

CARACTÉRISATION DE LA QUALITÉ DU BÉTON DES PONTS À PARTIR D'UN INDICE BASÉ SUR LA MESURE DES VITESSES ULTRASONIQUES

François Saint-Pierre, ing. Ph. D,
Yvon Latreille, Ing. M.Sc.A., Luc Bertrand ing., Jocelyn Proulx, ing.

DESSAU - LVM
4222, boul. Bourque
Sherbrooke (Québec) Canada J1L 1W6
francois.saint-pierre@lvm.ca

RÉSUMÉ

Certains ponts routiers et autoroutiers en béton, notamment ceux dont la construction remonte à plus d'un demi-siècle, ont fait l'objet de multiples travaux de réparation partielle et parfois urgente, à mesure que des dégradations apparaissaient. De nos jours, les gestionnaires d'ouvrages souhaitent augmenter la pérennité de leurs structures en réalisant des travaux de réhabilitation d'envergure. Dans ce contexte, une évaluation de l'état de certains éléments s'impose. L'approche non destructive permet de localiser, à l'intérieur des ouvrages en béton, les désordres qui se sont développés progressivement au cours des années et qui sont souvent cachés par de multiples couches de revêtement de surface.

Les méthodes non destructives ont des limites, car elles sont influencées par les caractéristiques de fabrication du béton et les conditions environnementales (température, humidité, etc.). Dans les cas d'études réalisées sur des barrages en béton, et plus particulièrement au niveau de leurs piliers, ces limites ont été contournées en utilisant un indice appelé CQD (Concrete Quality Designation). Cet indice est basé sur la mesure des vitesses ultrasoniques obtenues directement sur l'ouvrage et sur des éprouvettes témoins prélevées sur la structure de béton. Le CQD est obtenu en traitant les données recueillies de façon à s'affranchir des caractéristiques de fabrication du béton.

L'étude que nous présentons dans cet article montre que, dans certains cas, cette même approche peut être utilisée sur certains éléments du pont et, en particulier, leurs piles. De fait, la pile du pont Jacques-Cartier étudiée présentait une géométrie similaire à celle des piliers de barrage.

Ces investigations ont permis de produire une cartographie des valeurs de l'indice CQD observées à l'intérieur de la pile, lesquelles illustrent le degré d'endommagement du béton selon une échelle variant de 0 à 100 %. La cartographie des piliers d'un pont, ainsi produite, permet de comparer leur état, et cela même si le béton de fabrication diffère d'un élément à l'autre.

1. INTRODUCTION

Les gouvernements provinciaux du Canada agissent depuis plusieurs années contre le vieillissement des ponts et des viaducs. Au Québec, depuis 2007, des actions ont pu être entreprises, grâce au plan de redressement de l'état du réseau québécois [1].

Ces cinq dernières années, les sommes investies au Québec pour la « conservation des structures » ont triplé. C'est dans le cadre de ces investissements que des méthodes non destructives sont de plus en plus employées au Québec pour évaluer l'état des ponts autoroutiers.

Bien souvent, il est difficile d'évaluer l'état d'endommagement général du béton au cœur même des ouvrages. La réalisation de carottages donne des renseignements très ponctuels et sommaires.

De plus, les échantillons récupérés sont souvent dans un tel état qu'il est difficile de préparer des spécimens de laboratoire convenables pour effectuer des essais mécaniques. Ainsi, les résultats sont bien souvent difficiles à prendre en considération dans les études de capacité portante des ponts.

En mécanique des roches, ce problème a été astucieusement contourné grâce à la définition d'un indice permettant de classer l'état du roc. Cet indice appelé RQD (Rock Quality Designation) est basé sur le rapport entre le nombre de morceaux de carotte de roc intact supérieur à 100 mm et la longueur totale échantillonnée [2 et 3]. Le RQD est parfois utilisé pour qualifier l'état du béton, mais il n'est pas assez précis pour permettre d'optimiser les modèles d'analyse structurale.

Il existe aussi un critère qui permet d'associer aux valeurs de vitesse de propagation des ondes ultrasoniques primaires, une description de la qualité du béton tel qu'il apparaît au tableau 1 [4 et 5]. Ce critère a été recommandé par le Conseil National de Recherches Canada jusqu'en 2008. Depuis, il n'existe à notre connaissance aucun autre critère pour le remplacer.

