

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF DES OUVRAGES EN BETON « EVALUATION DE LA RESISTANCE DU BETON A LA COMPRESSION SUR SITE : APPLICATION DE LA METHODE COMBINEE »

S. HANNACHI, M.N. GUETTACHE

Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri Constantine - Algérie

Reçu le 13 Juillet 2010 – Accepté le 04 Décembre 2011

Résumé

L'essai au scléromètre et l'essai sonique (méthode combinée) sont utilisés très souvent pour l'évaluation de la qualité du béton et l'estimation de sa résistance à la compression. Etant donné la variabilité des paramètres influençant cette propriété du béton ; comme le type et les dimensions des agrégats, le dosage en ciment, la mise en œuvre du béton les résultats des deux essais non destructifs doivent être calibrés avec les résultats issus des essais mécaniques sur des éprouvettes cylindriques coulées sur chantier et sur des carottes prélevées sur l'ouvrage en cours de réalisation à la nouvelle ville Massinissa El-khroub, Constantine.

Dans cette étude, la méthode combinée (scléromètre+ultrasons) est utilisée, des équations sont dérivées à l'aide de l'analyse statistique (régression simple et multiple) pour l'estimation de la résistance à la compression du béton sur site et la fiabilité de la technique est discutée.

Mots clés : *Contrôle non destructif, scléromètre+ultrason, méthode combinée, résistance à la compression, éprouvette, carotte, régressions*

Abstract

Nondestructive tests; rebound hammer and ultrasonic pulse velocity are very common and usually used in evaluating concrete strength. Because of the variability of many parameters of concrete such as the effect of aggregate's type, different placing method, etc these tests should be calibrated with the results of compression strength of specimens and cores.

In this study the combined method is used, equations are derived by regression analysis in order to study the reliability in evaluating the compressive strength on site.

Key words: *Nondestructif test – rebound hammer and ultrasonic pulse velocity, combined method, compressive strength, specimen samples, cores, regression analysis*

التجربة بالسكليرومتر والتجربة الصوتية (الطريقة المركبة) تستعمل دوما من أجل تقييم نوعية الخرسانة وتقدير مقاومتها للضغط. تغيرات لمؤثرة على هذه الخاصية، مثل نوع وأبعاد الحصى وكمية الإسمنت وطريقة وضع الخرسانة.

إن نتائج التجربتين الغير هدامة يجب أن تتوافق مع النتائج المستخلصة من التجارب الميكانيكية للعينات الأسطوانية المصبوبة في الورشة والعينات بنة الجديدة ماسنيسا الخروب قسنطينة

في هذه الدراسة فإن الطريقة المركبة (سكليرومتر + فوق الصوتية) قد استعملت ومعادلات قد اشتقت بواسطة التحليل الإحصائي (تناقص بسيط) من أجل تقييم مقاومة الخرسانة في الموقع ومناقشة فعالية التقنية

الكلمات المفتاحية : *المراقبة غير هدامة ، سكليرومتر ، فوق صوتية ، الطريقة المركبة ، مقاومة الضغط ، عينة ، تناقص.*

L'évaluation des propriétés du béton est du plus grand intérêt, qu'il s'agisse de détecter des zones endommagées et altérées ou que l'on souhaite contrôler la qualité du béton et estimer sa résistance à la compression [1].

Les méthodes normalisées utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les structures en béton ne permettent de prendre en compte que des essais destructifs sur des éprouvettes coulées en même moment ou sur des carottes prélevées de l'ouvrage.

L'inconvénient est que les résultats ne sont pas connus immédiatement, le nombre insuffisant des éprouvettes ou des prélèvements, pour une raison économique, ne reflète toujours pas la réalité de la structure [2].

Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point ; ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives.

1. EVALUATION DES OUVRAGES EN BETON PAR LA METHODE NON DESTRUCTIVE

Toutes les méthodes disponibles pour l'évaluation in situ du béton sont limitées, leur fiabilité est souvent remise en question, la combinaison de deux ou plusieurs techniques se profile comme une réponse à toutes les difficultés [3].

