

---

# Sensibilité électrique de mortiers type « smart concrete » à un chargement thermique et mécanique simultané

Duplan François<sup>1</sup>, Clerc Jean-Pierre<sup>1</sup>, Eiras Jesus<sup>2</sup>, Payan Cédric<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aix Marseille Université, CNRS, IUSTI, Marseille, France

<sup>2</sup> Aix Marseille Université, Centrale Marseille, CNRS, LMA, Marseille, France

---

*RÉSUMÉ.* Le smart concrete est un matériau multifonctionnel produit par addition de fillers conducteurs en électricité au sein d'un matériau cimentaire (coulis, mortier ou béton). Les propriétés électriques de ce type de matériau sont à la fois sensibles à son chargement mécanique, à sa teneur en eau et à sa température. Ce travail présente les variations des propriétés électriques de mortiers renforcés de fibres en acier inoxydable face à un chargement simultané mécanique et thermique. Les résultats démontrent qu'en l'absence de fibres, la sensibilité du mortier à un chargement mécanique est inexistante, et sa sensibilité à la température est élevée. En revanche, en présence de fibres au-dessus du seuil de percolation, la partie réelle de l'impédance est plus sensible au chargement mécanique qu'à la température. Pour la partie imaginaire de l'impédance, au contraire, la sensibilité à la température est considérablement plus élevée que la sensibilité au chargement mécanique. L'exploitation combinée des deux parties de l'impédance électrique complexe du matériau pourrait donc permettre d'envisager une performance de « double-sensibilité ».

*ABSTRACT.* Smart concrete is a multifunctional material produced by including functional fillers within common cement-based materials such as cement paste, mortars or concrete. These materials show electrical properties which are sensitive to variations in mechanical strains, temperature and moisture content. This work shows the sensing performance of those materials under a simultaneous thermal and mechanical loading. Results show that in the absence of fibres, only thermal drift is observed. On the contrary, in the presence of fibres above the percolation threshold, the real part of the impedance may allow to assess the mechanical loading accurately, while the imaginary part of the impedance could allow the assessment of the temperature, thus potentially providing a “double-sensing performance”.

*MOTS-CLÉS :* Matériau Smart ; Mortier ; Température ; Chargement mécanique ; Impédance électrique

*KEYWORDS :* Smart material ; Mortar ; Temperature ; Mechanical loading ; Electrical impedance

---

## 1. Introduction

Depuis plus de 25 ans [CHEN 93], la possibilité d'utilisation de matériaux cimentaires « smart » à des fins de Structural Health Monitoring (SHM) a été étudiée et a fait l'objet d'un nombre important de publications. Le concept est d'utiliser des mesures électriques de ces matériaux « smart » afin d'évaluer leur contrainte, déformation ou endommagement mécanique. Cependant, avec des fibres conductrices en carbone, il existe une sensibilité électrique de ces matériaux à ses conditions hydriques [DUP 18] et thermiques [WEN 99] [SUN 99]. La plupart des structures de génie civil pouvant être sujettes à des variations simultanées de température et chargement mécanique, il faudrait idéalement réaliser un système compensé thermiquement. Cette méthode impose donc de réaliser un double système de senseurs : un premier système soumis à un chargement simultané thermique et mécanique, et un second système de compensation uniquement soumis à un chargement thermique, identique à celui du premier système. Aux échelles courantes des structures de génie civil, un tel dispositif est difficile à mettre en œuvre et présente un surcoût considérable. Une autre méthode consiste à disposer judicieusement un capteur de température afin d'évaluer les variations thermiques et réaliser une compensation selon des lois de comportement identifiées au préalable. Cette solution, bien qu'intéressante, peut également être compliquée à mettre en œuvre. Il serait donc particulièrement intéressant de pouvoir s'affranchir de ce besoin de système de compensation par un choix judicieux de matériau, de technique de mesure et d'exploitation des résultats.

Dans cette étude, deux fractions volumiques de fibres d'acier (0.05 et 0.1 %) ont été ajoutées à un mortier de référence. Les échantillons de ces trois mortiers ont été séchés et placés à des températures de 10 ; 24 ; 35 et 50 °C. Ils ont ensuite été testés en compression uni-axiale dans une pièce à 24°C avec des contraintes maximales de 5 MPa. Les résultats démontrent qu'avec la fraction volumique de fibres la plus élevée, les parties réelles et imaginaires de l'impédance sont respectivement sensibles au chargement mécanique et à la température, et il serait possible d'exploiter conjointement ces deux mesures pour évaluer simultanément la température et le chargement mécanique sans système additionnel de mesure ou de compensation.

