

La résistivité électrique : un indicateur de la durabilité des bétons recyclés ?

BOUVET Adrien¹, GOMART Hector², THAI Minh Van³

¹ Laboratoire de mécanique et de matériaux du génie civil L2MGC, 5 Mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise 95031 Cergy-Pontoise cedex – adrien.bouvet@u-cergy.fr

² Laboratoire de mécanique et de matériaux du génie civil L2MGC, 5 Mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise 95031 Cergy-Pontoise cedex – hector.gomart@u-cergy.fr

³ Etudiant en Master 2 Ingénierie du bois, Université de Bordeaux, 3 ter Place de la Victoire 33000 Bordeaux cedex – minh-van.thai@etu.u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ. Des mesures de résistivité électrique uni-fréquentielles, par une « méthode deux points », sont réalisées sur une série de bétons de granulats recyclés où les graviers naturels sont substitués par des graviers recyclés. Ces résultats, comparés aux principaux indicateurs de la durabilité des bétons (porosité et diffusions des ions chlorures), montrent que la résistivité, qui décroît lorsque la porosité augmente, ne permet pas toujours de discriminer clairement les différents bétons. Cette étude est donc étendue à une large gamme de fréquences, afin de déterminer les impédances spectrales des bétons à base de granulats recyclés. Leur comportement est analysé et les résultats permettent alors de distinguer nettement les différents bétons et l'influence des taux de substitution.

ABSTRACT. The one frequency electrical resistivity measurements, using a "two-point method", are carried out on a series of recycled aggregate concretes where the natural gravels are substituted by recycled ones. These results, compared to the main indicators of the durability of concretes (porosity and diffusion of chloride ions), show that the values of resistivity (slightly different from each other) decrease with increasing porosity. This study is then extended to a wide range of frequencies to determine the spectral impedances of recycled aggregate concretes. Their behaviour is analysed and the results make it possible to distinguish clearly the different concretes and the influence of the substitution rates.

MOTS-CLÉS : résistivité électrique, impédance spectrale, bétons de granulats recyclés, indicateurs de durabilité.

KEYWORDS : electrical resistivity, spectral impedance, recycled aggregate concretes, durability indicators.

1. Introduction

La porosité accessible à l'eau et la diffusion des ions chlorures sont les principaux indicateurs de la durée de vie des bétons soumis aux milieux marins et aux sels de deverglaçage [BAR 08], ainsi que de la corrosion des armatures. La résistivité électrique, dans la mesure où elle permet de caractériser la microstructure du béton, est, elle aussi, un paramètre de référence de la durabilité. De plus, cette quantité présente l'intérêt de pouvoir être mesurée *in situ* sur des ouvrages existants (méthodes de « mesures 4 points »). Cependant la disparité des méthodes de mesures (méthodes deux, trois et quatre points, différentes fréquences, etc.), ainsi que le fait que les valeurs de la résistivité ne permettent pas toujours de discriminer avec suffisamment de finesse la microstructure d'un béton [BEL 06], ont poussé les recherches à étendre les mesures de résistivité sur une large gamme de fréquences. La mesure d'impédance spectrale permet alors de tenir du compte du fait que le béton se comporte à la fois comme un système résistif (eau présente dans les pores ouverts) et capacitif (granulats, pâte de ciment, pores fermés, etc.).

Des mesures de résistivité uni-fréquentielles par une « méthode deux points » seront réalisées sur des séries de bétons dont on a substitué une partie ou la totalité des granulats naturels par des granulats recyclés. Ces résultats seront ensuite comparés aux indicateurs principaux de la durabilité des bétons (porosité et profondeur de pénétration des ions chlorures). Enfin, la mesure de la résistivité sera étendue à une étude spectrale de l'impédance, dont on discutera les résultats.

1.1. Matériaux

Les mesures de résistivité ont été réalisées sur un ensemble de bétons à base de granulats recyclés. À partir d’une formulation de référence de granulats naturels BR, de classe de résistance C35/45, une série de bétons a été élaborée en remplaçant les graviers naturels par des recyclés [TAH 16]. Les taux de substitution massiques sont les suivants : 0, 15, 30, 50, 70 et 100%. Les autres constituants (ciment, eau) restent constants. La composition du béton de référence BR est donnée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Composition du béton de référence BR à base de granulats naturels, d’après [TAH 16].

