

Impact de la contrainte sur le signal RADAR au sein du béton

Aleth Confais

EDF, LMDC

Le sujet global de cette étude est l'évaluation non destructive des structures de génie civil en béton précontraint. Les structures réalisées en béton précontraint peuvent subir des pertes de précontrainte du fait du vieillissement des matériaux (fluage, retrait, corrosion...). Il est donc crucial de pouvoir connaître l'état de contrainte pour assurer la sûreté des structures. La technique actuelle à savoir le test de l'arbalète est semi-destructif or les enceintes de confinement notamment ne peuvent subir de tests intrusifs. Ainsi, il est nécessaire d'utiliser des techniques non destructives pour déterminer l'état de contrainte de ces structures. L'approche de cette étude est de déterminer les variations de contrainte du béton par des techniques électromagnétique. De façon pratique, l'étude se focalise sur l'impact de la contrainte sur la propagation des ondes électromagnétiques au sein du béton. Les essais sont réalisés avec des antennes GPR (Ground Penetrating Radar) et Vivaldi sur des bétons secs et à teneur en eau ambiante en utilisant deux directions de mesure. Les résultats montrent qu'une augmentation de contrainte entraîne une diminution de l'amplitude et une augmentation du retard des ondes électromagnétiques. Ces variations dépendent de l'état hydrique du béton et de la direction de la mesure.

Mots clés : Contrôle non destructif, Ground Penetrating Radar, antennes Vivaldi, béton, contrainte

I. INTRODUCTION

De nombreuses structures de génie civil sont réalisées en béton précontraint, notamment des ponts, barrages ainsi que des enceintes de confinement. Or, le béton précontraint peut être sujet à des détériorations à la suite du vieillissement ou endommagement du béton (fluage, retrait...) ou des câbles de précontrainte (corrosion, mauvaise mise en place...). Celles-ci peuvent mener à une perte de tension dans les câbles et ainsi une perte de contrainte du béton. Il est essentiel de surveiller l'état de contrainte de ces structures afin de prévenir d'éventuels relâchements ou ruptures de câbles et par voie de conséquence, des pertes de précontrainte. La technique actuelle permettant de mesurer la tension des câbles est le test à l'arbalète qui est une technique semi-destructive (IFFSTAR, 2015) puisqu'elle nécessite le percement d'une cavité dans le béton pour atteindre les câbles. Mais cette technique n'est pas adaptée pour les ancrages de barrages ou les enceintes de confinement car elle est trop intrusive. Il est donc essentiel de développer des techniques non destructives permettant d'évaluer les pertes de tension des câbles. L'approche de cette étude est d'évaluer de manière non destructive le niveau de contrainte du béton lui-même plutôt que d'évaluer la tension des câbles.

Les techniques de CND (Contrôle Non Destructif) peuvent être utilisées pour déterminer des propriétés mécaniques du béton. Les ultrasons sont notamment utilisés pour estimer la valeur du module d'élasticité (Ivanchev, 2018), (Kolluru et al., 2000). Des études montrent également le lien entre la contrainte et la propagation des ultrasons au sein du béton : la vitesse (Lillamand et al., 2010) ainsi que la coda du signal (Planès and Larose, 2013) sont impactées par l'application d'une contrainte.

Les techniques électromagnétiques sont couramment utilisées dans le domaine du CND, notamment le GPR (Ground Penetrating Radar) pour déterminer l'emplacement des armatures du béton armé (Xian-Qi He et al., 2009) ou déterminer la quantité d'eau au sein du béton (Agred et al., 2018). Les résultats de la littérature montrent que les propriétés mécaniques du béton comme la résistance à la compression peuvent être reliées à des propriétés électromagnétiques comme la constante diélectrique (Chung et al., 2017) et la conductivité (Ramezani pour et al., 2011). D'autres résultats montrent la relation entre la contrainte et la résistivité du béton (Cao and Chung, 2002). Cependant, la littérature sur ce sujet est peu fournie. Cette étude vise donc à compléter celle-ci.