## 2. Méthodes expérimentales

Pour les trois compositions différentes de mortier, 3 échantillons de 4\*4\*16cm ont été produits. Les mortiers présentent une fraction volumique de sable de 60 % et des fractions volumiques de fibres de 0 ; 0.05 et 0.1 %. Les dimensions des fibres en acier inoxydable Beki-Shield sont les suivantes : diamètre 0.008 mm ; longueur 6 mm. Les matériaux utilisés sont : un ciment CALCIA CEM I 52.5R (usine xxx), l'eau du robinet ; un sable siliceux 0/2 mm ; un super-plastifiant BASF MasterGlenium ACE 550. La composition du mortier de référence est ainsi la suivante : ciment 555kg/m<sup>3</sup> ; eau 221 kg/m<sup>3</sup> ; sable 1 560 kg/m<sup>3</sup> ; super-plastifiant 5 kg/m<sup>3</sup>.

La méthode de malaxage dans un malaxeur à mortier type Perrier est la suivante : dans un premier temps les fibres, le sable et le ciment sont mélangés durant une minute à petite vitesse, puis l'eau et le super-plastifiant sont ajoutés et le mélange est continué durant 2 minutes à petite vitesse avec un grattage de la cuve après 1 minute. Les échantillons ont été démoulés après 24h et immergés dans de l'eau à 20°C durant 27 jours. Ils ont été ensuite étuvés durant 72h à 35 puis 50 °C jusqu'à atteindre une masse constante pour s'affranchir de l'effet du séchage sur les propriétés électriques lors des essais à venir.

Ensuite, les échantillons ont été placés à des températures constantes de 10 ; 24 ; 35 et 50 °C durant 24h. Pour chaque température, une spectroscopie d'impédance a été faite entre 4 Hz et 5 MHz. Ensuite, les échantillons ont été testés en compression uni-axiale avec un chargement de 2 cycles entre 0.16 et 5 MPa avec paliers haut et bas de 10s et vitesses de montée et descentes en charge de +0.1 MPa/s et -0.1 MPa/s. Durant ce chargement les mesures d'impédance ont été faites avec un signal de 0.1V d'amplitude et 1 kHz de fréquence, avec une acquisition de fréquence 1Hz.

## 3. Résultats

### 3.1 Sensibilité électrique à un chargement thermique seul

Pour le mortier sans fibres, les impédances réelle et imaginaire diminuent quand la température augmente, indépendamment de la fréquence de mesure (figures 1 (a) et 2 (a)).

En présence d'un réseau de fibres faiblement percolé, l'impact de la température sur l'impédance réelle est moindre, et dépend de la fréquence de mesure (figure 1 (b)). Contrairement aux mortiers sans fibres la partie imaginaire de l'impédance présente une très forte sensibilité à la température (figure 2 (b)) et pourrait ainsi servir à évaluer cette dernière avec précision.

En présence d'un réseau de fibres fortement percolé, la partie réelle de l'impédance dépend très peu de la température et de la fréquence de mesure (figure 1 (c)). Les impédances imaginaires présentent des valeurs très faibles, mais toujours avec un effet notable de la température (figure 2 (c)).

### 3.2 Sensibilité électrique à un chargement thermique et mécanique simultané

Les figures 3 et 4 présentent respectivement les mesures des parties réelles d'impédance sous chargement thermique seul, et chargement thermique + mécanique simultané

En l'absence de fibres, la partie réelle de l'impédance à 1 kHz varie de +/- 10% environ dans les conditions d'essai (230 secondes à 24°C), et la sensibilité mécanique des mortiers n'est pas observable (figures 3 et 4 (a)).

Dans les conditions d'essai, avec un volume relatif de 0.05 % de fibres, la partie réelle de l'impédance varie de moins de +/- 0.4 % (figure 3(b)). La sensibilité mécanique du matériau est observable sur les valeurs d'impédance réelle, mais il semble à premier abord nécessaire de réaliser une compensation ou de corriger les valeurs mesurées par une loi de comportement (figure 4(b)). En effet, l'amplitude et la linéarité du signal semblent peu précis. La partie imaginaire de l'impédance, quant à elle, est quasiment insensible au chargement mécanique, et fortement sensible à la température, ce qui confirme les observations du paragraphe précédent.

