

Impédance spectrale de pierres naturelles du patrimoine bâti

Adrien BOUVET¹, Hector GOMART¹, Raed CHALABI¹

¹ CY Cergy Paris Université, L2MGC, 5 Mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise 95031 Cergy-Pontoise cedex

RÉSUMÉ Les propriétés électriques de pierres calcaires, ainsi que d'un grès, issus de carrières françaises sont étudiées dans cet article. Les mesures sont effectuées par impédance spectrale dans une gamme de fréquences 10 Hz – 10 MHz via une méthode « 2 points », sur des pierres saines et saturées en eau. Ces résultats sont corrélés aux paramètres microstructuraux spécifiques à chaque type de pierres : nature de la matrice, porosité totale, distribution porale, répartition de la taille des pores, etc. La résistivité électrique montre une grande sensibilité à la quantité d'eau contenue dans les pores, ainsi qu'au réseau poral, mais aussi à la nature de la matrice. La permittivité électrique est également présentée et discutée en fonction de la teneur en eau.

Mots-clefs Impédance spectrale, pierres, microstructure, résistivité, permittivité

I. INTRODUCTION

Les pierres du patrimoine bâti doivent être finement auscultées afin de prévenir les désordres ou de caractériser les pathologies existantes. En effet ces matériaux peuvent subir des dégradations : (i) mécaniques liées aux phénomènes de gel-dégel (Eslami et al., 2018) ou des hautes températures dans le cas d'incendies (Vigroux et al., 2021), (ii) des attaques chimiques (sels, polluants) et (iii) des contaminations biologiques (algues, lichen, mousses). Ces dommages sont tous provoqués par la présence d'eau dans les pores de la matrice provenant des remontées capillaires, de l'absorption/évaporation, du ruissellement, de l'eau de pluie, etc. Il est donc important de quantifier précisément cette quantité d'eau qui dépend évidemment de la microstructure (porosité totale, répartition/distribution de la taille des pores). Les méthodes électriques sont des outils non destructifs qui permettent de mesurer la teneur en eau dans les pierres (Roberts et Lin, 1997) et sont utilisés dans le domaine de la préservation du patrimoine (Vecchiattini, 2018). Dans cette étude, des mesures d'impédance spectrale ont été réalisées sur différents types de pierres (calcaire et grès) avec une large gamme de porosité (10 – 30%). Ces résultats ont ensuite été confrontés aux paramètres microstructuraux, puis discutés.

II. MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

A. Matériaux

L'étude porte sur 7 pierres provenant de carrières de différentes régions françaises avec des microstructures très différentes. Six d'entre elles sont des pierres calcaires : Massangis (MA), Savonnières (SA), Migné-Auxances (MI), Saint Maximin (MX), Euville (EUV) et Lens (LS). L'analyse par DRX réalisée par (Vigroux et al. 2021) montre qu'elles sont majoritairement composées de calcaires (calcite, voire dolomite) et de quelques pourcents de quartz. La 7^e pierre est un grès des Vosges (GR), constitué de quartz, d'oxyde de fer et de périclase. Les proportions des différentes phases sont indiquées dans le Tableau 1. Les auteurs ont également procédé à des analyses d'images au microscope optique et ont obtenu des tailles moyennes de grains comprises entre 68 μm (MI) et 1337 μm (EUV). Ils ont également mesuré les paramètres microstructuraux suivant : (i) la porosité totale accessible à l'eau sous vide N_T , d'après la norme NF EN 1936, sur 40 échantillons ($\varnothing 4 \times 8$ cm) ; (ii) la porosité à 48h N_{48} , c'est-à-dire la porosité accessible à l'eau à pression atmosphérique p_{atm} , d'après la norme NF B 10-504, sur 40 échantillons ($\varnothing 4 \times 8$ cm) ; (iii) la porosimétrie mercure : répartition et distribution de la taille des pores, sur 3 échantillons (~ 1 cm³). Les résultats de ces études, synthétisés dans le Tableau 1, montrent (i) une grande disparité en termes de microstructure pour les 7 pierres : taille et forme des grains, connectivité des pores, degré de saturation (N_{48}/N_T), distribution porale unimodale et bimodale, etc. ; (ii) on constate également au sein de chaque famille de pierre une variabilité des propriétés microstructurales, qui s'explique par le litage, le lieu et la date d'extraction des blocs de pierres, etc.

Ainsi dans la suite de ce travail, les résultats seront présentés en fonction d'une teneur en eau volumique. Avant chaque essai d'impédance spectrale, cette teneur en eau est recalculée à partir de la masse saturée (surface sèche), de la masse sèche et du volume apparent des éprouvettes.

TABLEAU 1. Minéralogie et propriétés physiques des pierres. D'après (Vigroux et al., 2021).