Tab. 1 : Qualité du béton et vitesse de propagation [4 et 5]

Valeur limite (m.s ⁻¹)	Qualité du béton
Supérieure à 4500	Excellente
De 3600 à 4500	Bonne
De 3000 à 3600	Douteuse
De 2100 à 3000	Mauvaise
Inférieure à 2100	Très mauvaise

Un autre indice est aussi utilisé dans le cas d'études réalisées sur des barrages en béton et plus particulièrement au niveau de leurs piliers [6 et 7]. Cet indice appelé CQD (Concrete Quality Designation) est basé sur la comparaison entre les vitesses ultrasoniques mesurées *in situ* et celles mesurées sur un morceau de carotte prélevée dans l'ouvrage et ne présentant pas de dommages apparents. Le CQD permet ainsi d'exprimer en pourcentage l'état de dégradation du béton de la structure par rapport à son état sain.

Dans les paragraphes suivants, nous décrivons la façon d'établir le CQD et nous illustrons son utilisation avec l'étude d'une pile du pont Jacques-Cartier à Montréal (Québec).

2. INDICE PERMETTANT D'ÉVALUER LA QUALITÉ DU BÉTON (CQD)

La porosité et la fissuration du béton ont un effet sur les paramètres ultrasoniques [8]. En effet, plus le béton est poreux, ou fissuré, plus les vitesses ultrasoniques tendent à diminuer. D'autre part, la porosité du béton dépend aussi des caractéristiques du mélange initial. Pour ces raisons, les vitesses ultrasoniques mesurées peuvent être différentes d'un ouvrage à un autre sans pour autant que ces derniers ne présentent de signes apparents d'endommagement.

L'indice CQD se rapporte à la vitesse ultrasonique mesurée en transmission directe sur une carotte de béton sain et s'exprime en pourcentage. Il est calculé par approximation linéaire entre une valeur de vitesse (V_{ref}) correspondant à un béton dont l'état d'endommagement est très

avancé, la vitesse mesurée sur une éprouvette de béton sain appartenant à la structure (*Vlab*) et, enfin, la vitesse relevée directement sur l'ouvrage (*Vin situ*). La figure 1 illustre la façon dont les vitesses *Vlab* et *Vin situ* sont obtenues et l'équation 1 constitue la relation linéaire permettant de calculer le CQD.

$$\text{CQD} = \frac{V_{in\ situ} - V_{ref}}{V_{lab} - V_{ref}} 100 \quad (\text{équation 1})$$

- Vin situ* Vitesse ultrasonique mesurée sur l'ouvrage (m.s⁻¹)
Vlab Vitesse ultrasonique mesurée en transmission directe sur une éprouvette de béton sain (m.s⁻¹)
Vref Vitesse de référence pour un béton dégradé (m.s⁻¹)
 CQD Concrete Quality Designation (%)

Cette relation linéaire (équation 1) a été établie de telle sorte que lorsque la vitesse ultrasonique mesurée *in situ* (*Vin situ*) tend vers celle mesurée en laboratoire (*Vlab*), alors le CQD se rapproche de 100 %. À l'inverse, lorsque *Vin situ* se rapproche *Vref* (valeur correspondant à un béton très endommagé) alors l'indice CQD tend vers 0 %. Enfin, le tableau 2 indique les critères de qualité de béton associés aux intervalles de CQD [6 et 7]. Les zones de couleurs distinctes associées aux intervalles d'indice CQD correspondent à l'échelle des couleurs utilisées pour cartographier le résultat des mesures faites sur le terrain (Fig. 2).

Tab. 2 : Critères de qualité du béton associés aux intervalles de valeurs de l'indice CQD

Zones	CQD (%)	Qualité du béton*
Bleu	100 et plus	Excellente
Vert	de 70 à 100	Bonne
Jaune	de 50 à 70	Douteuse
Rouge	de 20 à 50	Mauvaise
Noir	de 10 à 20	Très mauvaise
Blanc	moins de 10 **	Anomalie d'envergure à anticiper dans l'ouvrage

* Critères de qualité de béton établies à partir de ceux de Feldman 1977, Leslie et Cheeseman 1949 [4 et 5] en considérant *Vlab* = 4500 m.s⁻¹ et *Vref* = 1500 m.s⁻¹ (équation 1).

