

Stratégies d'échantillonnage pour l'évaluation non destructive de la résistance du béton

Bouchra Kouddane^{1,2}, Zoubir Mehdi Sbartaï¹, Sidi Mohammed Elachachi¹, Nouzha Lamdouar²

¹ I2M, Université de Bordeaux ; Talence, France

² EMI, Université Mohammed V ; Rabat, Maroc

RESUME Les ingénieurs sont confrontés à un défi majeur lorsqu'ils évaluent la résistance in-situ des structures en béton : la fiabilité de la valeur estimée. De ce fait, cette étude se concentre sur un élément important du programme d'investigation : la sélection des emplacements principaux pour l'extraction des carottes. Différents plans d'échantillonnage ont été étudiés, à savoir le carottage conditionnel (RILEM), l'échantillonnage par similarité, l'échantillonnage proportionnel stratifié et l'échantillonnage par optimisation de la variance.

Des courbes de risque ont été générées pour évaluer la qualité de l'estimation de chaque plan d'échantillonnage. L'objectif de notre étude est d'analyser cette problématique dans le cadre d'un vaste programme d'investigation, en appliquant des techniques non destructives (rebond et ultrasons) et carottage sur des composants structurels d'un bâtiment existant. L'évaluation des deux quantités estimées (résistance moyenne, variabilité de la résistance) a été effectuée en utilisant deux approches d'identification de modèle : bi-objectif pour une technique de CND unique et multi-objectif pour la combinaison de deux techniques de CND.

Une analyse statistique complète des données a permis d'estimer l'intérêt potentiel des différents plans d'échantillonnage par rapport au carottage aléatoire. Il est également nécessaire d'évaluer et de comparer les différentes stratégies d'échantillonnage afin de déterminer la plus efficace. Le but de cette étude est de fournir des recommandations aux ingénieurs, afin de créer un programme d'investigation optimal pour l'évaluation de la résistance du béton.

Mots-clefs fiabilité, contrôle non destructif CND, carottage conditionnel, échantillonnage par similarité, échantillonnage stratifié proportionnel, échantillonnage par optimisation de la variance.

I. INTRODUCTION

Le contrôle non destructif CND permet une inspection plus étendue de la structure et offre un accès à de nouvelles informations, telles que la résistance moyenne, la variabilité spatiale des propriétés du béton et l'identification des zones homogènes. Plusieurs facteurs influencent l'efficacité du programme d'investigation (Alwash, 2017). En cas de forte variabilité du béton, l'évaluation correcte de la résistance moyenne et de la variabilité du béton est un défi, surtout avec des ressources limitées. La qualité des mesures in-situ pose un autre problème majeur en termes de répétabilité et d'erreurs (Saleh et al., 2022). En outre, l'emplacement des prélèvements peut avoir un

impact sur la précision de l'estimation de la résistance. Ces résultats démontrent la nécessité d'une approche d'investigation plus sophistiquée prenant en compte ces considérations.

Les méthodes courantes de sélection des emplacements des prélèvements ne tiennent pas compte les emplacements des tests non destructifs (Ali-Benyahia et al., 2019; Breysse et al., 2019). Le carottage aléatoire, notamment lorsque le nombre est limité, présente le risque que la majorité des carottes soient prélevées dans des endroits où la résistance est supérieure (ou inférieure) à la moyenne, ce qui peut entraîner des biais significatifs dans l'évaluation. Toutefois, diverses études suggèrent que l'emplacement des prélèvements peut avoir un impact sur la précision de la résistance du béton in-situ. Selon une étude menée par (Breysse et al., 2020), le carottage conditionnel peut économiser jusqu'à 3 carottes par rapport au carottage aléatoire. De plus, (Alwash et al., 2015) ont effectué une analyse comparative de diverses procédures d'investigation pour l'évaluation du béton et ont constaté que la stratégie de carottage conditionnel était la plus fiable pour estimer la résistance moyenne du béton.