En revanche, avec un volume relatif de fibres de 0.1 %, l'impact de la température sur la partie réelle de l'impédance est nettement réduit (figure 3(c)), comme déjà observé au paragraphe précédent, et la sensibilité mécanique est améliorée, à la fois en termes de précision et d'amplitude du signal (figure 4(c)). La partie imaginaire de l'impédance reste quasiment insensible au chargement mécanique, et fortement sensible à la température.

## Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'appréhender la problématique de la variation des propriétés électriques de mortiers type « smart concrete » contenant de faibles fractions volumiques de fibres en acier inoxydable sous un chargement simultané mécanique et thermique. Les résultats démontrent qu'il existe un potentiel intéressant pour les mortiers dont le réseau de fibres présente une forte percolation. Cependant, pour le mortier étudié et la fréquence de mesure choisie, la précision obtenue ne serait pas satisfaisante en l'état pour n'importe quelle application. Cette étude ouvre cependant des perspectives intéressantes quant à l'amélioration de cette précision, à travers des améliorations de formulation et de protocoles d'acquisition et d'exploitation des mesures obtenues. Notamment, il serait envisageable d'utiliser la partie imaginaire de l'impédance (ou l'angle de phase) pour évaluer la température, puis grâce à cette évaluation de la température et à la valeur de la partie réelle de l'impédance (ou le module d'impédance), évaluer la contrainte/déformation mécanique. Le matériau aurait alors une double performance sensitive simultanée.

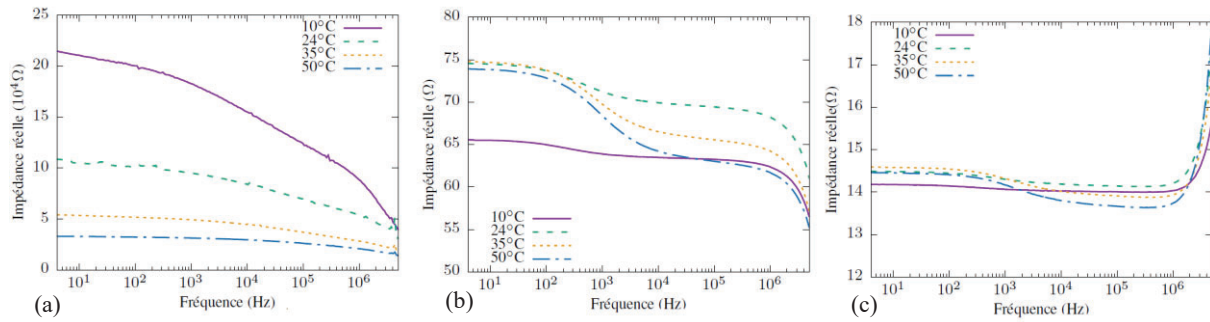
## Références

[CHEN 93] CHEN P.W., CHUNG D.D.L., "Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection", *Smart Materials and Structures*, vol. 2 (1), 1993, p.22-30

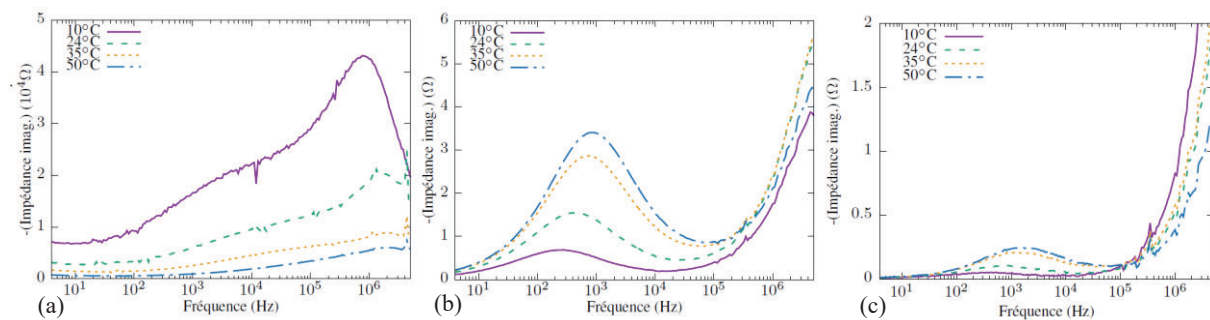
[DUP 18] DUPLAN F., PAYAN C., CLERC J.P., BURTSCHHELL Y., "Influence du séchage en conditions ambiantes sur les mesures électriques de mortiers fibrés", *36<sup>èmes</sup> Rencontres de l'AUGC*, ENISE/LTDS, Saint Etienne, 19- 22 juin 2018 p.251-255

