

Sur l'évaluation de la résistance réelle du béton de structure : Corrélation entre la méthode destructive et non-destructive (ultrasons)

A. Benidir ^{1(*)}, S. Debbakh ¹, S. Chaïbeddra ¹

¹ National Center of Integrated Studies and Research on Building Engineering (CNERIB), El Mokrani New city, 16097, Souidania, Algiers, Algeria

(*) abenidir.cnerib@gmail.com

RESUME Cet article étudie l'influence des diamètres des carottes sur l'évaluation de la résistance à la compression réelle du béton. L'expérience consiste en la préparation de trois poteaux en béton armé et l'extraction de carottes pour effectuer des essais destructif et non destructif. Trois différents diamètres de carottes, 64, 79 et 103 mm, sont sélectionnés et l'extraction des carottes est effectuée sur trois différentes zones. Le même volume de béton est extrait de chaque zone. Le test non destructif traite la propagation des ondes élastiques et compressives en dérivant les vitesses de propagation des ultrasons. Les résultats montrent que l'évaluation de la résistance à la compression du béton dépend fortement des diamètres des carottes. De plus, la dérivation de la résistance à la compression réelle du béton en se référant aux résistances à la compression des carottes de diamètre de 64 mm montre une augmentation inattendue de la résistance caractéristique représentative. Par ailleurs, la corrélation entre l'évaluation de la résistance à la compression du béton basée sur les essais destructif et non destructif est également présentée.

Mots-clefs béton durci, résistance à la compression, méthode destructive, vitesse de propagation des ultrasons, diamètre de carotte.

I. INTRODUCTION

L'utilisation accrue du béton dans le domaine du génie civil a été fortement consolidée par ses qualités appréciées telles que la capacité de charge, la durabilité et le coût. Ce matériau hétérogène constitue une solution efficace pour résister à la fois aux chargements quasi-statiques et dynamiques [Kumpyak et al., 2016]. Cependant, avec la volonté d'accroître la résilience des villes, le contrôle de la dégradation des structures en béton armé a suscité beaucoup d'intérêt. Ainsi, la maintenance des structures en béton a cessé d'être consignée comme étant sans frais [Swamy, 2008]. À travers les diverses indications sur la dégradation, la résistance requise, et sur la performance sismique de ces structures, l'évaluation de la résistance à la compression d'un béton en place est principalement préconisée [De Stefano et al., 2013a]. Deux principales techniques sont utilisées pour évaluer la résistance à la compression du béton in situ. Ces techniques reposent sur des méthodes destructives et non-destructives. La méthode destructive la plus courante pour évaluer

la résistance à la compression du béton est l'écrasement après le prélèvement et la mise en forme de carottes [Bartlett, 1994]. L'un des avantages de cette méthode est l'accès direct à des éprouvettes représentatives du béton. De plus, l'écrasement des carottes avec une machine d'essai universelle (UTM) fournit des indications rapides sur les résistances à la compression quasi-statique du béton. Cependant, parmi les inconvénients de cette méthode chronophage est que cette méthode porte atteinte à l'intégrité des structures. Les essais non destructifs représentent des méthodes et des techniques qui ne compromettent en aucun cas la sécurité structurelle et l'intégrité de la structure. A cette fin, des transducteurs et/ou des capteurs sont généralement utilisés pour collecter des informations sur le béton. Par la suite, des modèles de conversion sont développés pour estimer la résistance à la compression du béton. Par exemple, une estimation de la résistance à la compression du béton en utilisant les vitesses de propagation des ultrasons (VPU) a été développée et adoptée [Breyse et al., 2019]. Parmi les méthodes présentées pour l'évaluation de la résistance à la compression du béton durci in situ, la méthode destructive est jugée la plus fiable [Yan et al., 2020]. Cependant, l'application d'une conversion directe entre les résistances à la compression des carottes et des éprouvettes de dimensions standard en béton doit reposer sur un diamètre de carotte supérieur ou égal à 100 mm et un élancement de 1 ou 2 [EN 13791, 2019]. En pratique, il est parfois très difficile de prélever des carottes d'un diamètre de 100 mm et d'un élancement de 2. Dans ce cas, le recours à des éprouvettes d'un diamètre inférieur à 100 mm est indispensable. Plusieurs normes autorisent l'extraction de carottes avec un diamètre inférieur à 100 mm mais aucune recommandation n'est donnée sur le choix de ce diamètre. Cependant, l'exploitation des résultats d'écrasement de ces carottes fait appel à l'introduction de facteurs de correction pour dériver la résistance à la compression réelle du béton [Khoury et al., 2014]. D'autres paramètres tels que la taille des agrégats, le stockage des carottes, le nombre de carottes et les emplacements du carottage contribuent à affiner davantage l'évaluation de la résistance du béton de la structure existante [Bartlett and MacGregor, 1999]. En plus de ces paramètres, la préparation manuelle du béton et l'opération de coulage (compactage du béton, etc.) pourraient encore compliquer l'estimation fiable de la résistance réelle du béton. En effet, dans de nombreux pays, l'urgence de reloger des personnes ou la volonté incontrôlée de la population d'accéder à des logements fait prospérer l'apparition de constructions illégales construites sans se référer aux recommandations nationales de la construction. Par conséquent, le coulage d'éléments verticaux par des méthodes inadéquates augmenterait le risque de construire un élément structurel avec des résistances de béton dispersées [De Stefano et al., 2013b]. Dans ce papier, une mise en œuvre d'un béton par un malaxage manuel a été réalisé afin d'estimer sa résistance réelle. Des poteaux ont été confectionnés et des mesures non-destructives par ultrasons et par carottage et écrasement sont exécutés. Les résultats des mesures sont discutés et interprétés. Il est aussi question dans ce papier de proposer une procédure pour identifier l'apparition d'un effet d'échelle qui peut être à l'origine d'un sur-classement en cas d'estimation de la résistance réelle du béton.