** Indice correspondant à un béton très endommagé au point de s'apparenter à un matériau granulaire.

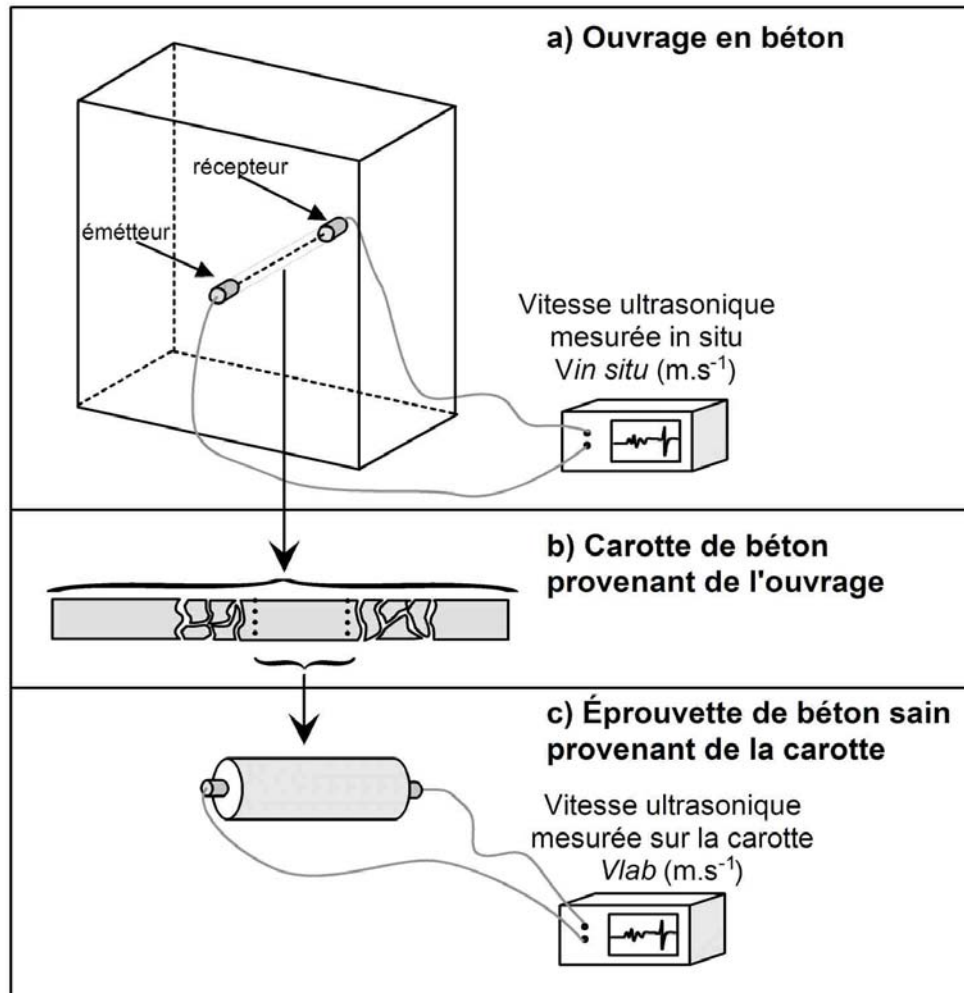


Fig. 1 : Mesure des vitesses ultrasoniques pour la détermination de l'indice CQD

3. ÉTUDE DE CAS : LE PONT JACQUES-CARTIER

3.1 Description du pont Jacques-Cartier et de sa pile 17

Le pont Jacques-Cartier, ouvert à la circulation depuis 1930, est situé à Montréal, au Québec. Il enjambe le fleuve Saint-Laurent entre l'île de Montréal et la ville de Longueuil sur la Rive-Sud. Environ 35 millions de véhicules empruntent le pont Jacques-Cartier chaque année. Ce dernier possède une longueur de 2,7 km et une hauteur de 110 m [9] .

Les essais non destructifs ont été réalisés sur la pile 17 de ce pont (Fig. 2). Cette pile en béton, d'une hauteur d'environ 12 m et d'une largeur variant entre 14,5 et 15,5 m, avait fait l'objet en 2011 de travaux de carottage dans sa partie supérieure. Ces travaux avaient mis en évidence que le béton, au droit de ces sondages, était fortement fissuré.