La combinaison de plusieurs techniques du contrôle non destructif est souvent mise en œuvre de façon empirique ; combiner deux techniques sert le plus souvent à renforcer la fiabilité de l'estimation de la résistance à la compression du béton, le principe repose sur des corrélations entre les mesures observées et la propriété recherchée [4].

La résistance à la compression du béton est généralement la propriété la plus recherchée d'où le développement d'une méthode qui combine l'indice sclérométrique et la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique UPV [5].

L'objectif des essais combinés est l'évaluation de la résistance à la compression du béton in situ ; l'approche est généralement de développer une relation de corrélation entre la vitesse de propagation de l'onde, l'indice sclérométrique et la résistance à la compression des éprouvettes cubiques standardisés de laboratoire, dans certains cas ceci n'est pas possible, alors des carottes doivent être prélevées pour établir cette relation [6].

La méthode combinée standardisée, la plus utilisée est la méthode SonReb développée par la RILEM (rilem comité TC43) [7], créée en Roumanie et développée en Australie, puis en Europe ; l'amélioration de la fiabilité des mesures est expliquée par la prise en compte de l'effet contradictoire des facteurs de variabilité de certaines propriétés pour chacune des deux techniques (scléromètre et ultrasons).

1.1. Essai au scléromètre EN 12504-2 (indice de rebondissement)

L'essai au scléromètre est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton, et il existe une corrélation empirique entre la résistance et l'indice sclérométrique. Il convient aux essais au laboratoire comme aux essais sur chantier. Une masse commandée par un ressort se déplace sur un plongeur dans un tube de protection. La masse est projetée contre la surface du béton par le ressort, et l'indice sclérométrique est mesuré sur une échelle. La surface sur laquelle l'essai est effectué peut être horizontale, verticale ou à tout autre angle, mais la corrélation devra prendre en compte l'inclinaison de l'appareil par rapport à cette surface.

Limites et avantages : Le scléromètre est une méthode peu coûteuse, simple et rapide pour connaître la résistance du béton, mais une précision entre ± 15 et $\pm 20\%$ n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure et à des essais ou les conditions d'étalonnage ont été établies. Les résultats sont influencés par des facteurs tels que la régularité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type du ciment, la taille du plus gros granulats et le degré de carbonatation de la surface [7].

1.2 Essai aux ultrasons (UPV) EN 12504-4

La méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation des ultrasons traversant le béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur. Les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes au laboratoire ou sur des ouvrages. De nombreux facteurs influent sur les résultats ; la surface et la maturité du béton, la distance de parcours de l'onde, la présence d'armatures [8].

Limites et avantages : Les ultrasons sont une méthode simple et relativement peu coûteuse pour déterminer l'homogénéité d'un béton. Elle peut être utilisée dans le cadre d'un suivi de contrôle de qualité de la production qu'en auscultation d'ouvrage altéré. Cependant elle nécessite un étalonnage rigoureux, les corrélations sont souvent délicates [9].

2. PRELEVEMENT DE CAROTTES IN SITU EN 12504-1

Certains essais destinés à analyser les modifications des propriétés du béton, ne peuvent être réalisés in situ. En conséquence, il convient de prélever des échantillons et de les apporter dans un laboratoire. Le carottage ne doit pas porter atteinte à la stabilité ou à la résistance structurelle de l'ouvrage ; les armatures devront être repérées avant le carottage, pour éviter autant que faire se peut de récupérer des éprouvettes de béton avec des armatures. Le stockage des carottes est conforme à la norme EN12504-1 (les carottes doivent être protégées et mises dans un sac plastique fermé à chacune des extrémités. Pour des essais mécaniques, le diamètre doit être égal au moins à 3D (D=dimension du plus gros granulats), un élanement de l'éprouvette de 2 est souhaitable [10].

3. METHODOLOGIE DES ESSAIS

Dans cette étude les données du contrôle destructif et du contrôle non destructif sont fournis par le laboratoire CTC-est Constantine (organisme algérien de contrôle) pour le suivi et contrôle de qualité d'un ouvrage en cours de réalisation en béton armé (portiques-voiles), chantier 700 logements Massinissa Elkhroub Constantine.