	E/C	Ciment (kg/m ³)	Sable naturel 0/4 (kg/m ³)	Graviers 4/10 (kg/m ³)	Graviers 6,3/20 (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)
BR	0,55	320	852	325	696	176

1.2. Constituants

Le ciment utilisé est un CEM I 52,5R CP2. Les graviers naturels, de deux classes granulaires distinctes (4/10 et 6,3/20), sont des graviers calcaires concassés. Le sable naturel (0/4) est un sable semi-concassé lavé. Les granulats naturels sont remplacés par des graviers recyclés de coupures respectives 4/10 et 10/20, issus d’une plateforme de production. Leurs propriétés physiques, sont données dans la thèse de Tahar [TAH 16]. Il est à noter que les coefficients d’absorption WA₂₄ des granulats recyclés sont environ dix fois supérieurs à ceux des granulats naturels.

1.3. Protocole expérimental

La mesure de la résistivité est réalisée à l’aide d’une « méthode deux points » (les électrodes dans lesquelles le courant est injecté sont communes aux électrodes de mesures), schématisée à la Figure 1(a). Un courant alternatif sinusoïdal de tension 10 V (crête) et de fréquence 5 kHz est appliqué au moyen d’un générateur de fréquence Agilent 33250A. La résistance est mesurée de façon indirecte, à l’aide d’un voltmètre et d’un ampèremètre (multimètres Agilent U3401A). Les valeurs de la tension et de l’intensité sont relevées au bout de 30 secondes, une fois les signaux stabilisés. L’interface entre les électrodes métalliques et l’éprouvette est assurée par des éponges fines (3 mm) saturées en eau (0,127 g.cm⁻²) de même section *S* que les éprouvettes. Le système est surmonté d’une masse constante (4 kg) permettant de garantir un contact optimal entre les éponges et l’éprouvette. Les résistances des éponges du haut (*R_{haut}*) et du bas (*R_{bas}*), en série avec celle de l’éprouvette *R_{béton}*, sont systématiquement évaluées (cf. Figure 1(b) et 1(c)). Finalement, après avoir soustrait *R_{haut}* et *R_{bas}* à la résistance du système, la résistivité ρ du béton (en $\Omega.m$) se calcule d’après la relation suivante :

$$\rho = R_{\text{béton}} \cdot S/l \quad [1]$$

ou *l* est la hauteur de l’éprouvette en m et *S* sa section en m².

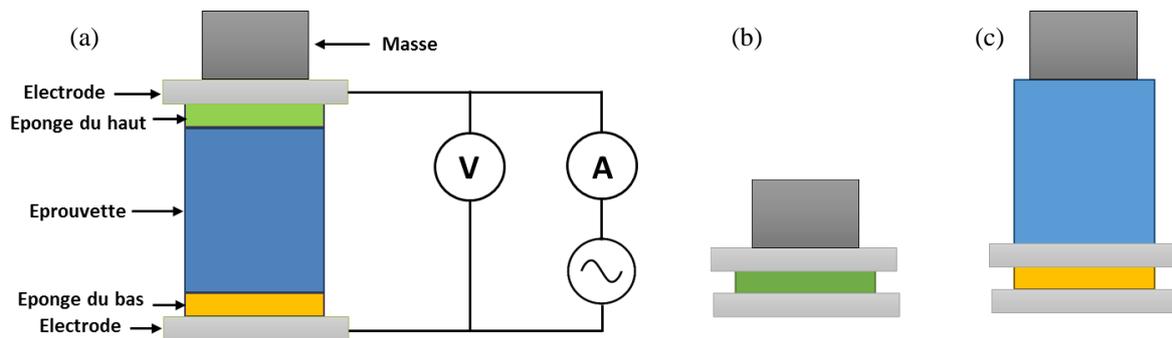


Figure 1. (a) Schéma du montage de « mesure deux points » de la résistivité électrique. Configurations des mesures de la résistance des éponges (b) du haut *R_{haut}* et (c) du bas *R_{bas}*.

Les mesures sont réalisées sur des éprouvettes de béton cylindriques de diamètre $\phi = 120$ mm et de hauteur $h = 22$ cm, saturées en eau. Les mesures de la résistivité sont effectuées sur trois éprouvettes de la même composition ; les valeurs présentées de la résistivité correspondent à la moyenne de ces valeurs.