II. MATERIAUX ET METHODES

Un béton ordinaire de classe C25/30 et de consistance standard a été préparé pour l'expérience (malaxage manuel). Les éléments constituant le mélange de béton ainsi que la résistance à la

compression après 28 jours de cure en laboratoire selon les normes EN 12390-2 et EN 12390-3, sont listés dans le tableau 1. La résistance à la compression moyenne des éprouvettes cylindriques (150mm×300mm) moulées et conservées en laboratoire (100%HR) est de 25,37 MPa. Le béton frais a été utilisé pour remplir trois poteaux armés (échelle réelle, référencés C1, C2 et C3) en procédant au remplissage à la main. Cette méthode est encore largement utilisée dans la majorité des régions du pays (Algérie). Les poteaux ont une section de 40×40 cm² et une hauteur de 300 cm (hauteur maximale). Le diamètre des barres de renforcement longitudinal est de 12 mm et la distance entre les extrémités de chaque barre est de 15 cm. Des cadres en acier d'un diamètre de 8 mm constituent le renforcement transversal. Chaque cadre a été placé tous les 15 cm. Trois zones étiquetées 1, 2 et 3 sont délimitées pour réaliser à la fois des essais non destructifs et destructifs sur le béton (figure 1). Pour contrôler les qualités du béton sur site et évaluer l'influence des conditions de cure, quatre (04) éprouvettes cylindriques de dimension standard (150 mm×300 mm) sont préparées pour chaque poteau coulé. Après démoulage, les éprouvettes sont laissées à l'extérieur et placées à proximité des poteaux pour être exposées aux mêmes conditions de cure. Ces spécimens sont appelés spécimens durcis sur le terrain (FCS pour Field Cured Specimen en anglais).

TABLEAU 1. Proportions de mélange du béton ordinaire (C25/30) et sa résistance à la compression en laboratoire

Constituants	Proportions
Ciment (kg/m ³)	350
Sable naturel de rivières (kg/m ³)	464
Sable naturel de dunes (kg/m ³)	271
Agrégats (kg/m ³)	1058
Eau (kg/m ³)	210
Taille maximale des granulats (mm)	20
Classe de consistance	S ₂ (affaissement entre 50 à 90 mm)
Résistance à la compression moyenne d'éprouvettes cylindriques (D=150mm, L=300mm) (MPa)	25,37
Ecart-type (résistance à la compression) (MPa)	0,91