L'objectif de ce travail est d'étudier la fiabilité de ces techniques non destructives et de déterminer les facteurs qui affectent l'interprétation de leurs résultats.

L'interprétation des résultats se fait par une combinaison de corrélations entre les techniques non destructives et les valeurs obtenues des essais mécaniques.

- Corrélations entre les résistances à 28 jours des éprouvettes (16/32) coulées sur chantier pour un béton dosé à 350 kg/m³ et conservées à l'air et les mesures du contrôle non destructif en occurrence le scléromètre et les ultrasons
- Corrélations entre les résistances des carottes prélevées sur l'ouvrage en cours de réalisation. (La partie des prélèvements : poteaux 1^{er} étage et 3^{ème} étage, le nombre de carottes est de 6, avec un diamètre de 6.5 cm et une hauteur de 13cm.

Les éprouvettes et les carottes sont nettoyées et soumises à l'essai mécanique ; les résistances à la compression sont corrigées pour valoir celles des cubes 20×20 cm pour pouvoir ensuite les associer aux mesures obtenues des essais au scléromètre et aux ultrasons effectués sur les parties de prélèvement des éprouvettes et des carottes. Les résultats sont portés sur les deux tableaux 1 et 2.

Tableau 1 : Données des essais pour les éprouvettes.

Niveau	élément	Indice N	V (upv) m/s	Résistance-épreuve MPa
RDC	Poteau	29	3980	34,5
RDC	Poteau	30	4100	34,0
RDC	Poteau	26	3870	34,0
RDC	Poteau	28	3950	36,0
RDC	Poutre	30	4180	36,0
RDC	Poutre	30	4090	33,0
1 ^{er} étage	Poteau	22	3730	37,0
1 ^{er} étage	Poteau	27	3890	35,5
1 ^{er} étage	Poteau	26	3850	34,0
2 ^e étage	Poteau	23	3780	38,5
2 ^e étage	Poteau	26	3810	37,5
2 ^e étage	Poteau	26	3800	36,5
3 ^e étage	Poteau	22	3720	35,0
3 ^e étage	Poteau	22	3710	37,0
3 ^e étage	Poteau	23	3780	36,0
3 ^e étage	Poutre	30	4130	25,5
3 ^e étage	Poutre	30	4190	27,0
3 ^e étage	Poutre	30	4160	26,5

Tableau 2 : Données des essais pour les carottes.

Niveau	élément	Indice N	V (upv) m/s	Résistance-épreuve MPa
RDC	Poteau	26	3860	13,0
RDC	Poteau	25	3830	12,5
RDC	Poteau	27	3890	14,6
RDC	Poteau	28	3920	15,8
RDC	Poutre	24	3790	12,7
RDC	Poutre	26	3870	13,5
1 ^{er} étage	Poteau	27	3890	9,2
1 ^{er} étage	Poteau	22	3730	9,6
1 ^{er} étage	Poteau	26	3850	14,7
2 ^e étage	Poteau	24	3780	16,5
2 ^e étage	Poteau	25	3840	17,6
2 ^e étage	Poteau	26	3890	13,0
3 ^e étage	Poteau	23	3780	12,5
3 ^e étage	Poteau	25	3710	12,4
3 ^e étage	Poteau	24	3720	11,8
3 ^e étage	Poutre	27	3900	13,0
3 ^e étage	Poutre	28	3930	15,2
3 ^e étage	Poutre	28	3940	13,7

4. METHODE COMBINEE

La combinaison du scléromètre (Schmidt rebound hammer) et des ultrasons (ultrasonic pulse velocity) résulte dans l'amélioration de la précision de l'estimation de la résistance à la compression du béton, particulièrement la méthode Son Reb qui a été développée par la RILEM [7],[10]et [11], après avoir été largement adoptée et diffusée avec l'objectif de déterminer une résistance à la compression du béton potentiellement fiable [12].