[SUN 99] SUN M., LI Z., MAO Q., SHEN D., "A study on thermal self-monitoring of carbon fiber reinforced concrete", *Cement Concrete Research*, vol. 29(5), 1999, p.769-771

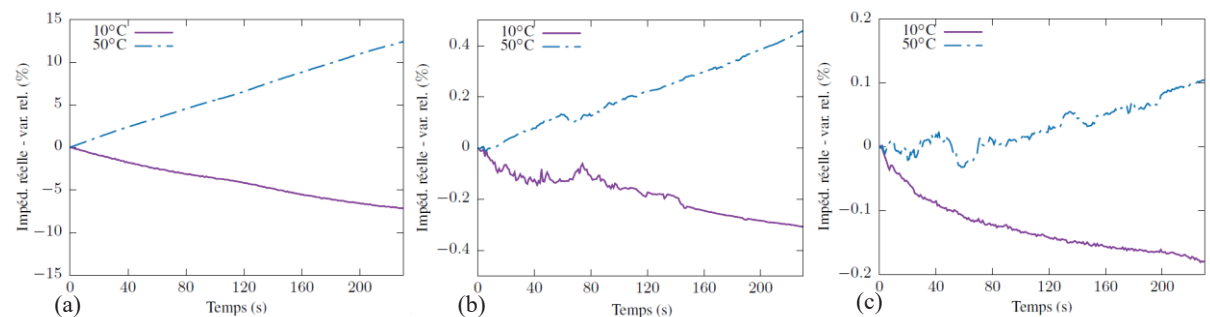
[WEN 99] WEN S., CHUNG D.D.L. "Carbon fiber-reinforced cement as a thermistor", *Cement Concrete Research*, vol. 29(6), 1999, p.961-965



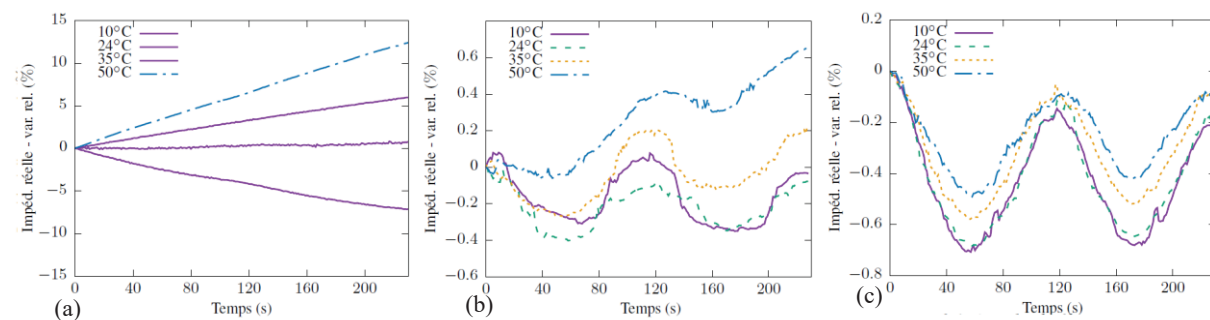
**Figure 1 :** Partie réelle de l'impédance à différentes températures pour mortier de référence (a) ; mortier 0.05 % volume relatif de fibres (b) ; mortier 0.1 % vol. rel. de fibres (c)



**Figure 2 :** Partie imaginaire de l'impédance à différentes températures pour mortier de référence (a) ; mortier avec 0.05 % vol. rel. de fibres (b) ; mortier 0.1 % vol. rel. de fibres (c)



**Figure 3 :** Variation relative de la partie réelle de l'impédance (chargement thermique seul) pour mortier de référence (a) ; mortier avec 0.05 % vol. rel. de fibres (b) ; mortier 0.1 % vol. rel. de fibres (c)



**Figure 4 :** Variation relative de la partie réelle de l'impédance (chargement thermique & mécanique) pour mortier de référence (a) ; mortier 0.05 % vol. rel. de fibres (b) ; mortier 0.1 % vol. rel. de fibres (c)