

## Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

# DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT D'UN BÉTON ÂGÉ PAR LES TECHNIQUES DE CND

## DIAGNOSIS OF THE STATE OF AN OLD CONCRETE BY NDT TECHNIQUES

**K. GADRI<sup>(a\*)</sup>, A. GUETTALA<sup>(a)</sup>, L. ZEGHEICHI<sup>(b)</sup>**

a. Laboratoire de Recherche en Génie Civil « LRGC » Université de Biskra. Algérie

b. Université de M'sila. Algérie

\* K.Gadri : gadri\_k@yahoo.fr

### RÉSUMÉ

*Avant chaque réparation il faut mener un diagnostic profond avec des techniques non destructives des éléments en béton à réparer (le substrat) afin de pouvoir choisir le matériau le plus compatible et avoir une réparation durable. Dans notre travail on s'intéresse à déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques (résistance à la compression, module d'élasticité) d'un béton âgé, afin de déterminer ces caractéristiques on a utilisé le scléromètre et aux ultrasons. Nous sommes passés par plusieurs étapes, afin de pouvoir caractériser 10 éprouvettes cylindriques (16x32) cm en béton ordinaire âgé de plus de 2 ans, dont 6 éprouvettes préparées sur chantier et 4 au laboratoire. La résistance à la compression est déterminée par une méthode combinée des deux instruments scléromètre et l'ultra-son, en se basant sur 3 formules mathématiques différentes combinant les approches du scléromètre et US. Le module d'élasticité est calculé selon la vitesse du son, la masse volumique du béton et les règles BAEL 91. Après une analyse et une comparaison des résultats obtenus des différentes valeurs de résistance à la compression, module d'élasticité et la masse volumique, on a remarqué une différence importante entre les valeurs de module d'élasticité obtenus en fonction de vitesse du son par rapport aux modules déterminés par les règles BAEL 91.*

### ABSTRACT

*Before any repair, we must a deep diagnosis with non-destructive techniques, to we can repair a concrete element (the substrate) in order to choose the most compatible material and have a durable repair. In our work we are interested in determining the physical and mechanical characteristics (compressive strength, modulus of elasticity) of an old concrete, these characteristics are determined by using both sclerometer and ultrasounds. We used several steps in order to characterize 10 cylindrical specimens of a (16x32) cm aged over 2 years, where 6 prepared on site and 4 in the laboratory. The compressive strength is determined by a combined method of sclerometer and ultrasounds, based on 3 different mathematical formulas combining sclerometer and U.S. The modulus of elasticity is calculated using the speed of sound, density and BAEL 91 rules. After analyzing and comparing the results obtained from different values of compressive strength, modulus of elasticity and density, it was observed a significant difference between the values of modulus of elasticity calculated from ultrasounds and those determined by BAEL 91 rules.*

**Mots-clés :** Béton, résistance à la compression, scléromètre, module d'élasticité, vitesse de son.

## 1. INTRODUCTION

Parmi les paramètres qui affectent la durabilité d'une réparation c'est la compatibilité du matériau de réparation avec le substrat (le support à réparer). Car la mise en place d'un béton jeune sur un support de béton plus ancien provoque différents types de problèmes, tant physico-chimiques que mécaniques liées à la compatibilité au sens large des deux matériaux en contact [1]. Avant chaque réparation il faut mener un diagnostic détaillé avec des techniques non destructives des éléments en béton à réparer (le substrat) afin de pouvoir choisir un matériau de réparation compatible et avoir une réparation plus durable [2]. Depuis une dizaine d'années se sont développées des actions de recherche pour mieux cerner les mécanismes d'altération du béton armé et les aptitudes des différentes techniques de contrôle non destructif (CND) pour identifier l'état du matériau [3]. Alors l'objectif principal des méthodes non destructives appliquées au béton est de fournir une évaluation correcte de la qualité du matériau dans sa structure même, quels que soient son âge et son état de dégradation, sans avoir à s'en rapporter uniquement aux résultats d'éprouvettes qui ne représentent pas forcément la structure exacte du béton d'ouvrage [4]. Cependant, il est généralement difficile de déduire directement la résistance mécanique des bétons à partir des mesures non destructives avec une précision acceptable [5]. En effet, le résultat est souvent affecté par des erreurs liées à la précision de la mesure, la variabilité du matériau et aux conditions in-situ.