3. Mesure de la résistivité uni-fréquentielle

Les résultats de la porosité accessible à l'eau, mesurée selon la norme NF P 18-459 par [TAH 16], sont donnés dans le Tableau 2. La porosité du béton de référence BR est égale à 12,5 % et croît linéairement à mesure que l'on substitue les granulats par des granulats recyclés, pour atteindre 16,2% pour une substitution totale des graviers (100%). Les profondeurs de pénétration des ions chlorures mesurées par [TAH 16], selon la norme ASTM C1202-12, sont également reportées dans le Tableau 2. Cette valeur évolue linéairement de 7 mm pour le béton de référence BR, jusqu'à 18 mm.

Tableau 2. Indicateurs de la durabilité des bétons : porosité accessible à l'eau, profondeur de pénétration des ions chlorure x_d (d'après [TAH 16]) et résistivité ρ .

Taux de substitution	0%	15%	30%	50%	70%	100%
Porosité (%)	12,5	12,7	13,1	14,1	15,4	16,2
x_d (mm)	7	8	11	13	15	18
ρ (Ω .m)	59	80	79	72	68	57

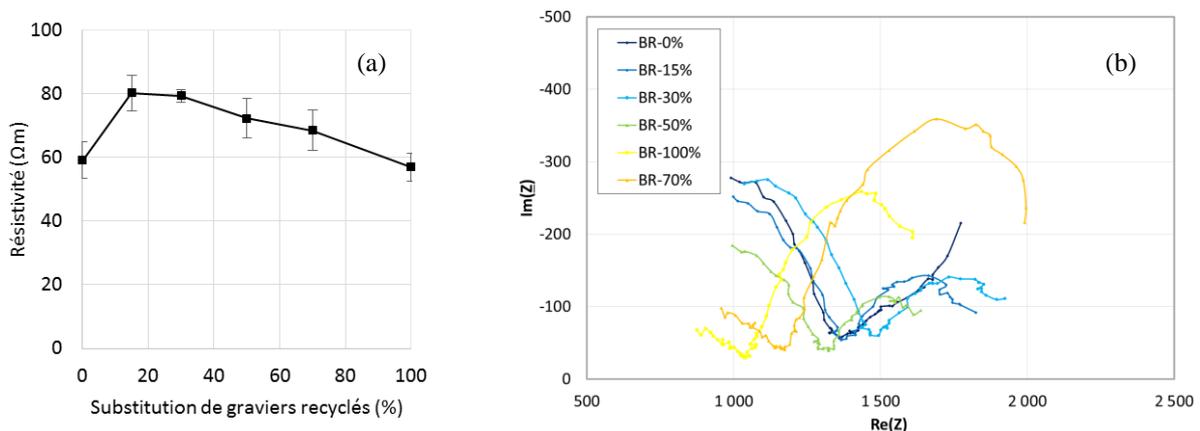


Figure 2. (a) Résistivité électrique uni-fréquentielle du béton de référence et des bétons à base granulats recyclés. (b) Diagramme de Nyquist de l'impédance complexe spectrale (10 Hz – 1,5 MHz) des bétons.

Les mesures de la résistivité électrique ont été effectuées sur l'ensemble des bétons et sont représentées à la Figure 2(a). La résistivité du béton de référence est égale à 59 Ω .m. Ensuite, et contrairement à ce que l'on attendait, la résistivité augmente dès l'introduction de graviers recyclés (15%) pour atteindre la valeur 80 Ω .m. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que la porosité n'est pas le seul facteur influençant la résistivité, mais que la modification de la nature des granulats peut contrebalancer l'effet de la porosité. Enfin, la résistivité décroît à mesure que l'on augmente le taux de substitution des granulats recyclés jusqu'à une valeur de 57 Ω .m. Cette décroissance est en accord avec la loi de puissance régissant le comportement de la résistivité en fonction de la porosité, qui peut être modélisé par la loi d'Archie [ARC 42].

D'après [BAR 08], les valeurs de la résistivité des bétons devraient être comprises entre 50 et 100 Ω .m pour une gamme de porosité (14 - 16%) et 100 à 250 Ω .m pour les porosités (12 - 14%). Pour les bétons recyclés (50% à 100%), *i.e.* des porosités (14 - 16%), nos résultats paraissent en accord avec les travaux de [BAR 08]. Ce qui n'est pas le cas pour les bétons les moins poreux (BR, 15% et 30%). Ce phénomène peut s'expliquer par (i) le choix de la méthode employée (choix de la fréquence) et (ii) par la compétition entre porosité et nature des granulats. Quoi qu'il en soit, la mesure uni-fréquentielle de la résistivité ne permet pas à elle seule de distinguer clairement la microstructure de bétons de compositions peu différentes [BEL 06].