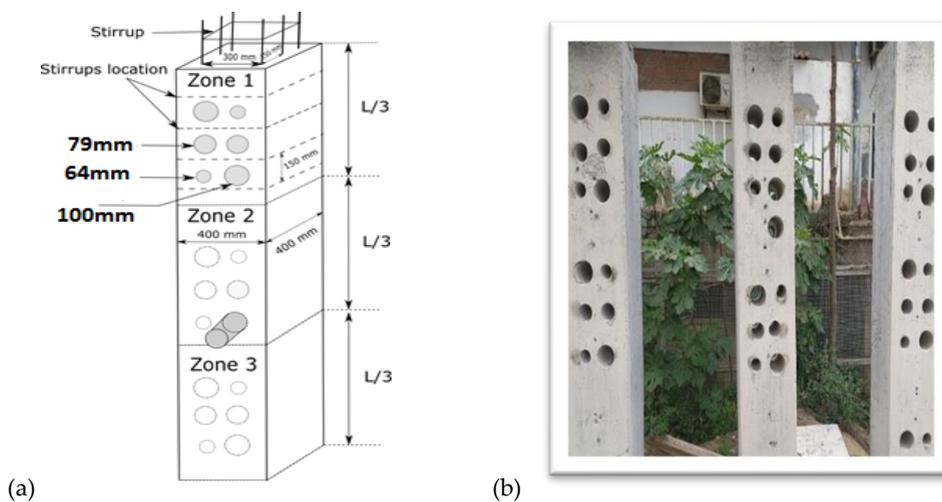


FIGURE 1. (a) Plan d'opération de carottage et délimitation des zones, (b) Poteaux après carottage

A. Essai non destructif

La mesure de la vitesse de propagation des ultrasons (VPU) a été utilisée pour accomplir des tests non destructifs selon une procédure normalisée [EN 12504-4 (2021)]. Les essais sont effectués à l'intérieur des trois zones délimitées ainsi que sur des éprouvettes de dimensions standards à l'aide d'un appareil de laboratoire (Pundit lab/Proceq). Les points de mesure sur les poteaux ont été présélectionnés pour être ultérieurement utilisés pour extraire les carottes. La fréquence nominale des transducteurs est de 54 kHz. Des transmissions directes sont effectuées et les vitesses de propagation sont automatiquement dérivées. Les résultats présentés dans cet article concernent les données après 28 jours de cure.

B. Essai destructif

Les essais d'écrasement ont été réalisés avec une Machine d'Essais Universelle (UTM) d'une capacité de 2000 kN. Le taux de chargement appliqué en compression est de 0,6 MPa/min, conformément aux recommandations de la norme [EN 12390-3]. Les carottes extraites sont taillées de part et d'autre de 5 cm afin d'étudier le volume du béton non exposé. Avant de procéder au test destructif, la vitesse de propagation des ultrasons est mesurée.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Influence du diamètre des carottes

La figure (2) montre l'évolution des résistances à la compression des carottes d'un élancement de 2 en fonction des diamètres des carottes, et ce, pour les trois poteaux. Les résistances à la compression des éprouvettes conservées à l'extérieur avec des dimensions standard (150 mm de diamètre, 300 mm de longueur) sont également représentées dans cette figure. À première vue, pour les éprouvettes standard (150mm×300mm), les résultats montrent des différences importantes entre la résistance moyenne à la compression des éprouvettes conservées en laboratoire (données dans le tableau 1) et celle des éprouvettes conservées à proximité des poteaux (FCS). Les résistances à la compression moyennes des FCS se référant aux poteaux 1, 2 et 3 sont respectivement de 17,69 MPa, 18,49 MPa et 18,41 MPa. Ainsi, une différence de résistance à la compression allant jusqu'à 7,68 MPa a été observée.

A partir de la même figure et indépendamment du diamètre de la carotte, on observe un écart important sur les résistances à la compression. Un écart marqué a été identifié pour un diamètre de 64 mm. Pour ce diamètre, les résistances à la compression des carottes varient de 12,85 MPa à 27,91 MPa. Pour les éprouvettes de diamètres 79 mm et 103 mm, les résistances à la compression vont de 8,33 MPa à 19,12 MPa et de 16,11 MPa à 25,67 MPa, respectivement. Selon les normes EN 13791-2019 et EN 13791-2007, les résistances à la compression des carottes aux diamètres compris entre 100 mm et 150 mm et ayant un élancement de 2 sont équivalentes aux résistances à la compression des éprouvettes de diamètre 150 mm et de longueur 300 mm. En analysant les résultats d'écrasement de carottes d'un diamètre de 103 mm, on peut considérer que la méthode de conversion directe pour l'évaluation de la résistance du béton sans l'introduction de facteurs de correction de résistance est fiable.