Notre travail consiste à déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques (résistance à la compression, module d'élasticité et densité) d'un béton âgé, en le considérant comme support dans la réparation. Ces caractéristiques sont déterminées par les essais d'auscultation au scléromètre et les ultrasons. Nous sommes passés par plusieurs étapes, afin de pouvoir caractériser 10 éprouvettes cylindriques (16x32) cm en béton ordinaire âgé de plus de 2 ans, dont 6 éprouvettes préparés sur chantier et 04 au laboratoire. La résistance à la compression est déterminée par une méthode combinée des deux instruments scléromètre et l'ultra-son, en se basant sur 3 formules mathématiques différentes combinant les approches du scléromètre et US. Le module d'élasticité est calculé selon la vitesse du son, la densité et les règles BAEL 91.

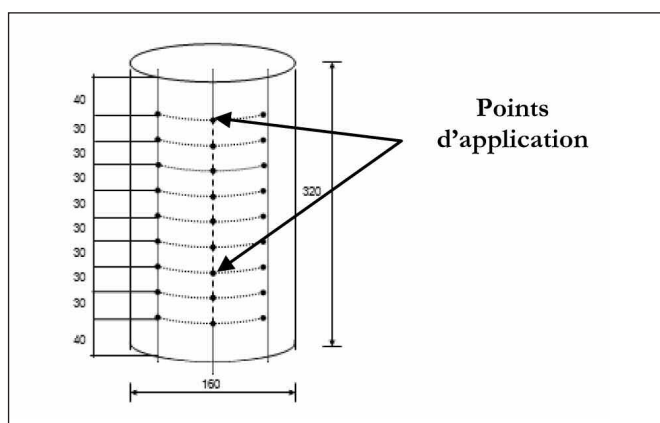


Figure 1 : Quadrillage de l'éprouvette

## 2. STRATÉGIE EXPÉRIMENTALE

Les corps d'épreuve se présentent sous la forme d'éprouvettes cylindriques (16x32) cm en béton ordinaire âgé de plus de deux ans. On dispose de 10 éprouvettes, dont 6 éprouvettes préparées sur chantier et 04 au laboratoire, sur lesquelles on a procédé à un ensemble de mesures CND.

- Essais de dureté par rebondissement (scléromètre).
- Essai d'auscultation sonique : mesures de vitesse d'ultrasons.

Ces essais offrent également la possibilité d'évaluer la qualité d'un béton dans une structure existante âgée.

### 2.1. Estimation de la résistance à la compression

#### 2.1.1. Essai de scléromètre (EN 12504-2)

La résistance  $R_c$  est calculée directement à partir de la valeur moyenne de vingt sept mesures de rebonds appliqués dans un quadrillage (chaque mesure devant être distante de 3cm), figure 1. L'éprouvette est placée entre les plateaux de la presse sous un chargement de 10KN. Le scléromètre est maintenu horizontal pendant l'essai, on peut relier la résistance du béton testé  $R_c$  à l'indice sclérométrique de la manière suivante :

$$R_{c1} = \frac{f^2}{32} \quad [6].$$

On a obtenue les résultats présentés ci-dessous selon le tableau 1.

D'après la figure 2, on peut dire qu'on a obtenue des valeurs approximatives de la résistance caractéristique à la compression à 28jours.

#### 2.1.2. Auscultation sonique (EN 12504-4)

Pour chaque éprouvette cylindrique on a effectué l'essai d'auscultation sonique, afin d'estimer la qualité du béton. Le temps « t » du parcours des ultrasons dans le béton est lu directement sur un écran digital au moment de leur stabilisation. La vitesse est calculée par la formule :

$$V \text{ (km/s)} = \frac{d}{t} ;$$

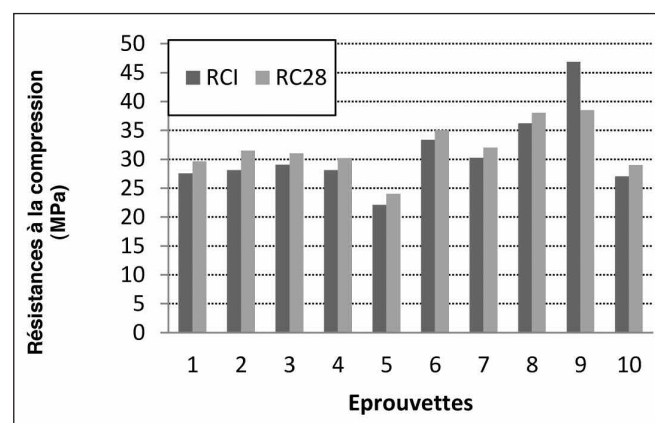


Figure 2 : Résistance à la compression des éprouvettes en fonction d'indice sclérométrique