L'intérêt dans l'utilisation de la technique Son Reb est que la variabilité de certaines propriétés du béton produit des effets opposés pour chacun de ses composants (scléromètre et upv). Par exemple une augmentation dans l'humidité augmente la valeur des ultrasons mais diminue la valeur de l'indice sclérométrique et donc l'utilisation de la Son Reb réduit les effets des :

- Dimension des agrégats
- Type et dosage du ciment
- Rapport eau /ciment
- Pourcentage de l'humidité

Dans la littérature scientifique [13], plusieurs expressions pour déterminer la résistance à la compression par la méthode combinée sont disponibles (tableau 3).

5. ANALYSE STATISTIQUE

Toutes les recherches ont démontré que les propriétés pétrographiques des granulats ainsi que la composition et les moyens de mise en œuvre du béton influencent considérablement les valeurs de l'indice sclérométrique et des ultrasons.

Tableau 3 : Equations pour déterminer la relation entre la résistance à la compression du béton (l'indice de rebondissement R et la vitesse ultrasonique V)[13]

N°	Equations	Explications	Reference	RMSE
Single-variable equations				
1	$fc = 21.575 \times L - 72.276$	fc [MPa], L[cm]	NDT Windsor Sys. Inc.(1994)	3.7813
2	$Fc = 1.2 \times 10^{-5} \times V^{1.7447}$	fc [MPa], V[km/s]	Kheder 1 (1998)	6.0974
3	$fc = 0.4030 \times R^{1.2083}$	fc [MPa]	Kheder 2 (1998)	2.1651
4	$fc = 36.72 \times V - 129.077$	fc [MPa], V[km/s]	Quasrawi 1 (2000)	3.6981
5	$fc = 1.353 \times R - 17.393$	fc [MPa]	Quasrawi 1 (2000)	2.8152
6	$fc = -5333 + 5385 \times Lfc$ [MPa], L[in]		Malhotra et al.	2.2128
Multi-variable equations				
7	$fc = -568 + 0.000635 \times R^3 + 8.397V$	fc [MPa], V[km/s]	Bellander (1979)	2.212825
8	$fc = -24.668 + 1.427 \times R + 0.0294V^4$	fc [MPa], V[km/s]	Meyninket al. (1979)	7.0654
9	$fc = 0.745 \times R + 0.951 \times V - 0.544$	fc [MPa], V[m/s]	Tanigawa et al.	2.1000
10	$fc = [R / (18.6 + 0.019 \times R + 0.515 \times V)]$	fc [kg/cm ²], V[km/s]	Postacioglu (1985)	3.7617
11	$fc = 18.6 \times e^{0.019 \times R + 0.515V}$	fc kg/cm ² , V[km/s]	Arioglu et al. (1991)	[2.9205
12	$fc = 10^{3.119 \sqrt{\log R} \times V + 5.890}$	fc [kg/cm ²], V[km/s]	Arioglu et al. (1994)	4.2305
13	$fc = -39.570 + 1.532 \times R + 5.0.614 \times V$	fc [kg/cm ²], V[km/s]	Raymar et al. (1996)	7.5910
14	$fc = 0.00153 \times (R^3 \times V^4)^{0.611}$	fc [kg/cm ²], V[km/s]	Arioglu et al. (1996)	11.1623
15	$fc = 0.0158 \times V^{0.4254} \times R^{1.1171}$	fc [kg/cm ²], V[km/s]	Kheder 3 (1998)	2.1375

Pour pallier à des résultats erronés et améliorer la fiabilité de l'estimation de la résistance à la compression par le contrôle non destructif, il est indispensable de calibrer les valeurs des mesures issues des deux essais (scléromètre+ultrasons).

L'analyse statistique semble être le moyen incontournable pour interpréter les données observées ; l'utilisation des résultats des essais mécaniques suréprouvettes et carottes est nécessaire pour pouvoir calibrer ces essais. Dans cette étude ; des relations de corrélation entre les résultats des essais mécaniques des éprouvettes et des carottes et celles issues du contrôle non destructif (scléromètre et ultrasons) sont établies, les valeurs sont plotées dans des graphes, Matlab est utilisé pour extraire les courbes de tendance (courbe de régression) et les coefficients de détermination R² sont déterminés pour chaque courbe de régression.