Le carottage conditionnel est basé sur une règle d'échantillonnage systématique, où les mesures des techniques non destructives sont divisées en sous-ensembles. Ensuite, les emplacements des carottes sont choisis aux emplacements de tests CND ayant une valeur de mesure similaire à la médiane de chaque sous-ensemble (Breysse et al., 2018, 2020; Sbartai et al., 2021). Cependant, cette stratégie d'échantillonnage pour la sélection conditionnelle des carottes n'est pas la seule réalisable. Cette étude vise à approfondir cette question et à offrir différentes stratégies d'échantillonnage pour prélever les carottes. Le défi n'est plus d'estimer la résistance réelle du béton, mais de limiter le risque d'une estimation incorrecte dans une plage acceptable. Pour y parvenir, des courbes de risque sont utilisées pour estimer la précision de l'évaluation pour chaque stratégie d'échantillonnage. L'évaluation de chaque plan d'échantillonnage est réalisée par une analyse statistique de données réelles.

Afin d'évaluer la qualité de l'estimation de la résistance moyenne du béton et de sa variabilité, chaque méthode d'échantillonnage a été testée sur un jeu de données expérimentales. Le jeu de données réel a été obtenu grâce à des partenariats de recherche avec d'autres scientifiques (Ali Benyahia et al., 2017) et résulte d'une enquête approfondie menée sur une structure existante avant sa démolition. Des mesures du CND, incluant le marteau rebond et la vitesse d'impulsion, ont été réalisées sur 100 points de test répartis sur les poutres et les colonnes, et des carottes de 75 mm de diamètre ont été prélevées. Des études antérieures ont montré que l'approche bi-objectif est plus précise pour estimer la variabilité du béton (Alwash et al., 2016; Alwash, 2017; Sbartai et al., 2021). De ce fait, cette méthode a été utilisée dans cette étude pour le cas de l'utilisation d'une seule méthode non destructive.

Cet article est structuré de la manière suivante : dans la section suivante, les méthodes utilisées dans la littérature sont résumées, et des règles alternatives d'échantillonnage des emplacements principaux sont présentées. La troisième section applique ces méthodes en utilisant un ensemble de données réelles. Finalement, les conclusions sont présentées dans la dernière section.

II. PLANS D'ECHANTILLONNAGE DES EMPLACEMENTS PRINCIPAUX

A. Carottage conditionnel (RILEM)

Le carottage conditionnel consiste à choisir les emplacements des prélèvements en fonction des informations fournies par les mesures du CND (Breyse et al., 2020). Afin d'assurer une couverture optimale de la plage de résistance souhaitée, il est nécessaire de classer le jeu de données des mesures du rebond ou/et ultrasons (RH ou/et UPV), allant des plus basses aux plus élevées. Une fois trié par ordre croissant, le jeu de données RH ou/et UPV est divisé en plusieurs sous-groupes de tailles égales. Cette division vise à répartir les mesures sur toute l'étendue de la plage de résistance de manière équilibrée. Ensuite, une carotte est choisie au hasard dans chaque sous-groupe. Outre la sélection aléatoire, il est mentionné que d'autres méthodes de sélection, telles que l'utilisation de la médiane, peuvent également être employées. (Ali-Benyahia et al., 2017).

B. Échantillonnage stratifié proportionnel

Lorsque l'on utilise des méthodes de Monte Carlo pour estimer des quantités statistiques à partir d'un échantillon aléatoire, il peut y avoir une variance élevée dans les estimations obtenues. Afin de réduire la variance des estimations obtenues par échantillonnage aléatoire, une technique courante de réduction de variance consiste à estimer les attentes à partir d'une population obtenue par stratification. En divisant une population hétérogène en sous-populations homogènes, la stratification peut améliorer la précision estimée sur l'ensemble de la population (Wang et al., 2012). Dans cette approche, le jeu de données est divisé en sous-groupes homogènes basés sur des caractéristiques communes des éléments, telles que la classification des lectures du CND : élevée, moyenne ou faible. À partir de chaque sous-groupe, des emplacements principaux sont sélectionnés de manière aléatoire. La taille de chaque sous-groupe est inversement corrélée avec sa taille proportionnelle dans la population. Pour fournir une illustration plus détaillée, prenons en compte une population de mesures non destructives composée de $NT = 100$ résultats de tests, qui est divisée en $L = 3$ sous-groupes, avec $NT_i = 31, 32, 37$ résultats de tests respectivement dans chaque sous-groupe. Une fois que les strates ont été déterminées, un échantillon aléatoire est prélevé dans chaque sous-groupe. La taille de l'échantillon à prélever dans chaque sous-groupe n_i est proportionnelle à la taille de la strate NT_i et au nombre total d'échantillons NC ($n_i = (NT_i / NT) \times NC$).