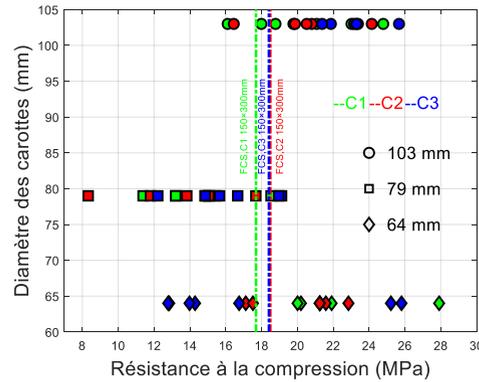


FIGURE 2. Résistances à la compression des carottes en fonction du diamètre de la carotte

En pratique, pour estimer la classe de résistance d'un béton coulé in situ, il convient de comparer la résistance caractéristique dérivée des carottes ($f_{ck,carotte}$) à celle in situ, telle que référencée dans quelques normes (EN 13791-2019, NA 17004, EN 13791-2007). Comme le nombre de carottes pour un diamètre est de six pour chaque poteau, les résistances caractéristiques estimées des carottes ($f_{ck,carotte}$), sont calculées selon l'approche B citée dans les normes NA 17004 et EN 13791-2007. Ainsi, $f_{ck,carotte}$ est donnée par :

$$f_{ck,carotte} = \text{minimum} \begin{cases} f_{m(n),carotte} - k_n \\ f_{faible,carotte} + 4 \end{cases} \quad (1)$$

où, $f_{m(n),carotte}$ est la résistance moyenne des carottes, n est le nombre d'échantillons, k_n est un coefficient dépendant de n ($k_{(n=6)}=7$) et $f_{faible,carotte}$ est la valeur de résistance à la compression la plus basse des carottes. Il est important de mentionner que les tests de Grubbs ont été appliqués pour détecter les valeurs aberrantes. Les résultats des calculs associés aux diamètres 103 mm, 79 mm et 64 mm des résistances caractéristiques à la compression des carottes sont donnés dans le tableau (2).

TABLEAU 2. Résistance caractéristique estimée, $f_{ck,carotte}$ (D), pour chaque poteau, diamètre de 103 mm, 79 mm et 64 mm pour un Elancement égal à 2 ainsi que les valeurs moyennes (f_m) et les écart-types (σ)

Paramètres (SR = 2)	Poteau 1 (C1)	Poteau 2 (C2)	Poteau 3 (C3)
$f_{ck,carotte}$ (D=103mm) (MPa) [f_m, σ]	13,29 [20,29; 3,27]	13,26 [20,26; 2,46]	16,13 [23,13; 1,50]
$f_{ck,carotte}$ (D=79mm) (MPa)	7,47 [14,47; 2,47]	6,59 [13,59; 3,21]	9,25 [16,25; 2,62]
$f_{ck,carotte}$ (D=64mm) (MPa)	13,69 [20,69; 4,82]	13,27 [20,27; 2,36]	11,14 [18,14; 5,86]

D'après le tableau (2), les résistances caractéristiques dérivées des carottes de diamètre 103 mm extraites des trois poteaux 1, 2 et 3 sont respectivement de 13,29 MPa, 13,26 MPa et 16,13 MPa. La différence entre la limite d'un classement valide d'une classe de béton C25/30 et les résultats des résistances caractéristiques estimées atteint 7,74 MPa. En effet, pour avoir une classe de béton de C25/30, la résistance caractéristique doit être supérieure ou égale à 21 MPa (NA 17004). Par conséquent, un déclassement de la qualité du béton doit être appliqué sur chaque poteau. En d'autres termes, et selon les dispositions des normes EN 13791-2019, NA 17004 et EN 13791-2007,