Pierres	Minéralogie (%) C : calcite, D : dolomite, Q : quartz, OF : oxyde de fer, P : périclase	Taille des grains (μm)	N_T (%) accessible à l'eau (sous-vide)	N_{48} (%) accessible à l'eau (p_{atm})	Distribution unim. : unimodale bim. : bimodale	d_{pic} (μm) diamètre moyen des pores	Pores		
							r_1	r_2	r_3
MA	50,2(C) ; 46,4(D) ; 3,4(Q)	625±392	11,2±0,5	9,3±0,4	unim. (étalée)	0,5	18	59	23
LS	100(C)	300±89	15,4±0,8	13,7±0,9	bim.	0,5 - 1,0	8	89	4
EUV	100(C)	1337±610	17,2±0,4	10,0±0,4	bim.	0,9 - 18,6	0	67	33
MI	100(C)	68±17	26,8±0,8	25,9±0,8	unim.	0,8	6	92	2
MX	86,6(C) ; 13,4(Q)	309±131	29,7±1,2	23,9±0,9	unim. (étalée)	22,4	8	50	43
SA	100(C)	526±180	30,7±1,3	19,2±0,8	bim. (étalée)	0,3 - 12,7	17	69	14
GR	87,6(Q) ; 5,6(OF) ; 6,5(P)	391±94	15,7±2,2	9,7±1,3	unim.	25,7	8	36	57

B. Mesures d'impédance spectrale

Des mesures d'impédance spectrale sont réalisées entre 10 Hz et 10 MHz, grâce à une méthode « 2 points ». Le dispositif expérimental présenté par (Gomart et Bouvet, 2021) est constitué d'un générateur de fonctions d'ondes et d'un oscilloscope. Le courant alternatif sinusoidal, de tension 10 V, est injecté dans les éprouvettes par l'intermédiaire d'électrodes métalliques. Le contact entre les électrodes et l'éprouvette est assuré par des éponges contenant 0,127 g/cm² d'eau potable du robinet qui permettent d'améliorer l'interface. L'ensemble est maintenu par une vis de serrage. Pour chaque fréquence, l'impédance complexe est calculée à partir des tensions et du déphasage, grâce à un montage pont diviseur de tension à l'aide d'une résistance de mesure R_1 , cf. Figure 1a.

Pour chaque pierre, les mesures ont été effectuées sur 2 ou 3 éprouvettes cylindriques ($\varnothing 4 \times 8$ cm) saturées (sous vide) avec de l'eau du robinet et maintenue à $T = 20$ °C sur une durée totale de 3 ans. Les spectres, représentés sous la forme d'un diagramme de Nyquist (Figure 1b), montrent un demi-cercle principal, caractéristique du matériau. Ces spectres sont bien ajustés par un modèle électrique constitué d'une résistance R_T en parallèle d'un élément à phase constante $Z_{EPC} = 1/Q(j\omega)^\alpha$. La résistivité électrique ρ est calculée à partir de R_T et des dimensions de l'éprouvette : $\rho = R_T \times S/l$ où S est la section et l la hauteur. La permittivité relative ϵ est déduite des paramètres Q et α , ainsi que des dimensions de l'éprouvette.

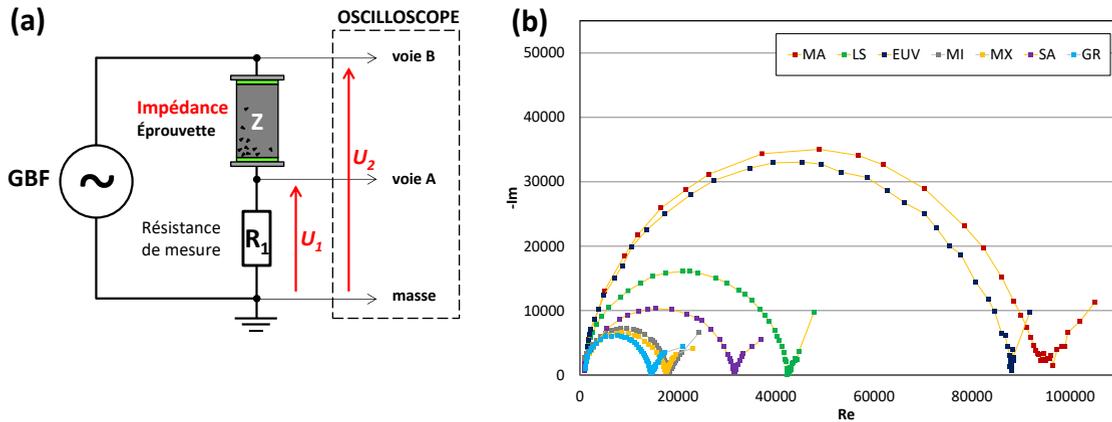


FIGURE 1. (a) Schéma électrique du montage. (b) Diagramme de Nyquist des spectres d'impédance.

III. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

A. Résistivité électrique

La Figure 2a montre l'évolution de la résistivité en fonction de la teneur en eau. La valeur de la résistivité décroît de 2011 $\Omega.m$ pour la pierre la moins poreuse (MA) à 169 $\Omega.m$ pour MX. Tout d'abord les mesures effectuées sur 3 ans montrent une bonne répétabilité et une bonne stabilité. Ensuite, les pierres présentent une signature électrique distincte avec des valeurs resserrées, à l'exception d'EUV.