C. Échantillonnage par similarité

La méthode d'échantillonnage exposée ici consiste à sélectionner les emplacements des prélèvements de manière à ce que la distribution des mesures non destructives associées aux emplacements des carottes soit statistiquement similaire à la distribution de l'ensemble des mesures non destructives (Saleh et al., 2022). En d'autres termes, l'objectif est de sélectionner stratégiquement les emplacements des carottes de manière à représenter fidèlement la variabilité des mesures non destructives dans l'ensemble de la population étudiée. Des études antérieures ont passé en revue et comparé différentes mesures de similarité dans diverses applications (Boriah et al., 2008; Irani et al., 2016; Weller-Fahy et al., 2015). Nous avons choisi la mesure de Kolmogorov-Smirnov (KS) pour notre étude, dans le but de mesurer la distance entre deux distributions de probabilité. Les fonctions de distribution cumulative offrent une représentation plus claire des deux distributions. L'idée derrière le test KS est simple : la fonction de distribution cumulative empirique des mesures non destructives associées aux emplacements des carottes doit être assez similaire à la distribution de

l'ensemble complet des mesures du CND. La distance KS, qui est la plus grande différence absolue entre les distributions de fréquence cumulative, est utilisée pour évaluer la similarité. Toutefois, pour obtenir une meilleure estimation de la variabilité du béton, les mesures du CND doivent être réparties sur l'ensemble de la structure.

D. Échantillonnage par optimisation de la variance

La méthode d'échantillonnage par optimisation de la variance a pour but de sélectionner des données qui représentent de manière significative l'ensemble des mesures non destructives. Pour ce faire, toutes les combinaisons possibles d'emplacements de test NC sont considérées dans l'analyse. La fonction objective à minimiser mesure la différence entre la variance des mesures non destructives aux emplacements des prélèvements et la variance de toutes les mesures du CND. Afin d'évaluer l'impact de cette méthode sur les résultats de l'évaluation, un code d'optimisation a été créé. Ce code extrait toutes les combinaisons NC possibles des mesures non destructives tout en couvrant au maximum la plage des données. Il calcule ensuite la variance des mesures du CND aux emplacements carottés et la variance de toutes les mesures non destructives de la base de données. Si la différence entre les variances est minimale, le sous-ensemble de données NC peut être considéré comme similaire à l'ensemble des mesures de la base de données. Ensuite, Pour sélectionner les emplacements de test RH ou/et UPV pour le carottage, il est nécessaire de choisir une valeur CND de chaque groupe.

III. MISE EN ŒUVRE DES STRATEGIES D'ECHANTILLONNAGES PROPOSEES

Afin de mettre en œuvre les différents plans d'échantillonnage, il est nécessaire d'organiser les lectures des techniques du CND en groupes. Cette pratique permet de faciliter l'application des règles d'échantillonnage spécifiques. En regroupant les lectures, on peut mieux contrôler la taille des échantillons prélevés à partir de chaque groupe, en fonction des objectifs de l'étude et des besoins spécifiques d'analyse. Ensuite, pour déterminer les emplacements principaux à partir des emplacements de test non destructif, différentes méthodes d'échantillonnage doivent être appliquées en suivant les étapes décrites dans la section précédente. À chaque emplacement principal, deux données sont extraites : la mesure du CND (RH ou/et UPV) et la résistance du béton. En utilisant les approches d'identification de modèles (bi-objectif et multi-objectif), il est possible d'établir une corrélation entre les résistances des échantillons et les lectures du CND.

Après l'introduction de l'ensemble de données expérimental (NT = 100), le simulateur sélectionne des emplacements de test NC pour les échantillons. Ensuite, le simulateur identifie un modèle de conversion linéaire en utilisant l'une des approches d'identification de modèles (bi-objectif ou multi-objectif). Le modèle identifié est appliqué aux emplacements de test NT afin d'évaluer la résistance estimée $f_{c\ est}$ à chaque emplacement de test. Les résultats de la simulation sont : la résistance moyenne et la variabilité de la résistance du béton. Pour tenir compte de l'impact du nombre d'emplacements de test, le simulateur répète toute la procédure NI = 10000 fois pour des valeurs de NC allant de 3 à 20. Ainsi, pour l'ensemble de données expérimental et pour chaque valeur de NC, le simulateur produit une série de valeurs NI pour la résistance moyenne estimée

$\bar{f}_{c\ est}$ et une série de valeurs NI pour la variabilité de la résistance estimée $s(f_{c\ est})$. Les résultats de chaque série sont ensuite examinés en utilisant la fonction de distribution cumulative (CDF).