La régression linéaire simple est adoptée pour les corrélations :

- Résistance R (variable dépendante) –vs- l'indice sclérométrique N (variable indépendante) figure 1et 4.

- Résistance R (variable dépendante) –vs- la vitesse ultrasonique V (variable indépendante) figure 2 et 5.

La régression linéaire multiple est adoptée pour les corrélations

- Résistance R (variable dépendante) –vs- l'indice sclérométrique N et vitesse ultrasonique V (variables indépendantes) figure 3 et 6.

Les résultats des corrélations sont résumés dans les tableaux 5 et 6.

En parallèle de l'analyse statistique; d'autres procédures sont nécessaires pour analyser les résultats des corrélations ; des normes et des spécifications sont développées, aucune n'a obtenu le consensus tant espéré [14].

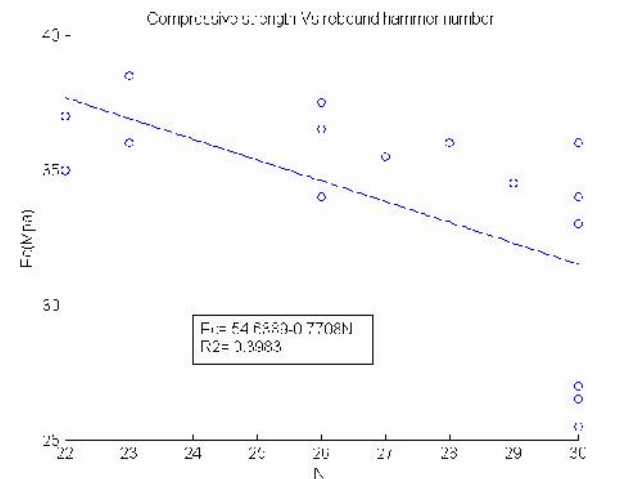


Figure 1 : Corrélation entre indice scléromètre et résistance compression éprouvettes

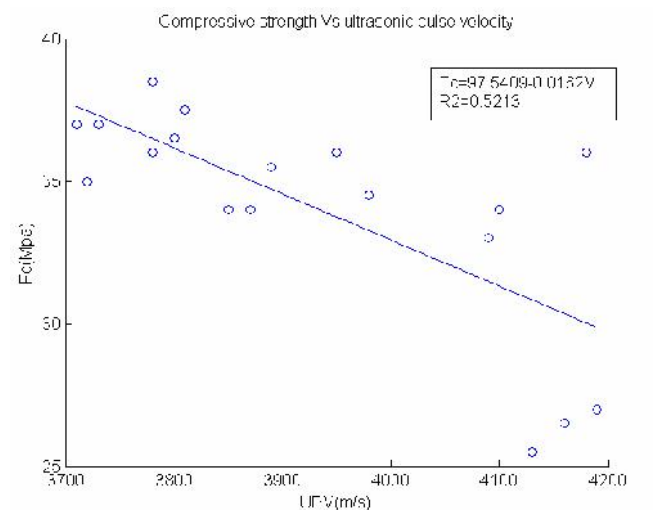


Figure 2 : Corrélation entre vitesse ultrasonique et résistance compression éprouvettes

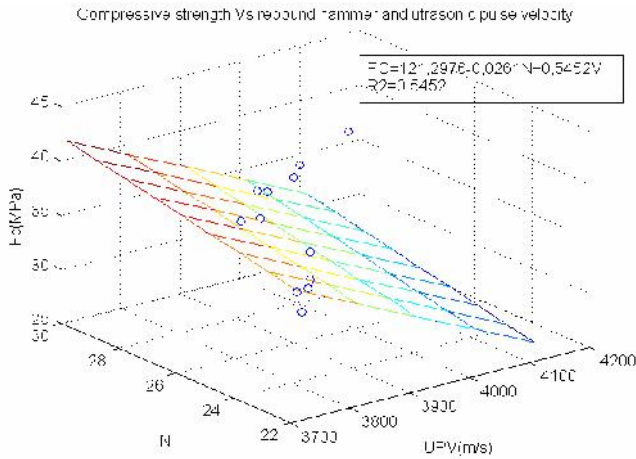


Figure 3 : Corrélation entre vitesse ultrasonique, indice scléromètre et résistance de compression éprouvettes

