
Influence des granulats et fibres sur les propriétés mécaniques et électriques des mortiers de fibre carbone

Duplan, F. ¹ Burtschell, Y. ¹ Jalbaud, O. ¹ Roguiez, X. ¹ Vandewalle, L. ²

¹ Aix-Marseille Université ; IUSTI (Marseille ; France)

² KU Leuven, Department of Civil Engineering (Louvain ; Belgique)

RÉSUMÉ.

Une étude expérimentale a été menée sur 21 formulations avec des fractions volumiques en fibres comprises entre 0 et 0.8 %, ainsi qu'avec trois fractions volumiques en granulats différentes : 20, 40 et 60 %. A l'état frais, la consistance et la teneur en air ont été mesurées. A l'état durci, les résistances en compression et flexion, ainsi que la résistivité électrique ont été mesurées. Lorsque la fraction volumique en sable est de 20 ou 40 %, les fibres carbone causent une importante diminution de la résistivité électrique des mortiers, contrairement aux formulations comportant une fraction volumique de sable de 60 %.

L'influence directe des fibres sur la résistance à la compression est négligeable, cependant les fibres peuvent causer une légère augmentation de l'air entraîné, et donc provoquer de manière indirecte une légère diminution de la résistance en compression. Les fibres carbone permettent une augmentation de la résistance en flexion, qui est d'autant plus notable lorsque leur matrice cimentaire comporte une fraction volumique de sable faible, et donc une résistance en flexion peu élevée.

ABSTRACT.

An experimental study was performed on 21 mixture designs with volume fractions of fibres between 0 and 0.8 % and volume fractions of sand aggregates of 60, 40 and 20 %. At fresh-state, the workability and the air content were measured. At hardened state, compressive and flexural strengths, as well as apparent density and electrical resistivity were measured on 4*4*16 cm samples.

When the volume fraction of sand aggregates is of 20 or 40 %, the carbon fibres are able to cause a very strong decrease of the electrical resistivity ; when the volume fraction of sand aggregates is 60 %, they are not able to provide such a decrease, at least for volume fractions of fibres below 0.8 %.

The influence of carbon fibres on the compressive strength was found to be neglectible, but they might increase the amount of air bubbles during mixing, which may cause variations of the compressive strength. They might improve the flexural strength, especially when the one of the cementitious matrix is low (ie when the volume fraction of aggregates is below 40 %).

MOTS-CLÉS : smart concrete ; mortier ; formulation ; bétons auto-plaçant

KEYWORDS: smart concrete ; mortar ; mixture design ; self-compacting concrete

L'addition de fibres carbone, conductrices en électricité, permet de diminuer la résistivité électrique de plusieurs ordres de grandeur. Cette résistivité varie en plus de manière linéaire avec la déformation mécanique du matériau, ce qui permet de déterminer son chargement mécanique sans avoir à utiliser des jauges et/ou capteurs. Les constituants les plus et moins chers de ces formulations sont les fibres de carbone et le sable ; ce sont aussi les matières premières avec les impacts environnementaux les plus et moins importants. Afin d'optimiser les formulations de ces matériaux, il est donc judicieux d'essayer d'utiliser une quantité de sable aussi élevée que possible et une quantité de fibres aussi réduite que possible.

L'addition de fibres carbone à des matériaux cimentaires afin d'améliorer leur résistivité électrique date de plus de 20 ans [CHE 93]. La valeur réduite de la faible résistivité électrique de ce nouveau béton facilite sa mesure ; de plus, sa valeur varie linéairement en fonction du chargement mécanique auquel le matériau est soumis. Par conséquent, cette nouvelle classe de béton a été nommée "smart concrete", car il n'est plus nécessaire d'instrumenter une structure réalisée avec ce matériau pour connaître son chargement ; le matériau se comporte lui-même comme une jauge de déformation. Il est dès lors possible de produire des structures qualifiables de "self-sensing structure". Les fibres carbone sont plus chères et plus fragiles que les fibres d'acier, mais elles présentent un élanement bien plus important (de l'ordre de grandeur de 1 000 contre 50 à 100 pour les fibres d'acier). Comme elles sont généralement produites avec un diamètre peu élevé (entre 7 et 15 μm), leur longueur est souvent limitée à 25 mm. Ces dimensions sont peu adaptées au renforcement mécanique des bétons, notamment en comparaison avec des fibres métalliques de 30/40 mm de longueur et environ 0.5 mm de diamètre.