Cette étude a pour but de déterminer l'impact d'une variation de la contrainte sur les propriétés électromagnétiques du béton en utilisant des antennes GPR de fréquence centrale de 1,5 GHz. Du fait de l'impact de l'état hydrique du béton sur la propagation des signaux GPR dans le béton, deux états hydriques sont étudiés. Afin de compléter ces résultats, les mêmes essais sont réalisés avec des antennes Vivaldi sur les mêmes dalles de béton.

En première partie, les antennes GPR et Vivaldi, le chargement, le béton ainsi que les appareils de mesure sont présentés. Ensuite, le protocole d'essai et de traitement des données est détaillé. Enfin, les résultats des essais sont présentés et l'impact de la contrainte sur la propagation des ondes dans le béton est étudié.

II. DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

A. équipements

Le GPR utilisé dans cette étude, développé par Geophysical Survey Systems GSSI®, est composé d'une unité de contrôle SIR30 sur laquelle est branchée une antenne GSSI 5100 de fréquence centrale 1.5 GHz. La durée de réception des signaux est de 8ns et la résolution est fixée à 4096 points. Ce qui correspond à une résolution temporelle de l'ordre de 2.10^{-12} s. Après les essais, une moyenne des signaux est réalisée et un filtre FIR (Finite Impulsive Response) de 300MHz-4GHz est appliqué. Le second système de mesure utilisé est composé d'un VNA (Vector Network Analyser) Anritsu MS46122B sur lequel est branchée une antenne Vivaldi permettant d'émettre des signaux dans une gamme de fréquence de 100MHz à 20GHz. Afin de pouvoir comparer les résultats de l'antenne Vivaldi avec ceux obtenus avec le GPR, dans cette première approche seul le pic de fréquence le plus proche de 1,5 GHz est étudié, à savoir le pic pour $f=1,7$ GHz (cf. figure 4). D'autres pics de fréquence ont été étudiés mais, présentant les mêmes tendances que celles présentées dans cet article, ne seront pas présentés. Les mesures Vivaldi donnent comme résultat un nombre complexe, le coefficient de réflexion S . Pour étudier l'amplitude, le paramètre S_{11} présenté à l'équation (1) est utilisé. Pour étudier la temporalité, la phase φ est calculée par le biais de l'équation (2).

$$S_{11}(f) = 20 \log_{10}|S(f)| \quad (1)$$

$$\varphi(f) = \arg(S(f)) \quad (2)$$

B. Béton

Pour cette étude, trois dalles de béton ont été coulées en utilisant les formulations définies au tableau 1. La dimension des dalles est $12 \times 60 \times 60$ cm³. L'épaisseur de 12 cm est choisie afin d'éviter une superposition des ondes émises. Les dimensions de 60 cm sont choisies pour éviter les effets de bord. Deux formulations sont utilisées afin d'étudier l'impact de la porosité, mais celui-ci ne sera pas présenté ici. Après confection, les dalles sont conservées 28 jours en cure humide.

TABLEAU 1. Formulation et résistance à la compression

Composants / Caractéristiques	Spécificités	SP	SA et SD	unité
Sable Boulonnais	0/2mm	985	890	kg.m ⁻³
Gravier Boulonnais	5/12mm	985	984	kg.m ⁻³
Ciment	CEM I 52,5 R Lafarge	280	350	kg.m ⁻³
Eau	-	207	206	kg.m ⁻³
Résistance compression		39	47	MPa

Afin d'étudier l'effet de différents états hydriques du béton sur les mesures, les dalles sont placées dans deux atmosphères différentes après la cure. Les dalles SA et SP sont conservées dans le laboratoire en atmosphère ambiante à l'endroit où les essais sont menés. La seconde dalle SD est conservée dans une étuve à 80°C ; cette dalle est sortie de l'étuve six heures avant de réaliser les essais afin que la température de la surface de la dalle diminue, une étude préalable montrant que le signal radar se stabilise après six heures de refroidissement.

