
Etude comparative de techniques de mesure et de malaxage pour mortiers fibrés type « smart concrete »

Allam Hamza¹, Duplan François¹, Clerc Jean-Pierre¹, Amziane Sofiane², Burtshell Yves¹

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453, Marseille, France

² Univ. Clermont Auvergne , CNRS, Sigma, Institut Pascal, UMR 6602, Clermont-Ferrand, France

RÉSUMÉ. La plupart des essais réalisés sur matériaux cimentaires sont normalisés. Pour des essais de référence comme les essais sur mortier normalisé, même les conditions de confection d'éprouvettes (matériaux et malaxage) sont définies par la norme (EN 196 en Europe). Cependant, les mesures électriques sur matériaux cimentaires sont moins utilisées et donc non normalisées (hormis pour l'estimation du risque de corrosion), alors qu'elles offrent un potentiel intéressant puisqu'elles peuvent être corrélées avec la prise [KUS 2016], la teneur en eau [CAR 1989], ... Pour les matériaux cimentaires renforcés des fibres conductrices, les mesures électriques peuvent aussi permettre d'évaluer l'endommagement [PEL 2001] ou la contrainte mécanique [CHE 1993][FU 1997]. Dans ce contexte, disposer de mesures fiables et reproductibles semble être une nécessité de premier plan. Cette étude a donc pour objectif d'identifier des techniques de mesure et de malaxage de mortiers fibrés type « smart concrete » qui soient fiables et reproductibles.

ABSTRACT. Most testing methods applied to cement-based materials are standardized. For tests performed on normalized mortars, even the mixing protocol and materials are regulated by the standard (EN 196 in Europe). This is not the case for electrical measures since those tests are less applied outside the scope of corrosion risk assessment. However, electrical measures offer an interesting potential to assess the hydration [KUS 2016], the moisture content [CAR1989], ... In the specific case of mortars reinforced with conductive fibres, electrical measures may also be used to assess the damage [PEL 2001] or mechanical strain [CHE 1993] of cement-based materials. Within this context, the reliability and reproducibility of those measures needs to be guaranteed. This study is therefore focused on the reliability and reproducibility of electrical measures setups and mixing sequences.

MOTS-CLÉS : mortier, fibres de carbone, mesures électriques, monitoring, malaxage

KEY WORDS: mortar, carbon fibres, electrical measures, monitoring, drying, mixing

1. Introduction

L'addition de fibres conductrices aux matériaux cimentaires peut leur permettre d'avoir un comportement piezo-résistif : la résistivité intrinsèque du matériau varie linéairement avec ses déformations mécaniques, comme pour une jauge d'extensométrie. Ces matériaux sont couramment appelés « Smart Concrete » et présentent un potentiel particulièrement intéressant pour des applications de Structural Health Monitoring. D'autres applications peuvent être envisagées, dont notamment le chauffage et le blindage électromagnétique [xxx][xxx].

Dans l'optique d'exploiter les résultats de mesures électriques pour le monitoring de structures, leur fiabilité doit être garantie. Cependant, les choix possibles de méthodes de mesure sont multiples : mesure 2 points ou 4 points, mesure avec courant continu ou alternatif, utilisation d'électrodes surfaciques ou volumiques, ... Il est donc nécessaire d'identifier les méthodes de mesure les plus fiables.

Les fibres utilisées pour ces applications présentent un faible diamètre et un élanement élevé, ce qui leur permet de créer un réseau conducteur très complexe et dense, ce même avec des fractions volumiques de fibres inférieures à 1%. Cependant, ce réseau de fibres à faible seuil de percolation peut aussi être la cause d'une mauvaise reproductibilité des résultats entre gâchées, surtout avec ces fractions volumiques de fibres réduites. Il est donc aussi nécessaire de pouvoir garantir une dispersion homogène des fibres au sein de la matrice cimentaire et reproductible entre gâchées. Dans la littérature, certaines comparaisons entre séquences de malaxage démontrent que c'est un élément crucial dans l'étude des mortiers fibrés type « Smart Concrete ».