Eprouvette	01 chantier	02 chantier	03 chantier	04 chantier	05 chantier	06 laboratoire	07 laboratoire	08 laboratoire	09 laboratoire	10 chantier
$RC_{28}$ (MPa)	30	31,5	31	30,2	26	35	32	38	38,5	30
$I_{moy}$	29.7	30	30.5	30	26.6	32.83	31.10	34.05	38.31	29.4
$R_{c1} = \frac{I^2}{22}$	27.56	28.12	29.07	28.12	22.11	33.37	30.22	36.23	46.86	27.01

**Tableau 1 : Valeurs d'indice sclérométrique et résistances correspondantes à la compression**

Les résultats des vitesses de propagation du son mesurées en fonction du temps, sont présentés ci-dessous par le tableau 2.

On a remarqué une faible vitesse de propagation du son dans le béton qui implique une qualité soit douteuse ou mauvaise qui est contradictoire avec les valeurs de résistances à la compression obtenues en fonction de l'indice sclérométrique.

### 2.1.3. Méthode Combiné

On a calculé la résistance à la compression à l'aide de la méthode combinée des deux instruments (scléromètre et ultrason), en utilisant les 3 formules mathématique suivantes [7] :

$$R_{su1} = 0.00082N^2 + 11.03V - 32.7 \quad (1)$$

$$R_{su2} = \left[ \frac{N}{3.64 + 0.023N - 0.56V} \right]^2 \quad (2)$$

$$R_{su3} = 0.028565V^{1.84593} S^{1.24632} \quad (3)$$

Les résultats sont présentés au tableau 3, d'après ces résultats, on a remarqué que les valeurs obtenue par la formule 1 sont les plus proches aux valeurs obtenues par l'indice scléromètre ainsi la résistance caractéristique ( $RC_{28}$ ), alors on a retenue les valeurs de résistances calculées selon la formule 1.

### 2.1.4. Comparaison des résultats

On a calculé le rapport entre les résistances à la compression obtenues par la méthode combinée et les résistances à la compression d'indice sclérométrique, d'où on a constaté une différence de 50%, par contre en les comparant aux valeurs caractéristiques  $RC_{28}$  on a des valeurs approximatives qui se rapprochent de 1, comme il est présenté au tableau 4 et par l'histogramme à la figure 3.

## 2.2. Estimation du module d'élasticité

### 2.2.1. Selon les règles BAEL91

$$E_c = 3700 \sqrt{R_c}$$

Le module d'élasticité  $E_c$  est calculé selon la formule suivante donnée :

$$R_{c1} = R_{c1}; R_{c2} = R_{su1} \text{ (Résistance retenue).}$$

### 2.2.2. Selon la vitesse du son

Pour estimer le module d'élasticité d'un ouvrage âgé en service, les mesures par ultrasons sont recommandées. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans un béton dépend du module d'élasticité du béton et de sa densité.

Eprouvette	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
T (μs)	125	137	107.8	126.5	125.3	130.4	109.4	142	127	140.6
D (cm)	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
V (km/s)	2.56	2.33	2.968	2.529	2.553	2.453	2.934	2.253	2.519	2.275
Etat de résistance	Douteuse	mauvaise	Douteuse	Douteuse	Douteuse	mauvaise	Douteuse	mauvaise	Douteuse	mauvaise

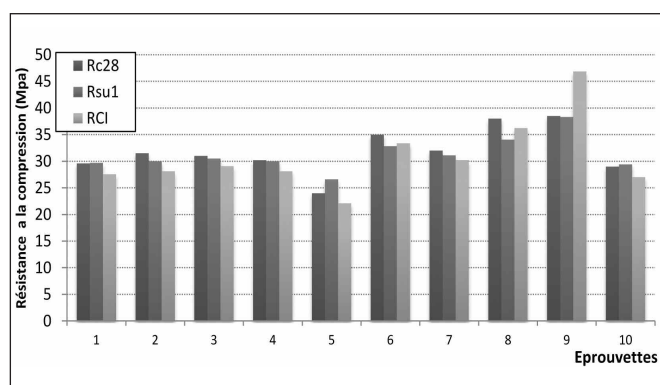
**Tableau 2 : Qualité du béton des supports en fonction de la vitesse du son**