Les mesures Vivaldi ont été réalisées seulement sur la dalle SP. Sur cette dalle ont également été réalisées les mesures GPR. Afin de pouvoir comparer les mesures GPR sur la dalle ambiante et dalle sèche, dans cet article, les mesures GPR sur la dalle SP ne sont pas présentés .

III. ESSAIS

Le protocole suivant est appliqué aux essais GPR et Vivaldi. Le test consiste à mettre en compression des dalles de béton par le biais d'une presse hydraulique. Afin d'étudier l'impact de la contrainte sur les signaux mesurés, différents niveaux de contrainte sont appliqués de 1 MPa à 15 MPa par pas de 2,5 MPa pour les essais GPR sur les dalles SA et SD et de 1 MPa à 9 MPa par pas de 1 MPa pour les essais Vivaldi sur la dalle SP. Les différences de niveau de chargement sont dues à la différence de résistance des bétons. Des plaques de téflon sont placées en dessous et au-dessus de la dalle afin d'éviter le frottement et de favoriser une contrainte unidirectionnelle. Des mesures de déformation réalisées par des fibres optiques incorporées au sein du béton ont confirmé que la contrainte est uniaxiale. Deux configurations sont étudiées : le dispositif horizontal (champ électrique \vec{E} perpendiculaire à la charge) et vertical (le champ électrique \vec{E} parallèle à la charge), comme illustré à la figure 1 pour les essais GPR et à la figure 2 pour les essais Vivaldi. La face opposée à celle où les antennes sont apposées est recouverte d'une feuille d'aluminium afin d'obtenir une réflexion complète du signal électromagnétique.

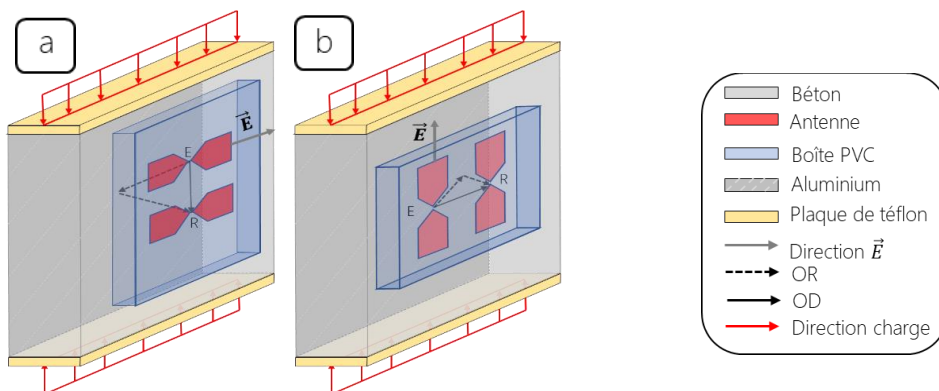


FIGURE 1. Configuration de l'essai avec l'antenne GPR (a) Mesures horizontales (b) Mesures verticales

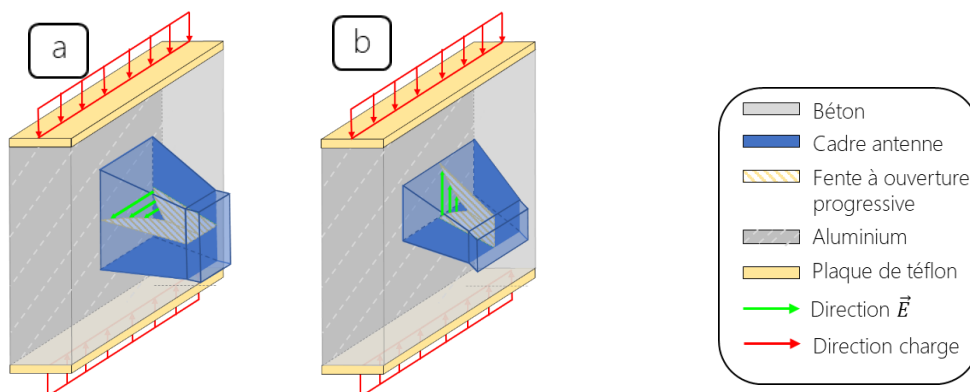


FIGURE 1. Configuration de l’essai avec les antennes Vivaldi. Mesures (a) horizontales (b) verticales