L'étude présentée dans ce poster correspond donc à l'identification des principaux paramètres liés aux techniques de mesures électriques et aux séquences de malaxage.

2. Choix d'une méthode de mesure

2.1 Procédures expérimentales

Pour cette étude, 4 séries d'échantillons 4*4*16 cm avec des fractions volumiques de fibres de 0.5 % ont été produits : **série 1** : échantillons sans électrodes intermédiaires (mesure 2 points uniquement) ; **série 2** : échantillons avec électrodes intermédiaires surfaciques (mesure 2 points et 4 points) ; **série 3** : échantillons avec électrodes intermédiaires « grillage fin » (mesure 2 points et 4 points) ; **série 4** : échantillons avec électrodes intermédiaires « grillage grossier » (mesure 2 points et 4 points). Les mesures 2 points se font sur toute la longueur de l'échantillon, soit 16 cm, les mesures 4 points sur une longueur de référence de 8 cm ; leurs résultats sont en conséquence multipliés par 2. Les mesures se font avec un courant alternatif d'amplitude 0.1 V pour s'affranchir de l'effet de polarisation [WEN 2001] et de conduction non-linéaire [Xu 2011]. La fraction volumique de fibres est de 0.5 %.

2.2 Résultats

La figure 1 montre la comparaison entre la série 1 et série 2 avec des mesures 2 points. L'ajout d'électrodes intermédiaires surfaciques semble n'avoir aucune influence sur les propriétés électriques de l'échantillon. Sur la figure 4, la mesure 4 points présente une partie réelle de l'impédance plus faible que la mesure 2 points, les parties imaginaires présentant des valeurs similaires. Des études approfondies sont en cours pour expliquer ce résultat avec certitude.

La figure 2 montre que l'ajout d'un grillage fin perturbe fortement les propriétés électriques de l'échantillon. Sur la figure 5, l'utilisation de ce grillage fin pour des mesures 4 points semble peu judicieuse car la courbe d'impédance présente des valeurs surestimées.

Sur la figure 3, la présence du grillage grossier impacte moins les propriétés électriques de l'échantillon que le grillage fin. Sur la figure 6, les valeurs mesurées sont plus faibles avec la mesure 4 points qu'avec la mesure 2 points, à l'instar de la série 2.

Le Tableau 1 montre les coefficients de variation des mesures sur la plage étudiée. Les mesures 2 points donnent systématiquement des coefficients de variation inférieurs aux mesures 4 points. Les coefficients de variation de la partie réelle sont inférieurs à ceux de la partie imaginaire. Les mesures 2 points des séries 1 et 2 sont comparables. Pour les séries 3 et 4, l'ajout d'un grillage fin ou grossier augmente la variabilité des mesures deux points. Les mesures 4 points donnent toutes des coefficients de variation peu satisfaisants.

Tableau 1 - Coefficients de variation de l'impédance par technique de mesure

Méthode	CV (%)	
	Rp	X
Série 1 2 pts	4.9	13.9
Série 2 2 pts	5	13.6
Série 2 4 pts	19.8	27.4
Série 3 2 pts	13.2	23
Série 3 4 pts	25.8	31.1
Série 4 2 pts	14.7	21.8
Série 4 4 pts	20.6	21.4

3. Choix d'une séquence de malaxage

3.1 Procédures expérimentales

Par rapport aux méthodes proposées dans la littérature, les séquences suivantes ont été choisies et sont décrites dans le Tableau 2:

Tableau 2 - Séquences de malaxage

Temps (min)	Vitesse	Séquences			
		Malaxage 1	Malaxage 2	Malaxage 3	Malaxage 4
1	Petite	Toutes les composantes	Ciment + Sable + fibres	Ciment + sable	Ciment + sable
2	Petite		Eau + SP*	Eau + SP	Eau + SP + fibres
3	Grande			Fibres	
4	Grande				
5	Grande				

*SP = super-plastifiant

Pour chaque séquence de malaxage, deux gâchées (3 échantillons chacune) sont produites. La fraction volumique de fibres est de 0.05%.