Eprouvette	$R_{su1}$ (MPa)	$R_{su2}$ (MPa)	$R_{su3}$ (MPa)	Résistance retenue (MPa)
01	17.019	47.22	11.41	17.019
02	15.139	48.03	9.141	15.139
03	23.302	49.39	15.061	23.302
04	17.334	48.03	10.980	17.334
05	10.892	39.166	9.617	10.892
06	23.371	55.83	11.956	23.371
07	24.327	51.027	14.58	24.327
08	24.522	59.295	10.38	24.522
09	41.189	70.940	14.22	41.189
10	13.231	46.424	8.806	13.231

**Tableau 3 : Résistances à la compression selon les formules combinées**

Eprouvette	Rc <sub>28</sub> (MPa)	Rc <sub>I</sub> (MPa) (Indice scléromètre)	Rsu <sub>I</sub> (MPa)	R <sub>ci</sub> / Rc <sub>28</sub>	R <sub>SUI</sub> / Rc <sub>I</sub>
01	29,6	27.56	17.5	0,93	0,63
02	31,5	28.12	15.5	0,89	0,55
03	31	29.07	23	0,93	0,79
04	30,2	28.12	17	0,93	0,60
05	24	22.11	11	0,92	0,49
06	35	33.16	23.5	0,94	0,70
07	32	30.70	24.5	0,96	0,79
08	38	36.23	24.5	0,95	0,67
09	38,5	46.50	41.5	1,20	0,89
10	29	27.01	13.5	0,93	0,49

**Tableau 4 : Comparaison des résultats de la résistance à la compression : Rc<sub>indice</sub>, Rsu<sub>I</sub>**



**Figure 3 : Résistance obtenue par vitesse du son, Rc<sub>indice</sub>, Rsu<sub>I</sub>**

Hassan Munzer (1994) [8] à déterminer le module d'élasticité selon la vitesse du son et la masse volumique.

$$E_d = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \gamma V^2$$

Le module d'élasticité dynamique peut être déterminé par l'équation :

Où  $\gamma$  : masse volumique du béton (expérimentale);  $\nu = 0,2$  (coefficient de Poisson),  $V$  : vitesse du son [km/s]

La masse volumique peut être estimée selon l'équation suivante :  $\gamma_v = 1,67 + 0,155 V$ ; [8]

Le module d'élasticité peut être donné en fonction de la constante (K) :  $E_c = K V^2$

Ou :  $E_c = 1,68 V^2$

$E_c$  [GPa] : module d'élasticité statique sécant selon la SIA 162/1

$v$  [km/s] : vitesse du son dans le béton; et K :

$k = 1.68$  pour  $t \geq 180$  jours ;

$k = t^{0.1}$  pour  $t < 180$  jours ;  $t$  : âge du béton en jours

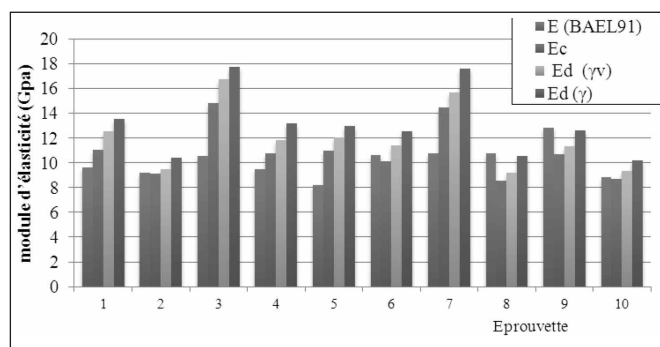
On a essayé de calculer le module d'élasticité selon H. Manzur par les deux formules avec deux valeurs de la masse volumique. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 6 ci-dessous.