IV. RÉSULTATS

A. Mesures

La figure 3 présente les signaux reçus par l’antenne GPR. Toutes les mesures réalisées aux différents niveaux de contrainte appliquée à la dalle sont représentées. Le signal peut être approximativement divisé en deux parties : l’onde directe (OD) en rouge et l’onde réfléchi (OR) en bleu. Une simple observation de ces signaux ne permet pas de détecter l’impact de la contrainte sur le signal, ni sur l’onde directe ni sur l’onde réfléchi. Il n’y a ni variation d’amplitude, ni décalage temporel.

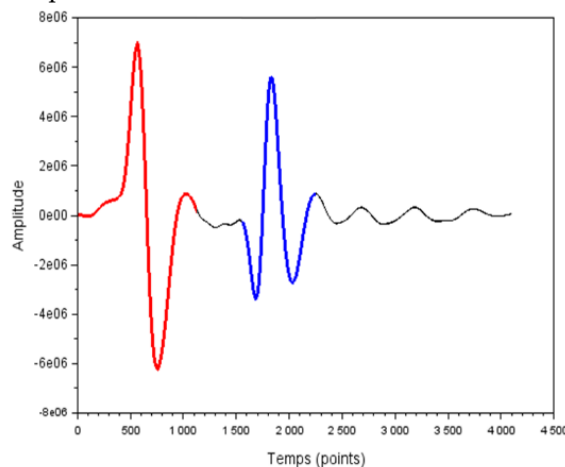


FIGURE 3. Signaux GPR sur la dalle SA pour les mesures verticales, l’OD en rouge et l’OR en bleu

La figure 4 présente l’évolution de la grandeur S11 calculée selon l’équation (1) à partir des signaux réfléchis mesurés par les antennes Vivaldi en fonction de la fréquence. Comme précisé en partie II, cette étude se limite au pic situé à 1,7 GHz. Cette figure illustre la mesure réalisée pour une contrainte de 1 MPa.

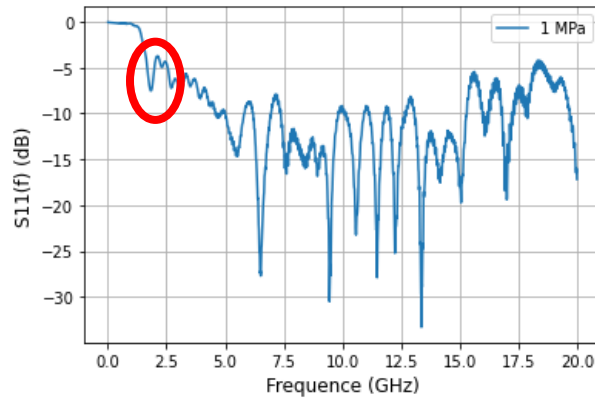


FIGURE 4. Signaux mesurés avec l’antenne Vivaldi pour une charge de 1 MPa sur une gamme de fréquence de 0 à 20 GHz – Pic de 1,7 GHz étudié identifié par un ovale rouge.

B. Amplitude

Cette section se focalise tout d’abord sur l’amplitude du signal GPR puis des mesures Vivaldi.

