune âge, notamment à 7 jours.

Le coefficient de détermination se rapproche de 1 pour l'ensemble des séries, cela veut dire que le nuage de point se rapproche de la droite de régression.

Le modèle de Weibull une bonne adéquation pour les deux séries représentées, puisqu'il représente plus de 92 % de la variation de Y en fonction de X.

Les résultats obtenus à partir du modèle de Weibull présentent une similarité marquée avec ceux issus des expériences (voir les figures 6 et 7), bien qu'un léger décalage soit observé. Cela indique que la formule dérivée du raisonnement appliqué est capable de modéliser la rupture des éprouvettes sous un chargement déterminé.

6 - Conclusion

Cette approche statistique probabiliste permet de fournir des prévisions plus fiables sur la résistance à la compression des bétons.

Elle contribue également à l'amélioration de la conception et de la durabilité des structures en béton, en permettant de mieux anticiper les variations potentielles dues à l'effet de l'âge.

Cette recherche met en lumière l'importance de l'intégration de modèles probabilistes dans l'ingénierie des matériaux et la construction afin de garantir des ouvrages plus sûrs et plus performants.

Références bibliographiques

- [1] A.M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed. , Trans-Atlantic Publications, Inc., 2012.
- [2] R. Nemes, M.A. Abed, A.M. Seyam, É. Lublóy, *Behavior of structural lightweight concrete produced with expanded clay aggregate and after exposure to high temperatures*, J. Therm. Anal. Calorim. 147 (2022) 8111–8118, <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11167-6>.
- [3] V. Hlavic̃ ka, L.E. Hlavicka-Laczák, É. Lublóy, *Residual fracture mechanical properties of quartz and expanded clay aggregate concrete subjected to elevated temperature*, Constr. Build. Mater. 328 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126845F>.
- [4] ASTM international. C192/C192M-02: *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. 2002.
- [5] A.P. Felipe, R.S. Andrade, *Influence of the curing temperature on the compressive strength of concrete*, Cem. Concr. Res. 33 (2003) 1589–1594.
- [6] J. Li, W. Yang, Y. Liu, *Effects of high temperatures on compressive strength and microstructure of concrete*, Constr. Build. Mater. 101 (2015) 9–17.
- [7] S. Fehérvári, *The effect of elevated temperature on ordinary Portland cements*, Periodica Polytech. Civil Eng. (2022), <https://doi.org/10.3311/PPci.20519>.
- [8] A.H. Hameed, *The effect of curing condition compressive strength in high strength concrete*, Diyala J. Eng. Sci. 02 (2009) 35–48
- [9] M.O. Younis, M. Amin, A.M. Tahwia, *Durability and mechanical characteristics of sustainable self-curing concrete utilizing crushed ceramic and brick wastes. Case Studies*, Constr. Mater. 17 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01251>.
- [10] X. Jourdain, H. Hélène, M. François, *Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature*, Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur, Disponible sur <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>, 2018
- [11] K. Miled, *Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé*, Thèse, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2005
- [12] S. Déborah, *Étude du comportement mécanique à rupture des alumines de forte porosité : Application aux supports de catalyseurs d'hydrotraitement des résidus*, Thèse, INSA de Lyon, 2014
- [13] N. Zanache et al., *Étude statistique et caractérisation mécanique des bétons polymères sollicités en flexion*, in : 22e Congrès Français de Mécanique, 24 au 28 août 2015, 2015, Lyon.
- [14] Abdelhafid Boukellouda, Toufik Kheffache, Nasser Chelouah, *Étude statistique de la variation de résistances à la compression du béton*, Matériaux & Techniques 108, 406 (2020), <https://doi.org/10.1051/mattech/2021011>