Eprouvette	Rc <sub>1</sub> (MPa)	E <sub>C1</sub> (GPa)	Rc <sub>2</sub>	E <sub>C2</sub> (GPa)	E <sub>C1</sub> / E <sub>C2</sub>
1	17.5	9.606	27.56	11.176	0.86
2	15.5	9.225	28.12	11.251	0.82
3	23	10.522	29.07	11.376	0.92
4	17	9.514	28.12	11.251	0.84
5	11	8.229	22.11	10.384	0.79
6	23.5	10.598	33.37	11.912	0.89
7	24.5	10.746	30.22	11.524	0.93
8	24.5	10.746	36.26	12.246	0.87
9	41.5	12.810	46.86	13.339	0.96
10	13.5	8.810	27.01	11.101	0.79

**Tableau 5 : Module d'élasticité selon BAEL 91**

Eprouvette	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_v$ (t/m <sup>3</sup> )	E <sub>c</sub> (GPa)	E <sub>d</sub> (GPa) ( $\gamma_v$ )	E <sub>d</sub> (GPa) ( $\gamma$ )
01	2,299	2,060	11.010	12.533	13.560
02	2,133	2,013	9.120	09.509	10.421
03	2,239	2,115	14.799	16.769	17.751
04	2,289	2,049	10.743	11.795	13.176
05	2,207	2,052	10.948	12.041	12.946
06	2,319	2,043	10.108	11.422	12.55
07	2,275	2,101	14.462	15.678	17.625
08	2,313	2,007	8.527	09.173	10.566
09	2,211	2,042	10.660	11.302	12.626
10	2,229	2,011	8.694	09.367	10.172

**Tableau 6 : Valeur de module d'élasticité en fonction de vitesse du son et masse volumique**



**Figure 4 : Comparaison de différentes valeurs de module d'élasticité**

On voit bien d'après les valeurs de module d'élasticité calculées en fonction de la vitesse du son qu'il y a une différence importante par rapport aux modules déterminés par BAEL, aussi on remarque une variation légère entre les valeurs déterminées en fonction de densité réelle.

### 3. CONCLUSION

Notre objectif dans ce travail était le diagnostic d'un état de béton âgé et l'évaluation non destructive des caractéristiques mécaniques d'une structure en béton en service (ex : support à réparé), après un contrôle non destructif des éprouvettes en béton ordinaire, on a pu conclure ce qui suit :

- L'évaluation du béton nécessite d'appréhender les paramètres qui influencent les procédures et mesures de contrôle.
- L'utilisation de la vitesse ultrasonore ou du rebond comme seule mesure de CND ne permet pas d'évaluer précisément la résistance des bétons.
- La combinaison des essais ultrason et rebond permet de réduire l'incertitude sur l'évaluation de la résistance mécanique.

### RÉFÉRENCES

- [1] K. Gadri, A. Guettala, L. Zeghichi ; "effect of silica fume in concrete sand for repairing", 8<sup>th</sup> international conference: concrete in the low carbon Era, 9-11 july 2012, Dundee, UK.
- [2] K. Gadri, « contribution à l'étude d'un béton de sable avec fibres et résine destine pour la réparation mince des structures » Mémoire de Magister, Université de Biskra (Algérie), juillet 2007
- [3] Balayssac J.P. J.-P., Evaluation de la dégradation du béton d'enrobage et aide au diagnostic et à la réparation des ouvrages, Projet RGC&U, Final report, 2/2005.
- [4] J. Kouassi, Contribution à l'auscultation dynamique des superstructures par les mesures de la célérité et de l'atténuation des ondes planes élastiques-application au béton. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1989.
- [5] N.T Nguyen, Z.M Sbartai, D Breysse, F Bos, « Evaluation non destructive des bétons par combinaison des techniques de CND – apport des probabilités conditionnelles » XXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Chambéry, 6 au 8 juin 2012
- [6] R. Dupain, J.C.Saint-Arroman, « Granulats, Sols, Ciment et bétons » Edition CASTEILLA 2009
- [7] N. Djebri, Evaluation de la qualité du béton in-situ, Mémoire Magister, université de Biskra (Algérie), Mai 2006.
- [8] Munzer Hassan « Critères Découlant D'essais De Charge Pour L'évaluation Du Comportement Des Ponts En Béton Et Pour Le Choix De La Précontrainte » Thèse N° 1296 (1994) Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne
- [9] RILEM, Tests on the concrete by the method of the ultrasonic testing: recommendation of RILEM, Annals of the Technical Institute of the Building and Public Works, Series: Test and Measurements, No. 142, 1973.