- Antennes GPR

Les variations d’amplitude pour chaque niveau de contrainte sont quantifiées par comparaison avec le niveau de référence de 1 MPa en utilisant l’indicateur d’amplitude relative $A(\sigma)$ défini à l’équation (3) où $Ampl(\sigma)$ représente l’amplitude maximale de l’onde réfléchi pour un niveau de contrainte égal à σ MPa et $Ampl(ref)$ représente la même valeur pour le niveau de référence de 1 MPa.

$$A(\sigma) = \frac{Ampl(\sigma) - Ampl(ref)}{Ampl(ref)} * 1000 \quad (3)$$

La figure 5 présente l’évolution de l’indicateur d’amplitude relative $A(\sigma)$ en fonction de la charge appliquée sur les dalles ambiante SA en rouge et la dalle sèche SD en vert pour les deux configurations d’essai (mesures horizontales SD_H en pointillé et mesures verticales en ligne pleine). Cette figure présente pour chaque dispositif la moyenne des résultats de deux essais.

Pour la dalle SA, de manière générale, l’amplitude des signaux est influencée : plus la charge augmente, plus l’amplitude diminue. Les variations observées sont faibles mais les mesures sont répétables. Bien qu’une diminution d’amplitude puisse être observée pour les deux configurations, une légère anisotropie peut être observée : l’influence de la charge est plus importante lorsque le champ électrique est normal à la direction de la charge. Ces diminutions d’amplitude pourraient être causées par une augmentation anisotrope de la conductivité électrique.

Les mesures réalisées sur la dalle sèche SD sont également présentées en vert à la figure 5. Pour la dalle SD, le niveau de charge impacte peu l’amplitude. En effet, l’évolution de l’indicateur d’amplitude relative $A(\sigma)$ ne présente pas de variation en fonction de la contrainte et varie peu en comparaison avec ce qui a été observé sur la dalle ambiante. Ces résultats montrent que la teneur en eau du béton influence grandement l’impact de la contrainte sur l’amplitude du signal. Un béton sec présente une conductivité quasi-nulle, ceci pourrait expliquer ces faibles variations observées sur la dalle SD.

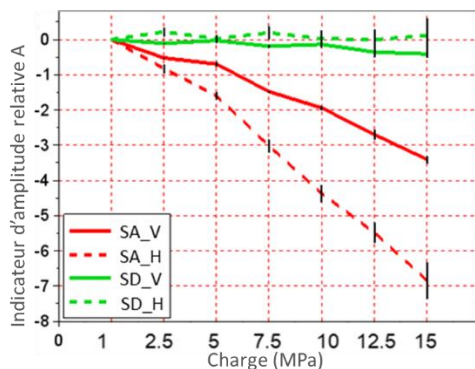


FIGURE 5. Évolution de l’indicateur d’amplitude relative A (GPR) pour les dalles SA et SD. Chargement de 1 à 15 MPa en comparaison avec la mesure de référence de 1 MPa.

- Antenne Vivaldi

Pour les mesures S11 réalisées avec l’antenne Vivaldi, les mêmes calculs que ceux présentés à l’équation (3) sont réalisés à la fréquence de 1,7 GHz. La figure 6 présente l’évolution du paramètre $A_{f=1.7GHz}$ en fonction de la charge appliquée à la dalle de béton SA. Les courbes sont une moyenne de cinq mesures réalisées à différentes échéances. La ligne continue représente les mesures horizontales et la ligne pointillée représentent les mesures verticales. Ces essais n’ont pas été réalisés sur dalle sèche car il a été vu que sur celle-ci, les signaux sont faiblement impactés par la contrainte. Le même comportement que pour l’antenne GPR est observé : dans chaque direction, une diminution d’amplitude peut être observée, cependant les variations d’amplitude sont légèrement plus élevées pour les mesures horizontales.

Ces résultats montrent également un comportement anisotrope du signal avec la contrainte. Les tests n’ont pas été réalisés sur dalle sèche avec l’antenne Vivaldi.