les bétons associés aux poteaux 1, 2 et 3 doivent être classés comme étant des bétons de classes C12/15, C12/15 et C16/20 respectivement. Ainsi, malgré une formulation valide du béton en laboratoire (classe visée C25/30), l'expérience illustre l'influence de paramètres tels que, les conditions de cure, le carottage ainsi que le mode de coulage et de préparation sur l'abaissement des résistances caractéristiques des carottes de béton en place. L'analyse des résistances caractéristiques à la compression des carottes de diamètre $D = 79$ mm et $D = 64$ mm, montre que les carottes de diamètre $D = 64$ mm fournissent plus de résistance comparant aux carottes de diamètre $D = 79$ mm, et ce, pour les trois poteaux. Il est intéressant de noter que l'évolution de la résistance caractéristique à la compression des carottes lorsque le diamètre diminue pourrait être considérée comme une indication rigoureuse sur l'apparition d'un effet d'échelle. L'effet d'échelle fait référence à l'apparition de résistances imprévisibles lorsqu'une variation de l'échelle des carottes est appliquée. Par exemple, l'occurrence de cet effet pourrait être détectée lorsque l'évolution des résistances à la compression des carottes n'est pas monotone pendant que le diamètre de la carotte est progressivement réduit pour un élancement constant [Benidir et al. (2018)]. Cette augmentation significative de la résistance caractéristique du béton pour des carottes de diamètre de 64 mm, ne peut pas être justifié par une dispersion des résultats. En effet, sur le poteau C2, la moyenne et l'écart-type sont du même ordre que les résultats obtenus pour des carottes de 103 mm. Après écrasement, il est très difficile d'identifier l'apparition d'un effet d'échelle. Le recours aux essais non-destructifs peut présenter une solution pour mieux anticiper un éventuel sur-classement de la résistance du béton.

B. Vitesses de propagation des ultrasons (VPU)

Pour analyser la différence entre les mesures des VPU effectuées sur les poteaux et sur les carottes, la figure (3a) montre à la fois les mesures effectuées sur les poteaux et sur les carottes avec un diamètre de 103 mm et un rapport d'élancement de 2. Il a été observé que les VPU sur les poteaux avant le carottage sont nettement inférieures à celles sur les carottes. Ce résultat est en accord avec la norme européenne [NF EN 12504-4]. Pour compléter l'analyse, la figure (3b) représente les résistances moyennes à la compression des carottes en fonction de la VPU moyenne à travers les différents emplacements avant carottage et sur les carottes. La représentation graphique des points de la figure (3a) peut être réduite à seulement six clusters (moyennes) sur la figure (8b). Cette dernière figure montre clairement que les clusters VPU sur les poteaux sont concentrés dans une plage à bandes étroites. Pratiquement, cela indique que les propriétés élastiques du béton le long des poteaux sont assez constantes et qu'aucune variation significative de l'impédance acoustique n'a pu être détectée à l'aide d'un appareil de mesure ultrason utilisant des transducteurs de type P à une fréquence de 54 kHz. Cependant, après l'extraction des carottes, les clusters VPU sont confinés dans une plage en bande large. Cela peut indiquer que cette dispersion est liée à l'opération de carottage et aux différents choix appliqués à savoir, l'emplacement, la profondeur, le diamètre et la longueur des carottes, etc. De plus, les clusters issus des mesures VPU sur les carottes de diamètre 64 mm sont plus élevés que ceux correspondant aux autres diamètres. Cette observation est une indication claire sur la fiabilité de l'essai non destructif par des ultrasons sur poteaux et sur carottes pour prédire l'apparition d'un effet d'échelle.

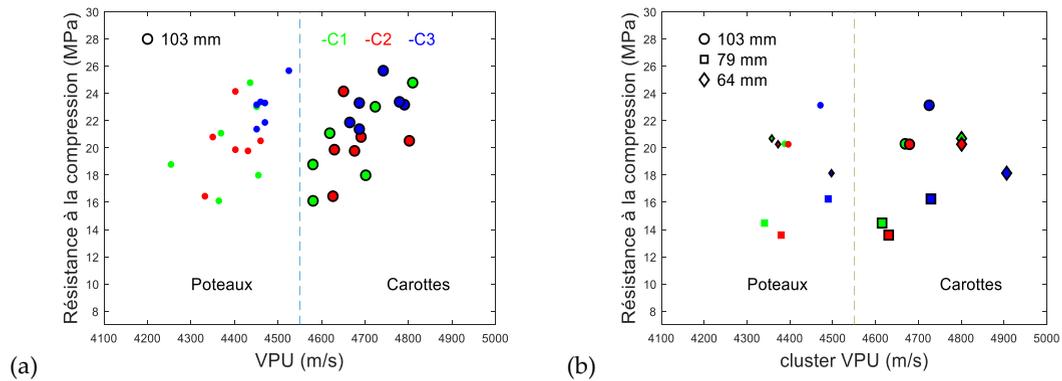


FIGURE 3. Résistance moyenne de carottes en fonction des mesures de la VPU (a) sur les marqueurs sur les poteaux et les carottes avec $D = 103$ mm (b) Clusters de VPU pour les trois diamètres