3.2 Résultats

Les diagrammes des parties réelle et imaginaire de l'impédance sont montrés sur les figures 7 et 8. Les valeurs moyennes des coefficients de variation sont données dans le Tableau 3. Le malaxage 3 donne des valeurs d'impédance plus faibles que les autres, mais des coefficients de variation plus élevés. Le malaxage 1 donne des coefficients de variation raisonnables, mais présente les valeurs moyennes les plus élevées. Enfin, les malaxages 3 et 4 donnent des valeurs moyennes similaires, mais le coefficient de variation mesuré sur les deux gâchées de la séquence de malaxage 2 est clairement le meilleur de tous, que ce soit pour la partie réelle ou imaginaire de l'impédance. La séquence de malaxage 2 semble donc être la mieux adaptée.

Tableau 3 - Coefficients de variation de l'impédance pour différentes séquences de malaxage

Moyenne	CV (%)						Moy1 – Moy2	
	1 ^{er} essai		2 ^{eme} essai		Total		Moytot	
	Rp	X	Rp	X	Rp	X	Rp	X
1	16	22.2	17	26.7	18.2	34.9	16	41
2	14.9	21.6	5.2	6.7	12.1	16.6	7	9
3	33.5	45.9	12.2	19.8	31.5	46.5	29	43
4	13.35	21.7	26.9	38.6	34.9	52.5	46	69

4. Conclusion

Le choix d'une technique de mesure spécifique des propriétés électriques a une importance primordiale sur la qualité de la mesure, à la fois en termes de précision et de reproductibilité entre plusieurs mesures. Par rapport aux résultats obtenus dans cette étude, il semble que pour une mesure avec courant alternatif, une mesure 2 points sur des échantillons sans électrodes intermédiaires peut être satisfaisante. Les mesures 4 points avec électrodes surfaciques semblent sous-estimer la résistance mesurée, alors que l'ajout d'électrodes intermédiaires volumiques type « grillage » peut poser des problèmes supplémentaires. Cependant, les auteurs insistent sur la nécessité d'avoir un contact entre électrodes d'extrémité et échantillon de très bonne qualité.

Le choix d'une séquence de malaxage adéquate peut aussi permettre d'améliorer fortement la reproductibilité, à la fois pour des échantillons venant d'une même gâchée, mais aussi entre gâchées distinctes.

5. Références

[KUS 2016] Kusak, I, Lunal, M, Chobola,, Z. Monitoring of Concrete Hydration by Electrical Measurement Methods, *Procedia Engineering*, vol. 151, 2016, p. 271-276

[CAR 1989] Mc Carter, W.J, Garvin, S., Dependence of electrical impedance of cement-based materials on their moisture condition, *Journal of Physics – Applied Physics*, vol. 22, 1989

[CHE 1993] P. Chen, D. Chung, Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection, *Smart materials and structures*, vol. 2, 1993, p.22-30

[CHI 1989] Chiou, J.M, Zheng, Q., Chung, D.D.L., Electromagnetic interference shielding by carbon fibre reinforced cement, *Composites*, vol.20, n°4, 1989, p.379-381

[CHU 2006] Wen, S., Chung, D.D.L. The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement, *Carbon*, vol.44, n°11, 2006, p.2130-2138,

[DAH 2015] Ali AL-Dahawi, Ouzhan ztrk, Farhad Emami, Mustafa Ahmaran, and Mohamed Lachemi. Self-Sensing Cementitious Composites for Smart Structures, *SMAR 2015*, May 2015.