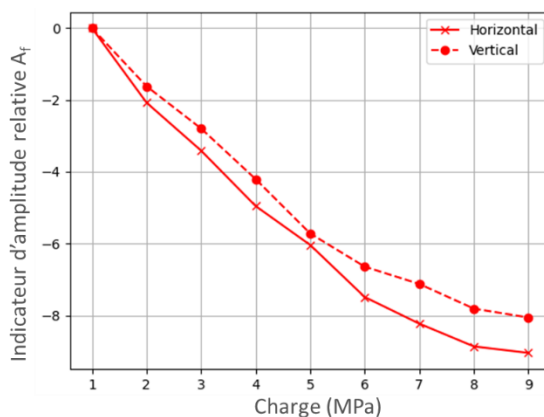


FIGURE 6. Évolution de l’indicateur d’amplitude relative $A_{f=1.72 GHz}$ (Vivaldi) pour la dalle SA – Mesures pour des charges de 1 à 9 MPa en comparaison à la mesure de référence de 1 MPa.

C. Analyse de la phase

Pour le pic à la fréquence 1.72 GHz, la phase φ est mesurée et est utilisée pour calculer le décalage temporel des signaux pour chaque niveau de charge en comparaison avec le niveau de référence en utilisant la formule suivante (4) :

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f} \tag{4}$$

La figure 7 représente l'évolution du décalage temporel en fonction de la charge appliquée sur la dalle. Chaque courbe est une moyenne de trois essais. La courbe pleine représente les mesures horizontales et la courbe pointillée les mesures verticales. Cette figure montre que l'augmentation de la contrainte entraîne une variation négative temporelle donc un retard. Les variations sont légèrement plus élevées pour les mesures horizontales que pour les mesures verticales. Ces variations temporelles ne sont pas observées sur les mesures GPR du fait de la faible résolution temporelle (4096 points pour une fenêtre temporelle de $8 \cdot 10^{-9}$ s i.e une résolution de l'ordre de $2 \cdot 10^{-12}$ s). L'apparition d'un décalage temporel pourrait être lié à une variation de permittivité.

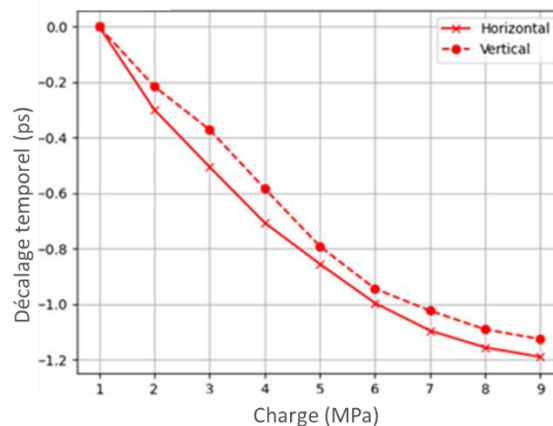


FIGURE 7. Décalage temporel en fonction de la charge pour la dalle SP

Les résultats expérimentaux mettent en lumière que la contrainte influence les signaux RADAR, en causant une faible diminution de l'amplitude et un faible retard des signaux qui pourraient être reliés à des variations de propriétés électromagnétiques du béton. L'utilisation d'un modèle numérique de type Finite Difference Time Domain (Albrand et al., 2017) simulant la propagation des ondes électromagnétiques au sein du béton permet d'explorer les hypothèses et de les corroborer. Ainsi, les variations d'amplitude et les décalages temporels observés pourraient être dus à une faible augmentation de conductivité et à une faible diminution de permittivité. Cet article se focalisant sur l'aspect expérimental de ces travaux, ces résultats ne sont pas présentés ici. Plusieurs phénomènes pourraient expliquer ces variations de propriétés électromagnétiques. En effet, sous l'effet de la contrainte, la porosité du béton se déforme (Coussy, 2010), ce qui peut entraîner plusieurs conséquences sur les propriétés électromagnétiques du béton. Tout d'abord, si un pore est saturé, sous l'action de la contrainte l'eau est mise en pression, ce qui a pour conséquence de faire varier sa permittivité (Floriano and Nascimento, 2004). De même, la forme des pores influe sur la permittivité (Guihard, 2019). Il est donc possible que les variations des signaux RADAR observées aux figures 5, 6 et 7 soient dues à un ou une combinaison de ces phénomènes. Ceux-ci sont donc en ce moment à l'étude par le biais de modélisation analytique, visant à établir un lien entre la poroélasticité et les propriétés électromagnétiques du béton.