Les investigations non destructives réalisées en 2012 avaient principalement pour objectif de vérifier si l'état du béton observé dans la partie supérieure de la pile était représentatif de l'état global de la pile.



Fig. 2 : Pile 17 du pont Jacques-Cartier

3.2 Essais ultrasoniques

Cette méthode d'auscultation non destructive permet de repérer les variations de vitesse des ondes ultrasoniques différentes des vitesses moyennes traversant un ouvrage.

Deux techniques normalisées [10 et 11] sont utilisées pour mesurer ces vitesses : « l'impact-écho » et la mesure des vitesses par transmission directe. En mode impact-écho, les vitesses de propagation sont calculées à partir de la fréquence propre du signal reçu alors que l'émetteur et le récepteur sont placés, l'un près de l'autre, sur le même côté de l'ouvrage. En mode « transmission directe », les vitesses de propagation des ondes sonores sont obtenues à partir de la mesure du temps de propagation des ondes dans une masse de béton de dimension donnée. Pour réaliser ces mesures, les émetteurs et les récepteurs sont installés de part et d'autre de la structure. Les vitesses obtenues par les méthodes impact-écho et transmission directe, sont reliées à l'état d'endommagement de la structure. Le tableau 1, présenté au début de l'article, permet d'associer la qualité du béton aux vitesses de propagation des ondes ultrasoniques [4 et 5].

Dans le cas de la pile 17 du pont Jacques-Cartier, les essais ultrasoniques ont été réalisés en mode transmission directe. Ces vitesses varient entre 3750 et 4850 m.s⁻¹.

3.3 Mesures du CQD et interprétation des résultats

La figure 3, illustre la façon dont nous avons évalué la qualité du béton de la pile 17 du pont Jacques-Cartier selon l'indice CQD. Ces résultats ont été obtenus à partir d'essais réalisés sur la carotte CR-A indiquée sur cette même figure.