[FU 1997] X. Fu, E. Ma, D. Chung, W. Anderson, Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement, *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n°6, 1997, p.845-852

[WAN 2017] Wang, C., Li, B., Peng, L., He, W., Zhao, L., Li, C. CVD Treatment of Carbon Fibers and Evaluation of Their Dispersion in CFRC. *Materials Sciences and Applications*, vol.8, 2017, p.649

[WEN 2001] Wen, S., Chung, D.D.L. Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n°1, 2001, p.141-147

[ZHA 2011] Zhao, H., Wu, Z., Wang, S., Zheng, J., Che, G., Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 65, n° 3, 2011, p.413-420

[XU 2011] Xu, J., Yao, W., Wang, R., Nonlinear conduction in carbon fiber reinforced cement mortar, *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, n°3, 2011, p.444-448

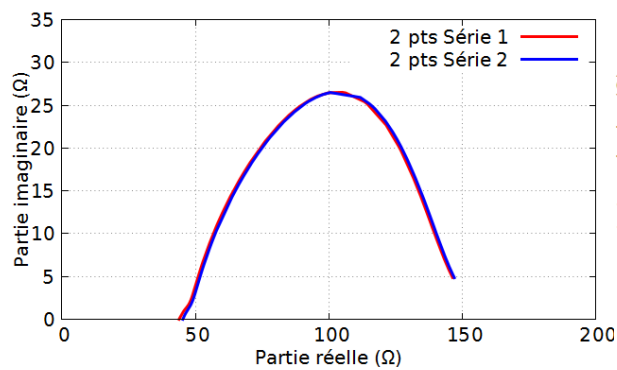


Fig 1 : Mesures 2pts série 1 vs 2 pts série 2

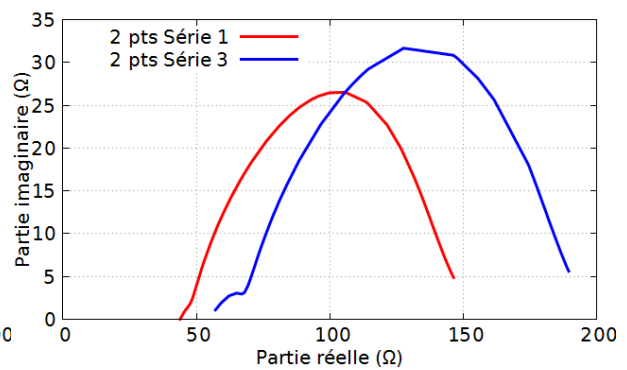


Fig 2 : Mesures 2pts série 1 vs 2 pts série 3

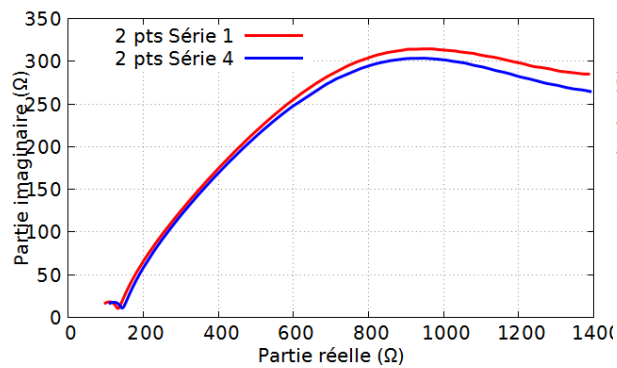


Fig 3: Mesures 2pts série 1 vs 2 pts série 4

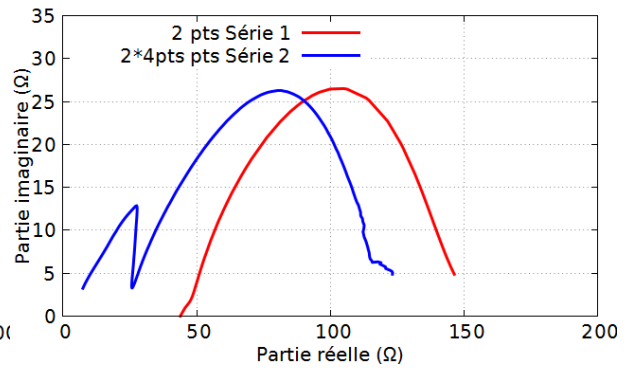


Fig 4: Mesures 2pts série 1 vs 2*4 pts série 2

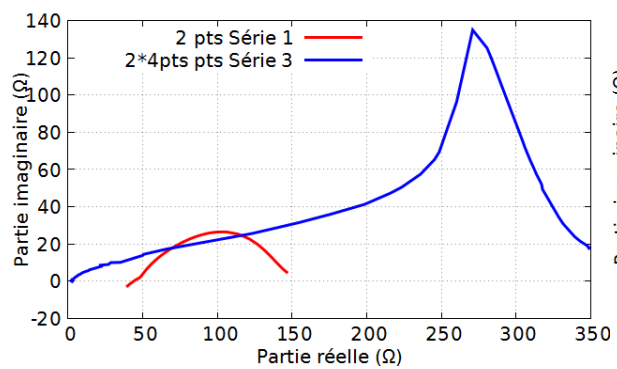


Fig 5: Mesures 2pts série 1 vs 2*4 pts série 3

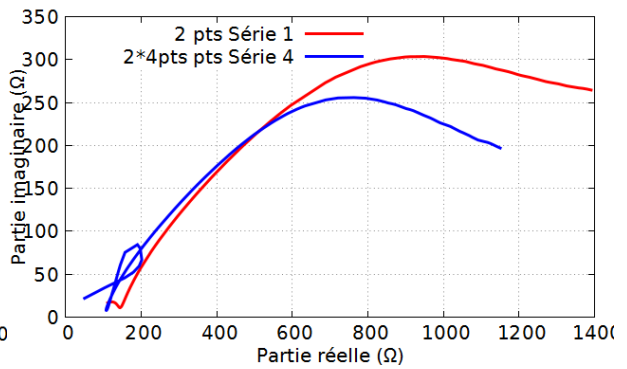


Fig 6: Mesures 2pts série 1 vs 2*4 pts série 4

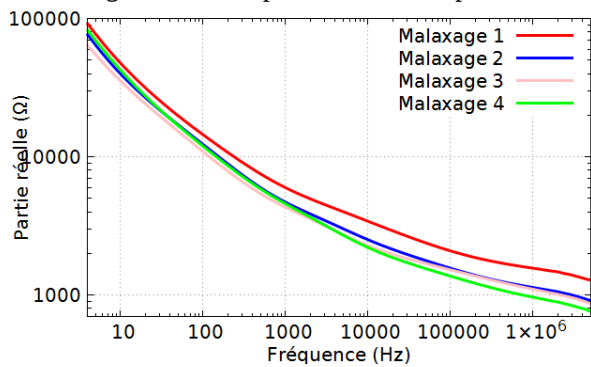


Fig 7: Moyenne de la partie réelle des différents malaxages

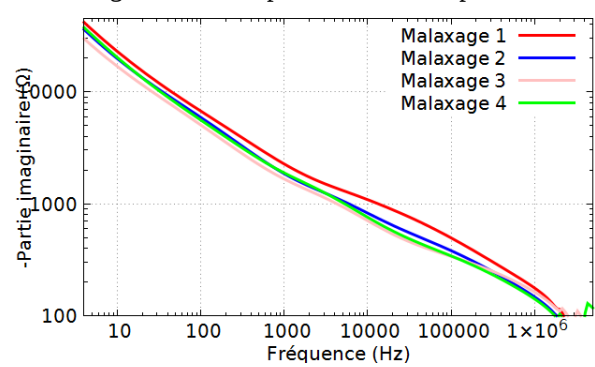


Fig 8: Moyenne de la partie imaginaire des différents malaxages