IV. CONCLUSION

Les résultats présentés dans cet article montrent que la contrainte peut impacter l'amplitude des signaux GPR : une diminution de l'amplitude est observée lorsque la charge augmente. Les variations observées sont faibles mais les essais sont répétables. Les mêmes essais ont été réalisés avec une antenne Vivaldi et ont confirmé les variations d'amplitude. Ce comportement est anisotrope et les variations sont fortement impactées par le degré d'humidité du béton. De plus, un décalage temporel négatif est observé sur les mesures réalisées avec l'antenne Vivaldi, ce

décalage diminuant avec la contrainte. En se basant sur ces observations, l'hypothèse suivante peut être émise : la contrainte impacte la conductivité électrique et la permittivité du béton de manière anisotrope. Des simulations utilisant un modèle de propagation des ondes électromagnétiques au sein du béton confirment ces hypothèses. Ces variations pourraient être expliquées par des phénomènes poromécaniques actuellement à l'étude par le biais d'un modèle analytique. Cependant, cet article se focalisant sur les résultats expérimentaux, les aspects simulation et modélisation n'y sont pas présentés.

REFERENCES

- Agred, K., Klysz, G., Balayssac, J.P., 2018. Location of reinforcement and moisture assessment in reinforced concrete with a double receiver GPR antenna. *Constr. Build. Mater.*
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.190>
- Albrand, M., Klysz, G., Grisel, Y., Ferrieres, X., 2017. A numerical model for a GPR device with two receiving antennas. 2017 9th Int. Work. Adv. Gr. Penetrating Radar, IWAGPR 2017 - Proc. <https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996035>
- Cao, J., Chung, D.D.L., 2002. Effect of strain rate on cement mortar under compression, studied by electrical resistivity measurement. *Cem. Concr. Res.* 32, 1657–1661.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00856-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00856-6)
- Chung, K.L., Yuan, L., Ji, S., Sun, L., Qu, C., Zhang, C., 2017. Dielectric characterization of Chinese standard concrete for compressive strength evaluation. *Appl. Sci.* 7.
<https://doi.org/10.3390/app7020177>
- Coussy, O., 2010. *Mechanics and physics of porous solids*, Wiley. ed. Chichester.
<https://doi.org/10.1002/9780470710388>
- Floriano, W.B., Nascimento, M.A.C., 2004. Dielectric constant and density of water as a function of pressure at constant temperature. *Brazilian J. Phys.* 34, 38–41. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332004000100006>
- Guihard, V., 2019. Homogénéisation de grandeurs électromagnétiques dans les milieux cimentaires pour le calcul de teneur en eau.
- IFFSTAR, 2015. Mesure de la tension des câbles et armatures de précontrainte au moyen de l'arbalète.
- Ivanchev, I., 2018. Experimental Determination of Modulus of Elasticity of Concrete by Non-Destructive Ultrasonic Pulse Velocity Method. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 6, 2647–2651. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.5433>
- Kolluru, S. V., Popovics, J.S., Shah, S.P., 2000. Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders. *Cem. Concr. Aggregates* 22, 81–89. <https://doi.org/10.1520/cca10467j>
- Lillamand, I., Chaix, J.F., Ploix, M.A., Garnier, V., 2010. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. *NDT E Int.* 43, 655–660.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.07.001>
- Planès, T., Larose, E., 2013. A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete. *Cem. Concr. Res.* 53, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.07.009>
- Ramezani pour, A.A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., Moodi, F., 2011. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Constr. Build. Mater.* 25, 2472–2479.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>
- Xian-Qi He, Zi-Qiang Zhu, Qun-Yi Liu, and G.-Y.L., 2009. Review of GPR rebar detection. pp. 804–812.