Tableau 4 : Résultats des régressions - éprouvette

Equations de corrélations et coefficient de détermination des régressions-résistance compression éprouvettes		
Indice scleromètre N	$F_c = -0.7708N + 54.6389$	$R^2 = 0.3983$
Vitesse ultrasonique V	$F_c = -0.0162V + 97.54095$	$R^2 = 0.5213$
Methode combinée	$F_c = 0.5752V - 0.0261N + 121.2976$	$R^2 = 0.5452$

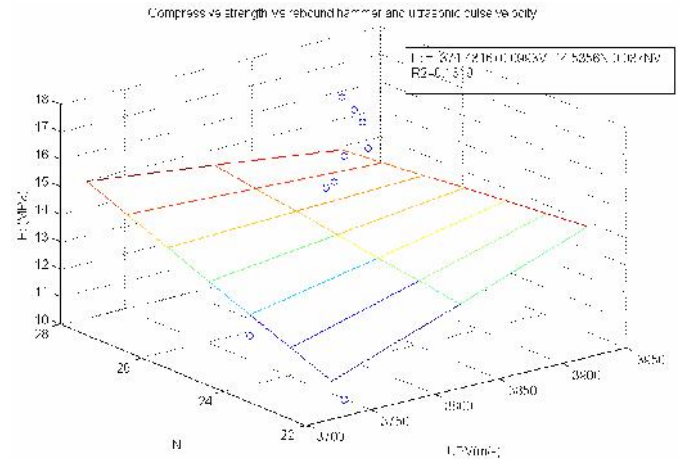


Figure 6 : Corrélation entre vitesse ultrasonique, indice scléromètre et résistance de compression carottes

Tableau 5 : Résultats des régressions - carotte

Equations de corrélations et coefficient de détermination des régressions-résistance compression carottes		
Indice scleromètre N	$F_c = 0.3218N + 5.3290$	$R^2 = 0.0864$
Vitesse ultrasonique V	$F_c = 0.0088V - 20.2771$	$R^2 = 0.0901$
Methode combinée	$F_c = 0.0993V + 14.5356N - 0.0037NV - 371.4$	$R^2 = 0.1251$

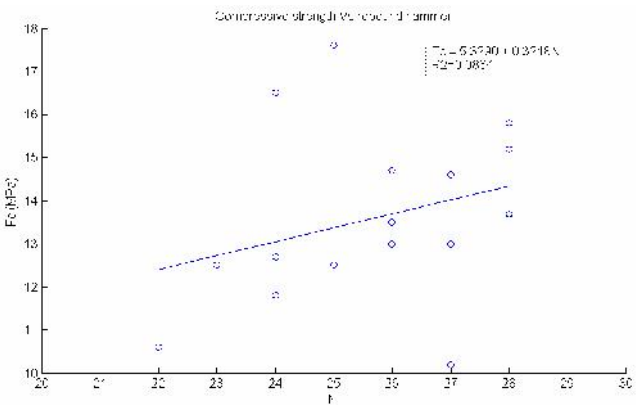


Figure 4 : Corrélation entre indice scléromètre et résistance compression carottes

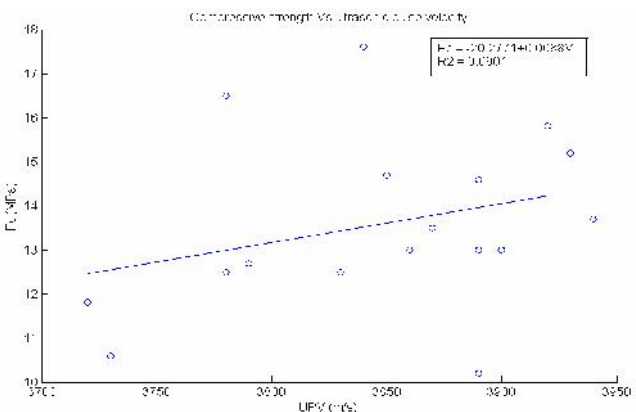


Figure 5 : Corrélation entre vitesse ultrasonore et résistance compression carottes

CONCLUSION ET DISCUSSION

En se basant sur cette étude, il apparaît que l'utilisation de plus d'une technique non destructive donne une meilleure corrélation et en ce sens contribue à rendre l'évaluation de la résistance du béton plus fiable.