Pour chaque plan d'échantillonnage, des courbes de risque sont créées en utilisant les courbes CDF obtenues. Les courbes de risque permettent de déterminer le risque (probabilité) d'obtenir une valeur estimée en dehors de la plage désirée pour un niveau d'incertitude (ou d'erreur) donné autour de la vraie valeur (Alwash, 2017). Pour établir ces courbes, on fixe un intervalle autour de la valeur cible réelle et on quantifie le risque que la valeur estimée soit en dehors de cette plage. Afin de générer les courbes de risque pour l'estimation de la résistance moyenne, on fixe un degré d'incertitude tolérable ($U = \pm 10\%$). Pour les courbes de risque de la variabilité de la résistance, le niveau d'incertitude accepté est de ($U = \pm 25\%$).

IV. RESULTATS

A. Analyse des courbes de risque correspondant à l'estimation de la résistance moyenne à l'aide des différentes stratégies d'échantillonnage

La Figure 1 présente une analyse comparative du risque d'évaluation de la résistance moyenne entre les différents plans d'échantillonnage, en fonction du nombre de carottes. La Figure 1.a présente les courbes de risque associées à l'application de la technique du rebond RH et la figure 1.b présente les courbes de risque associées à la combinaison des deux techniques du CND, à savoir le rebond et les ultrasons. Chaque figure présente cinq courbes qui correspondent respectivement à cinq méthodes d'échantillonnage : aléatoire, conditionnel (RILEM), stratifié proportionnel, par similarité et par optimisation de la variance.

L'observation principale qui ressort des deux figures est l'impact significatif de la précision des mesures. Les données réelles ont une précision moyenne, ce qui entraîne une convergence plus lente. Bien que toutes les courbes montrent une légère convergence, aucune ne converge vers zéro, même avec un grand nombre d'échantillons. Cela implique qu'il est impossible d'estimer la résistance avec une grande précision même avec un nombre important d'échantillons.

De plus, les résultats indiquent que toutes les stratégies d'échantillonnage sont plus performantes que l'échantillonnage aléatoire pour estimer la résistance moyenne. Les quatre processus de sélection des prélèvements présentent une précision presque similaire, en particulier pour les NC élevés. Enfin, l'échantillonnage par optimisation de la variance réduit l'incertitude du modèle de conversion en couvrant mieux les variations de la résistance du béton. Par conséquent, en fonction du risque, lorsque le nombre de NC est faible ($NC < 6$), la sélection par optimisation de la variance est fortement recommandée. Cependant, pour un nombre élevé de NC, les quatre plans d'échantillonnage présentent un risque pratiquement identique.

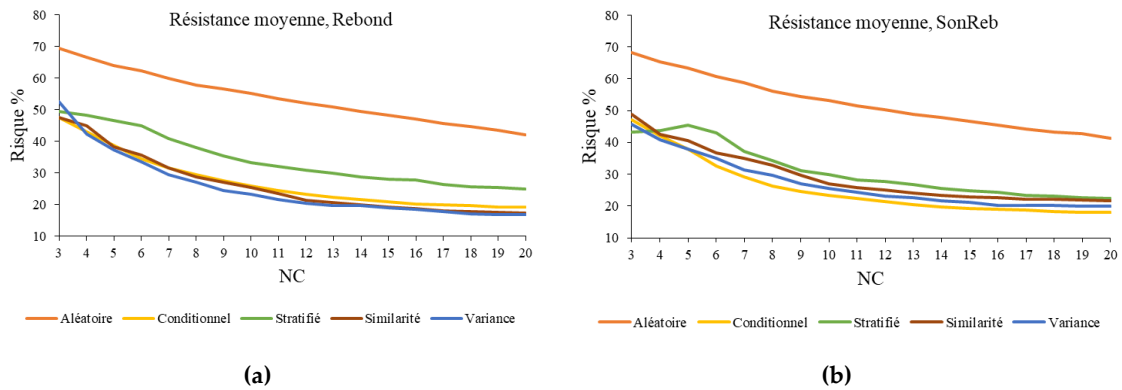


FIGURE 1. Courbes de risque des différents plans d'échantillonnage, pour l'estimation de la résistance moyenne, en considérant a) le rebond, b) la combinaison des deux techniques SonReb