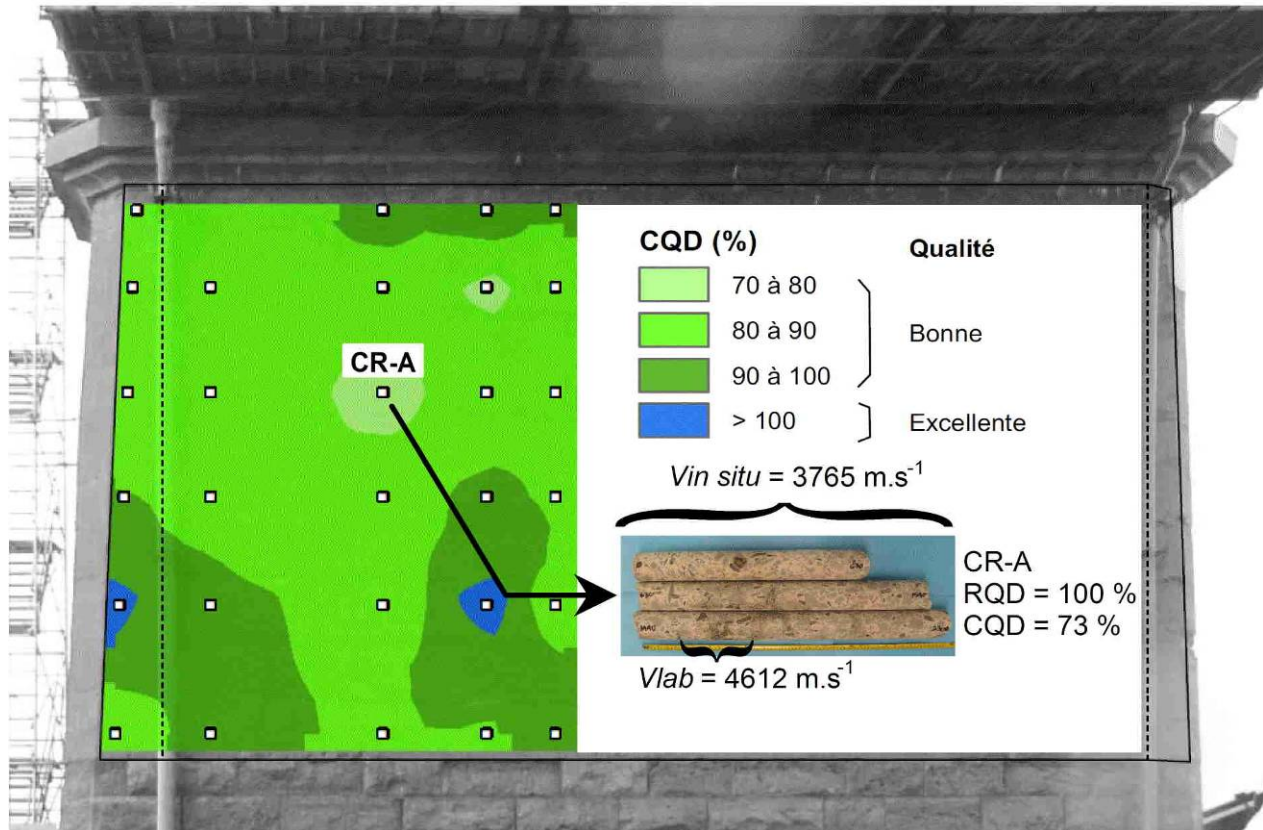


Fig. 3 : Calcul du CQD associé à la pile 17 – comparaison avec l'indice RQD

Les zones vertes et bleues (Fig. 3) représentent les isovaleurs de CQD calculés selon la technique présentée à la section 2 de cet article. Ces dernières varient entre 73 et 108 %. Selon les critères du tableau 2, ces valeurs montrent que la qualité du béton peut être qualifiée de bonne à excellente.

D'autre part, si l'on compare les valeurs de RQD et de CQD mesurées sur la carotte CR-A (Fig. 3), on constate que dans le cas des bétons fissurés, sans pour autant être très endommagés, l'indice CQD est capable de mettre en évidence la présence d'un réseau de fissures alors que le RQD converge rapidement vers 100 %. Le CQD est donc un indice plus précis que le RQD dans le cas d'un ouvrage en béton présentant un réseau de fissures espacées de plus de 100 mm.

4. CONCLUSION

De nombreuses études de cas portant sur l'évaluation de l'état des ouvrages hydrauliques, tels que les barrages en béton, ont confirmé que l'analyse des ondes ultrasoniques est bien adaptée pour évaluer l'état d'endommagement des bétons. Les résultats généralement présentés sous forme de variations de vitesse, permettent de localiser facilement l'emplacement des désordres au cœur d'une même structure, mais ne permettent pas de comparer les caractéristiques d'un ouvrage par rapport à un autre. En effet, les caractéristiques du béton ne sont pas les mêmes pour tous les ouvrages et ces propriétés influencent les vitesses ultrasoniques mesurées à travers

l'ouvrage. Par ailleurs, le RQD reflète bien l'état d'endommagement des bétons puisque cet indice est basé sur l'analyse de la fracturation du matériau mais lorsque le réseau de fracture n'est pas dense, cet indice n'est pas précis. De plus le RQD est établi à partir d'échantillons ponctuels qui s'avèrent rarement représentatifs de l'ensemble de l'ouvrage.

L'utilisation de l'indice CQD (Concrete Quality Designation), développé initialement pour les ouvrages hydrauliques est bénéfique, puisque cet indice donne des informations complémentaires à celles obtenues par l'indice RQD et par tous autres critères ou analyses ponctuelles réalisées sur un ouvrage. D'autre part, le CQD est indépendant des paramètres de mélange du béton et présente une sensibilité accrue lorsque ce matériau est très légèrement ou très fortement endommagé [6 et 7]. De plus, le CQD est basé sur l'analyse des vitesses ultrasoniques et présente donc les mêmes avantages que les méthodes d'imagerie non destructive, car il permet d'effectuer une cartographie d'endommagement et d'ajuster le modèle de stabilité associé aux structures à l'étude.

Les ouvrages structuraux, tels que les piles de ponts, sont bien souvent moins endommagés que les ouvrages hydrauliques. Cependant, l'évaluation de l'état de ces bétons structuraux se heurte aux mêmes problématiques que celles décrites précédemment, à savoir :

- La nécessité d'obtenir une cartographie d'endommagement au lieu de mesures ponctuelles;
- Le besoin d'obtenir un critère de qualité de béton qui ne soit pas influencé par les variations de propriété des bétons entre deux ouvrages;
- Le besoin de caractériser, in situ, un béton qui ne soit pas forcément très endommagé.