La méthode combinée (scléromètre + ultrasons) semble donc plus prometteuse pour l'évaluation de la résistance à la compression du béton en chantier. Il sera par ailleurs remarqué que les corrélations entre les essais destructifs et les techniques non destructives dans notre étude donnent des résultats plus probants pour les éprouvettes coulées et conservés dans les mêmes conditions que le béton de l'ouvrage.

L'analyse concernant les carottes donnent des corrélations qui ne sont pas vraiment satisfaisantes, ceci s'explique par :

- La qualité et moyens de mise en œuvre du béton qui laissent souvent à désirer ; en ce qui concerne des programmes de logements sociaux attribués souvent à des petites entreprises sans grands moyens.
- Les lieux de prélèvement ne représentent pas réellement l'ensemble du béton, car le plus souvent effectués au hasard ; car difficilement réalisables.

Néanmoins l'application en chantier de telles méthodes non destructives pourra nous renseigner sur la qualité du béton et il sera préférable pour un bon suivi de qualité-contrôle du béton d'établir des corrélations entre des essais mécaniques sur des éprouvettes coulées et conservées dans

les mêmes conditions que le béton de l'ouvrage plutôt que de recourir à des carottages qui sont très difficiles à réaliser moins représentatifs et plus coûteux.

En général la méthode combinée apparaît plus adaptée aux conditions de mesures sur site ; très pratique, rapide et avec un coût raisonnable. Une fois que des corrélations sont établies entre les valeurs des résistances des éprouvettes (au nombre suffisant) issues des essais mécaniques et les mesures issues des techniques non destructives en occurrence le scléromètre et les ultrasons, l'évaluation de la résistance du béton apparaît donc plus fiable. Son utilisation pratique gagne une reconnaissance à grande échelle, elle met à la disposition des maîtres d'ouvrages des informations précises et objectives pour le suivi qualité-contrôle du béton sur chantier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [1] Denys Breysse. Quality of NDT Measurements and Accuracy of Physical Properties concrete NDTCE'09, 2009.
- [2] International atomic energy agency. Guide book for the fabrication of non destructive testing training course series no. 13. 2001.
- [3] Hobbs B, Tchoketch K Non destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings. Forensic Sci. Int., 167(2-3): 167-172. 2007.
- [4] Bungey, J.H. & Millard, S.G., 1996, *Testing of Concrete in Structures*, 3rd edn. Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall. 1996.
- [5] Denys Breysse. Combining information, reliability and maintenance. Diagnosis of NEC works 2008
- [6] Malhotra, V.M. & Carino N.J. (Eds.), 1991, *CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press. 1991.
- [7] Rilem report TC43- CND Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods.
- [8] Lin, Y., Lai, C., Yen, T., 'Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in Concrete', *ACI Materials Journal*, **100**[1], 21- 28. 2003.
- [9] Malhotra, V.M. & Carino N.J. (Eds.), *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press. 1991.
- [10] Komlos, K., Popovics, S., Nurnbergerova, T., Babal, B., Popovics, J.S., 'Ultrasonic Pulse Velocity test of concrete properties as specified in various standard', *Cement and Concrete Composites*, **18**, 357-364. 1996
- [11] Loic Divet, techniques for diagnosing the condition of concrete LCPC Presentation 2005
- [12] Facaoaru, I., 'Non-destructive testing of concrete in Romania, Symposium on NDT of concrete and timber, London: Institute of Civil Engineers, pp. 39-49. 1970.
- [13] Mürsel Erdal, Prediction of the compressive strength of vacuum processed concretes using artificial neural network and regression techniques; scientific Research and Essay Vol.4 (10), pp. 1057- 1065, October 2009.
- [14] Hindo, and Bergstrom, "statistical evaluation of the in-place strength of concrete" international, v.7, N°2, pp 44-48. 1985.