1. Pour les quatre pierres calcaires (MA, LS, MI et MX), la réponse électrique est bien corrélée à la quantité d'eau et modélisée par la loi d'Archie avec un $R^2 = 0,92$. De fait, ces pierres ont une microstructure assez équivalente. On note tout de même une légère surestimation et une dispersion des valeurs pour LS qui correspondent à 2 éprouvettes distinctes (13% et 17% respectivement). Ceci s'explique par la disparité de la microstructure des pierres liée au litage, au lieu d'extraction, etc.

2. La résistivité du grès (GR) est bien inférieure à la valeur attendue compte tenu de sa porosité, ce qui s'explique par la nature minéralogique de la matrice, qui est plus conductrice (présence d'oxyde de fer).

3. La réponse électrique de SA surestime la valeur de la résistivité par rapport à sa porosité totale. Ceci peut s'expliquer par la spécificité de sa microstructure. En effet le degré de saturation ($N_{48}/N_T = 0,62$) est très bas ce qui s'explique par sa répartition porale bimodale ($d_{pic} = 0,3 - 12,7$ μm).

4. Le comportement d'EUV est assez similaire à celui de SA. Ceci s'explique par sa distribution bimodale ($d_{pic} = 0,9 - 18,6 \mu m$), mais aussi par la taille élevée de ses grains ($1337 \mu m$) qui rend le matériau plus résistif et qui augmente la tortuosité de sa matrice.

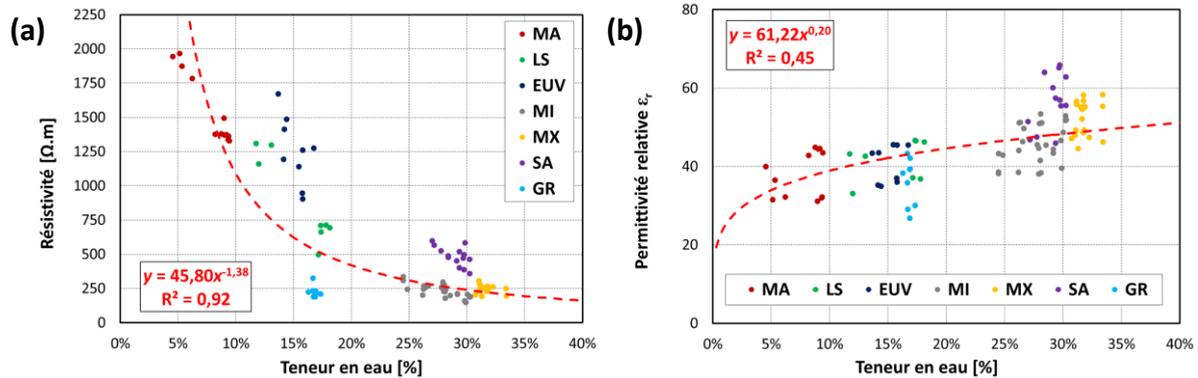


FIGURE 2. (a) Résistivité électrique et (b) permittivité relative à 1 MHz en fonction de la teneur en eau. Les courbes de tendance sont calculées uniquement pour MA, LS, MI et MX.

B. Permittivité relative

Les spectres de permittivité relative ont été déduits des spectres d'impédance. Les valeurs de la permittivité relative à 1 MHz de chaque pierre en fonction de la teneur en eau sont représentées à la Figure 2b. Elles sont de l'ordre de 40 et s'étalent entre 26 pour GR et 65 pour SA. Comme pour la résistivité, on constate un comportement spécifique pour GR, SA et EUV. En effet, dans ces gammes de fréquences (10 Hz – 10 MHz), la réponse de la permittivité est contrôlée par des mécanismes de polarisation d'interface entre l'eau et les grains de la matrice et par la polarisation de la molécule d'eau. Les résultats montrent bien que la valeur de ϵ_r est influencée par : (i) la teneur en eau, mais aussi (ii) la nature des particules chargées (GR) et (iii) la surface spécifique des grains (EUV et SA).

REFERENCES

Eslami, J., Walbert, C., Beaucour, A.-L., Bourges, A., & Noumowe, A. (2018). Influence of physical and mechanical properties on the durability of limestone subjected to freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 162, 420–429.

Gomart, H., & Bouvet, A. (2021). Suivi temporel de la microstructure de matériaux cimentaires par EIS (2021). *Academic Journal of Civil Engineering*, 38(2), 149-153.

Roberts, J., & Lin, W. (1997). Electrical properties of partially saturated Topopah Spring tuff: water distribution as a function of saturation. *Water resources research*, 33(4), 577-587.

R. Vecchiattini, R. (2018). Moisture monitoring experience in the old town of Genoa. *Journal of Cultural Heritage*, 31S, S71–S81.

Vigroux, M., Eslami, J., Beaucour, A.-L., Bourges, A., & Noumowe, A. (2021). High temperature behaviour of various natural building stones. *Construction and Building Materials*, 272, 121629.