C'est donc pour toutes ces raisons que nous avons été amenés à utiliser l'indice CQD dans le cadre de l'étude d'une des piles du pont Jacques-Cartier situé à Montréal.

Les essais destructifs réalisés sur la partie supérieure de la pile 17 de ce pont, avaient montré que le béton de cette partie de l'ouvrage était fortement fissuré et les indices CQD mesurés sur le reste de la pile ont indiqué que la qualité du béton était plutôt qualifiée de bonne à excellente. Ces résultats démontrent donc que l'état du béton observé dans la partie supérieure de la pile n'est pas représentatif de son état global.

D'autre part, la comparaison entre les indices CQD et RQD mesurés sur une carotte prélevée dans la pile 17, confirme que l'indice CQD est plus précise que celui du RQD et en particulier lorsqu'un réseau de fissures espacées de plus de 100 mm est présent au cœur même du béton de l'ouvrage structural. Ces résultats montrent que la mesure de la qualité du béton, selon l'indice CQD, peut être appliquée aux ouvrages structuraux tels que les ponts et que cette approche est intéressante car elle permet d'estimer la qualité du béton quelque soit son degré d'endommagement.

D'autres études ont aussi démontré que la technique du CQD permet d'estimer la qualité du béton indépendamment des caractéristiques du mélange initiale de ce dernier [6 et 7].

Enfin, l'auscultation des ouvrages d'art en béton, basée sur les méthodes ultrasoniques et le CQD, permet d'évaluer rapidement et de manière approfondie l'état d'endommagement des bétons des ouvrages vieillissants et pour lesquels une évaluation de leur état est requise.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe du GRAI de l'Université de Sherbrooke pour son soutien technique. Nous tenons aussi à remercier *Les Ponts Jacques-Cartier et Champlain Incorporée*.

RÉFÉRENCES

- [1] Gouvernement du Québec, Plan de redressement de l'état du réseau routier, *Communication MTQ* du 24 février 2012
- [2] Deere, D.U., Hendron Jr. A.J., Patton F.D. & Cording E.J., Design of Surface and Near Surface Construction in Rock. Failure and Breakage of rock, C. Fairhurst (ed.), Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mechanics, AIME, New York, p. 237 -302, 1967
- [3] Deere, D.U.& Deere, D.W., The Rock Quality Designation (RQD) index in practice. Rock Classification Systems for Engineering Purposes, L. Kirkaldie (ed.), ASTM Special Technical Publications 984, Philadelphia, p. 91 - 101, 1988
- [4] Feldman, R.F., Non-Destructive Testing of Concrete, *CBD-187, National Research Council of Canada*, Ottawa, Ontario, Available from <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/cbd/building-digest-187.html> [accessed February, 2010], 1977
- [5] Leslie, J.R., and Cheeseman, W.J., An ultrasonic method for studying deterioration and cracking in concrete structures, *American Concrete Institute journal*, September 1949, Vol. 46, p. 17-36 ,1949
- [6] Saint-Pierre F. et Philibert A., Dam Safety Review : New Concrete Quality Designation Based on Ultrasonic Pulse Velocity, *Congrès annuel 2011 de l'Association Canadienne de Barrages*, Fredericton, Nouveau Brunswick, 9 pages, Octobre 2011
- [7] Saint-Pierre F. and Philibert A., Concrete Quality Designation for Dams Based on Ultrasonic Pulse Velocity Measurement, 24^e *Congrès des Grand Barrages, Commission Internationale des Grands Barrages*, Kyoto, Japon, 15 pages, juin 2012
- [8] Garnier, V., Chaix, J.F., Corneloup, G., Caractérisation non destructive du béton par l'analyse d'ondes ultrasonores, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, Vol. 239, p. 105-118. 2002
- [9] Le Pont Jacques-Cartier - Historique, *Les Ponts Jacques-Cartier et Champlain Incorporée*, consulté en ligne le 15 avril 2012 (www.pjcci.ca)
- [10] ASTM C1383 Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, *Norme ASTM*, p. 9, 2004
- [11] ASTM C597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, *Norme ASTM*, p. 4, 2009