B. Analyse des courbes de risque correspondant à l'estimation de la variabilité de la résistance à l'aide des différentes stratégies d'échantillonnage

Des courbes de risque ont été établies pour évaluer la qualité de l'estimation de la variabilité de la résistance du béton, avec un niveau d'incertitude de $\pm 25\%$. La figure 2.a présente les courbes de risque générées en utilisant l'approche bi-objectif avec la technique du rebond. La figure 2.b montre les courbes de risque associées à l'approche multi-objectif avec la combinaison des techniques du CND (RH et UPV). Selon l'analyse des données réelles, toutes les méthodes d'échantillonnage peuvent correctement estimer la variabilité de la résistance, avec des performances similaires qui s'améliorent avec une augmentation du NC. L'utilisation de la combinaison de techniques du CND pour l'analyse de la variabilité de la résistance a réduit le risque d'estimation par rapport à l'utilisation d'une seule méthode du CND. L'utilisation de différents plans d'échantillonnage a également amélioré l'estimation de la variabilité de la résistance. La complexité de cette étude réside donc dans les différentes interactions entre la valeur supplémentaire des différents plans d'échantillonnage et les avantages potentiels de la combinaison des techniques non destructives.

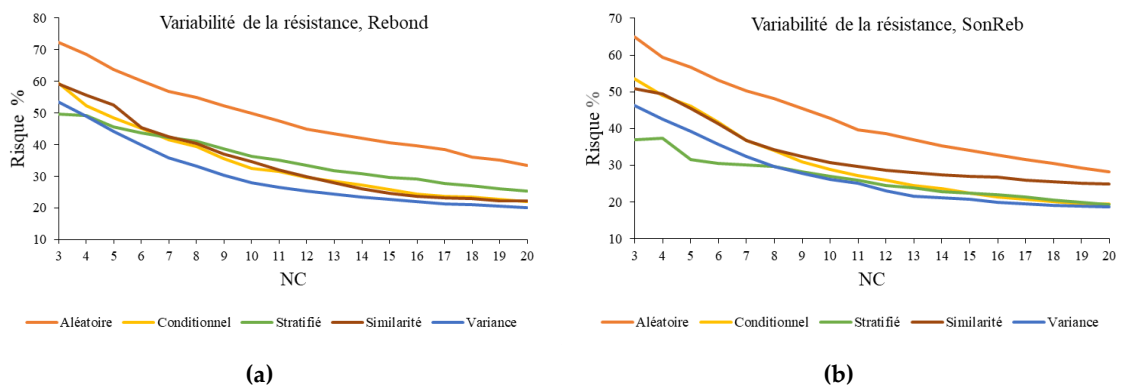


FIGURE 2. Courbes de risque des différents plans d'échantillonnage, pour l'estimation de la variabilité, en considérant a) le rebond, b) la combinaison des deux techniques SonReb

V. CONCLUSION

L'efficacité des différents plans d'échantillonnage suggérés a été évaluée afin de sélectionner les zones optimales pour l'extraction des carottes. Ces techniques d'échantillonnage, par opposition au carottage aléatoire, peuvent soit réduire le nombre de carottes nécessaires pour l'évaluation de la résistance du béton, soit réduire le degré d'incertitude concernant les qualités évaluées pour un nombre donné de carottes.

Les résultats des données expérimentales ont été évalués statistiquement en produisant des courbes de risque pour chaque plan d'échantillonnage. Des recommandations pour une évaluation générale de la résistance du béton sont fournies sur la base d'une analyse des résultats. Les différents plans d'échantillonnage semblent présenter un risque moins élevé de surestimation de la résistance par rapport au carottage aléatoire. Par conséquent, il est nécessaire de considérer un seul processus d'échantillonnage lors de l'évaluation de la résistance du béton. L'utilisation de l'échantillonnage par optimisation de la variance est alors recommandée.