CONCLUSION

Cet article met en exergue l'influence du diamètre de la carotte sur l'évaluation de la résistance à la compression réelle du béton durci par les méthodes destructive et non-destructive. Les résultats sont discutés et les principales conclusions sont les suivantes :

- Un déclassement sévère de la classe du béton selon la procédure décrite dans l'approche B des normes [NA 17004] et [NF EN 13791, 2007] a été observé. Ce déclassement est enregistré pour un béton mis en place sur des poteaux avec une mise en œuvre traditionnelle.
- L'apparition d'un effet d'échelle avec une carotte de diamètre 64 mm a été détectée. Cette observation a été faite en respectant le rapport entre le diamètre de la carotte et la taille maximale des granulats supérieur à 3.
- L'utilisation d'une double mesure de la VPU avec une fréquence nominale de transducteur de 54 kHz sur les poteaux et les carottes est une méthode fiable pour confirmer la présence d'un effet d'échelle.

REFERENCES

- Kumpyak, O. G., Galyautdinov, Z. R., Kokorin, D. N. (2017). Strength of concrete structures under dynamic loading. vol. 070006, no. 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4937876>
- Swamy, R. N. (2008). Sustainable Concrete for the 21st Century Concept of Strength through Durability RNarayan Swamy University of Sheffield, England," Japan Soc. Civ. Eng. Concr. Comm. Newsl. [Online]. Available: <http://eprints.whiterose.ac.uk/4617/>
- De Stefano M., M. Tanganelli, and Viti S. (2013a). On the variability of concrete strength as a source of irregularity in elevation for existing RC buildings: A case study. Bull. Earthq. Eng., vol. 11, no. 5, pp. 1711–1726. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9463-2>
- Bartlett, F. M., MacGregor, J. G. (1994). Effect of core diameter on concrete core strengths. ACI Materials Journal. 91(4), pp 339-348. <https://doi.org/10.14359/4160>

D. Breyse et al. (2019). Recommendation of RILEM TC249-ISC on nondestructive in situ strength assessment of concrete. *Mater. Struct. Constr.*, vol. 52, no. 4, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1369-2>

Yan, J., Liu, K., Zou, C., Mo, Y., Ou, J. (2020). Comparison of evaluation tests for compressive strength of structural concrete. *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 64, no. 2, pp. 387–395. <https://doi.org/10.3311/PPci.12545>

NF EN 13791 Standard. (2019). Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. August, 2019.

Bartlett, F. M., MacGregor, J. G. (1999). Variation of In-Place Concrete Strength in Structures. *ACI Materials Journal*. vol. 96, Issue 2, pp 261-270. <https://doi.org/10.14359/454>

Khoury, S., Aliabdo, A. A. H., Ghazy, A. (2014). Reliability of core test - Critical assessment and proposed new approach. *Alexandria Eng. J.*, vol. 53, no. 1, pp. 169–184. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.005>

De Stefano, M., Tanganelli, M., Viti, S. (2013b). Effect of the variability in plan of concrete mechanical properties on the seismic response of existing RC framed structure. *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 1049–1060. <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9412-5>

NF EN 12390-2 Standard. (2019). Testing hardened concrete-Part 2: making and curing specimens for strength tests,” June, 2019.

NF EN 12390-3. (2019). Testing hardened concrete - Part 3: compressive strength for test specimens. June, 2019.

NF EN 12504-4 Standard. (2021). Testing concrete in structures- Part 4: Determination of ultrasonic velocity” July, 2021.

NA 17004, norme algérienne. (2008). Evaluation de la résistance à la compression sur site des structures et les éléments préfabriqués en béton.

NF EN 13791 Standard. (2007). Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. September, 2007.

Benidir, A., Mahdad, M. H., Brara, A. (2018). Aggregate size and lateral dimension effects on core compressive strength of concrete. *Proc. IRF2018 6th Int. Conf. Integrity-Reliability-Failure*, no. July, pp. 479–486.