L'étude uni-fréquentielle est étendue à une analyse spectrale de l'impédance électrique des bétons, afin de caractériser plus finement leur microstructure. En effet la réponse électrique du béton saturé en eau varie en fonction de la fréquence f (en Hz). Le système se comporte à la fois comme un système résistif (eau contenue dans les pores) et capacitif (granulats, matrice cimentaire, pores fermés), et peut-être modélisé comme une association de résistances et de condensateurs [MAC 97]. Il est donc nécessaire d'évaluer l'impédance complexe $\bar{Z}(f)$ de l'éprouvette, et donc de mesurer simultanément l'amplitude et le déphasage entre la tension et l'intensité sur toute la gamme de fréquence étudiée. La configuration de la « mesure deux points » est conservée (cf. Figure 1(a)) en remplaçant les multimètres par un oscilloscope 2 voies Tektronix TDS 520. Une résistance R_1 est placée en série du système – éprouvette et éponges –, afin de déterminer de façon indirecte l'intensité du courant. L'impédance complexe du système (éprouvette et éponges) s'exprime selon la relation :

$$\bar{Z}(f) = R_1 \cdot U_2 / U_1 \cdot e^{j\varphi_{wi}} \quad [2]$$

où U_1 et U_2 correspondent aux tensions efficaces aux bornes de la résistance R_1 et de l'ensemble résistance R_1 et système, respectivement, et φ_{wi} au déphasage entre la tension et l'intensité.

Les résultats de l'impédance complexe, représentés sous la forme d'un diagramme de Nyquist (opposé de la partie imaginaire de $\bar{Z}(f)$ en fonction de sa partie réelle) sont reportés à la Figure 2(b), dans la gamme spectrale 10 Hz – 1,5 MHz. Tout d'abord, on observe que la forme de l'impédance est constituée de deux demi-cercles, l'un à basse l'autre à hautes fréquences, caractéristiques de l'association d'une résistance et d'une capacité en parallèle. Ce comportement traduit à la fois le caractère (i) résistif des chemins ouverts de la porosité et (ii) capacitif des pores fermés, mais aussi des granulats et de la matrice cimentaire. L'intersection des deux demi-cercles détermine la résistance caractéristique R_T du système. Elle évolue entre 1358 Ω pour le BR et 1040 Ω pour le béton recyclé à 100%, et permet de distinguer clairement les différents bétons.

5. Conclusions

La résistivité électrique a été mesurée à une fréquence, puis sur dans la gamme spectrale 10 Hz – 1,5 MHz, sur des bétons à base de granulats recyclés dont on a substitué les granulats naturels par des graviers recyclés. Les résultats montrent que :

- La résistivité électrique est influencée par la microstructure (pores), mais aussi par la nature des granulats.
- La mesure de la résistivité électrique uni-fréquentielle ne permet pas de discriminer clairement des bétons de porosités différentes.
- En étendant sa mesure sur une large gamme de fréquences, les impédances spectrales montrent que les bétons ont un comportement résistif (eau contenue dans les pores) et capacitif (granulats et matrice cimentaire, pores fermés).
- Cette technique permet de distinguer nettement le comportement de bétons de différentes porosités, correspondant à différents taux de substitution.

6. Bibliographie

- [ARC 42] ARCHIE, G., « The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics », *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* 146, January 1942, p. 54-62.
- [BAR 08] BAROGHEL-BOUNY, V., Développement d'une approche globale, performantielle et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé) sur la base d'indicateurs de durabilité, Laboratoire central des ponts et chaussées, 2008.
- [BEL 06] BELIN, P., BAROGHEL-BOUNY, V., Détermination du coefficient de diffusion des ions chlorures - Essais de migration sous champ électrique en régime non-stationnaire et mesure de résistivité électrique, *Actes des 2^{èmes} Journées "Durabilité" du réseau des LCP : Durabilité 2006 - Méthodes d'essais et applications*, Paris, 15-16 mai 2006.
- [MAC 97] MACPHEE, D., SINCLAIR, D., CORMACK, S., « Development of an Equivalent Circuit Model for Cement Pastes from Microstructural Considerations », *Journal of American Ceramic Society*, vol. 80, n° 11, 1997, p. 2876-2884.
- [TAH 16] TAHAR Z., Optimisation des caractéristiques rhéologiques, mécaniques et thermiques des bétons à base de granulats recyclés avec différents couples ciment/adjurant, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2016.