Il est évident que les plans d'échantillonnage ont une forte influence sur la qualité de l'évaluation de la résistance du béton. Par ailleurs, Il est également important de tenir compte d'autres éléments contribuant tels que la précision de la mesure (ou la variabilité intra-test des mesures du CND), la variabilité réelle de la résistance du béton et la méthode d'identification du modèle.

REFERENCES

Ali Benyahia, K., Sbartai, Z.M., Denys, B., Kenai, S., Ghrici, M., 2017. Analysis of the single and combined non-destructive test approaches for on-site concrete strength assessment: General statements based on a real case-study. *Case Stud. Constr. Mater.* 6. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.004>

Ali-Benyahia, K., Sbartai, Z.-M., Breysse, D., Ghrici, M., Kenai, S., 2019. Improvement of nondestructive assessment of on-site concrete strength: Influence of the selection process of cores location on the assessment quality for single and combined NDT techniques. *Constr. Build. Mater.* 195, 613–622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.032>

Ali-Benyahia, K., Sbartai, Z.-M., Breysse, D., Kenai, S., Ghrici, M., 2017. Analysis of the single and combined non-destructive test approaches for on-site concrete strength assessment: General statements based on a real case-study. *Case Stud. Constr. Mater.* 6, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.004>

Alwash, M., Breysse, D., Sbartai, Z.M., 2015. Non-destructive strength evaluation of concrete: Analysis of some key factors using synthetic simulations. *Constr. Build. Mater.* 99, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.023>

Alwash, M., Sbartai, Z.M., Breysse, D., 2016. Non-destructive assessment of both mean strength and variability of concrete: A new bi-objective approach. *Constr. Build. Mater.* 113, 880–889. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.120>

Alwash, M.F.A., 2017. Assessment of concrete strength in existing structures using nondestructive tests and cores : analysis of current methodology and recommendations for more reliable assessment (phdthesis). Université de Bordeaux.

Boriah, S., Chandola, V., Kumar, V., 2008. Similarity Measures for Categorical Data: A Comparative Evaluation. <https://doi.org/10.1137/1.9781611972788.22>

Breysse, D., 2012. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Constr. Build. Mater.* 33, 139–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103>

Breysse, D., Balayssac, J.-P., Biondi, S., Corbett, D., Goncalves, A., Grantham, M., Luprano, V.A.M., Masi, A., Monteiro, A.V., Sbartai, Z.M., 2019. Recommendation of RILEM TC249-ISC on non destructive in situ strength assessment of concrete. *Mater. Struct.* 52, 71. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1369-2>

Breysse, D., Martínez-Fernández, J.L., 2014. Assessing concrete strength with rebound hammer: review of key issues and ideas for more reliable conclusions. *Mater. Struct.* 47, 1589–1604. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0139-9>

Breysse, D., Romão, X., Alwash, M., Sbartai, Z.M., Luprano, V.A.M., 2020. Risk evaluation on concrete strength assessment with NDT technique and conditional coring approach. *J. Build. Eng.* 32, 101541. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101541>

Breysse, D., Villain, G., Sbartai, Z.M., Garnier, V., 2018. 7 - Construction of Conversion Models of Observables into Indicators, in: Balayssac, J.-P., Garnier, V. (Eds.), *Non-Destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures*. Elsevier, 231–257. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-229-8.50007-8>

Irani, J., Pise, N., Phatak, M., 2016. Clustering Techniques and the Similarity Measures used in Clustering: A Survey. *Int. J. Comput. Appl.* 134, 9–14. <https://doi.org/10.5120/ijca2016907841>

Saleh, E., Tarawneh, A., Dwairi, H., AlHamaydeh, M., 2022. Guide to non-destructive concrete strength assessment: Homogeneity tests and sampling plans. *J. Build. Eng.* 49, 104047. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104047>

Sbartai, Z.-M., Alwash, M., Breysse, D., Romão, X., Luprano, V.A.M., 2021. Combining the bi-objective approach and conditional coring for a reliable estimation of on-site concrete strength variability. *Mater. Struct.* 54, 230. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01820-9>

Wang, J.-F., Stein, A., Gao, B.-B., Ge, Y., 2012. A review of spatial sampling. *Spat. Stat.* 2, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2012.08.001>

Weller-Fahy, D.J., Borghetti, B.J., Sodemann, A.A., 2015. A Survey of Distance and Similarity Measures Used Within Network Intrusion Anomaly Detection. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 17, 70–91. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2336610>