Les paramètres ayant une influence sur la résistivité électrique des mortiers renforcés de fibre carbone sont nombreux : certains sont liés à la composition des mortiers (notamment la fraction volumique et l'élanement des fibres), le temps de cure, la température, la teneur en eau, ... La méthode de mesure peut aussi avoir une influence : utilisation d'un courant continu (CC) ou alternatif (AC), la fréquence du courant AC, la géométrie du spécimen, le nombre d'électrodes (2 ou 4), ... De nombreux auteurs ont fait le choix d'utiliser une mesure avec un courant continu et 4 électrodes : le courant est imposé et mesuré entre les deux électrodes situées aux extrémités de l'échantillon, et la tension est mesurée entre les deux électrodes intérieures situées dans l'échantillon. Ainsi, les résistances de contact électrode-échantillon aux extrémités n'influent pas sur la mesure. Pour cette étude, les résultats des méthodes avec 2 et quatre électrodes ont été comparés, et la différence entre les deux méthodes a été évaluée inférieure à 10 % de la mesure (cf tableau ??). Les auteurs ont donc conclu que la mesure entre deux électrodes permettait d'atteindre une précision suffisante pour l'étude expérimentale qui suit. Le contact est assuré par des électrodes de cuivre qui sont maintenues en contact avec les surfaces de l'échantillon sur lesquelles est déposée une peinture conductrice d'argent ou de nickel. Les auteurs d'autres études expérimentales utilisaient souvent une peinture de ce type ([BAE 10] [BAE 13] [FU 97] [CHE 96a]), de la graphite [XIE 96] ou des éponges imprégnées d'une solution de NaCl ou NaOH [WOO 07] [WEN 06].

Bien que l'utilisation d'un courant continu soit la plus simple à mettre en œuvre, ce dernier entraîne un phénomène de polarisation notable dans l'échantillon, causant une mesure instable. Il a donc été décidé d'utiliser un courant alternatif de fréquence 50 Hz dans cette étude, afin d'avoir une mesure stable dans le temps [HOU 05]. Enfin, les mesures ont été réalisées après deux mois de séchage dans des conditions ambiantes classiques (20 ° C et 50 % d'humidité relative) afin de limiter l'influence de la teneur en eau du matériau sur la mesure. De plus, la valeur donnée est donc représentative de la résistivité du matériau au long terme.

1. Matériaux et confection des échantillons

1.1. Matériaux

Le ciment utilisé était fourni par Calcia : CEM I 52,5 N SR 3 CE PM-CP2 NF ; l'eau utilisée provenait du robinet ; le sable était un sable siliceux 0/2 mm dont la distribution granulométrique est donnée sur la figure 1. Le super-plastifiant utilisé est SIKA Viscocrete Krono 20 HE ; son extrait sec est de 41 %. Les propriétés des fibres carbone sont données dans le tableau 1.

1.2. Confection des éprouvettes

Le sable, le ciment et l'eau (avec adjuvant) étaient malaxés durant 1.5 minutes, puis le bol était gratté, et le malaxage était repris pour 1.5 minutes pendant que les fibres étaient ajoutées progressivement afin de limiter le risque de formation d'oursins et d'agrégats de fibres emmêlées. La consistance visée était fluide, avec des

Longueur (mm)	6
Diamètre (μm)	7
Résistance en traction(MPa)	4 500
Module d'élasticité (GPa)	240
Déformation à la rupture (%)	1.9
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.8
Résistivité électrique ($\Omega.m$)	1.38.10E-6
Teneur massique en coating (%)	3.8

Tableau 1. Propriétés des fibres carbone

temps d'écoulement mesurés au maniabilimètre LCPC (NF P18 452) inférieurs à 5 secondes pour la plupart des formulations(cf. tableaux 3 à 5). La cure comportait deux phases : une période de durcissement de 28 jours (24h avant démoulage puis 27 jours immergés dans un bain d'eau à 20 °C) et une période de séchage de 2 mois dans des conditions ambiantes (20°C et 50 % d'humidité relative) permettant à la teneur en eau des échantillons de se stabiliser.

1.3. Formulations

La compacité du sable 0/2mm utilisé étant d'environ 60 % en l'absence de compactage, la fraction volumique en sable a été limitée à 60 % pour l'ensemble de cette étude. Cette démarche est censée permettre de favoriser la fluidité des mortiers à l'état frais et limiter le risque d'apparition de bulles d'air à éliminer par une mise en place avec une forte vibration. Les fibres réduisent la compacité des squelettes granulaires des matériaux cimentaires, comme le montre la figure 2 tirée de [MAR 10]. Deux fractions volumiques de sable supplémentaires ont donc été utilisées : 20 et 40 %. Leurs formulations sont données dans 2. L'eau contenue dans le super-plastifiant n'a pas été prise en compte dans la quantité totale d'eau.

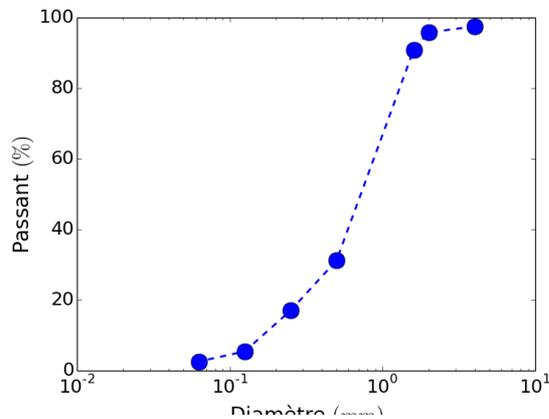


Figure 1. Distribution granulométrique du sable 0/2 mm utilisé

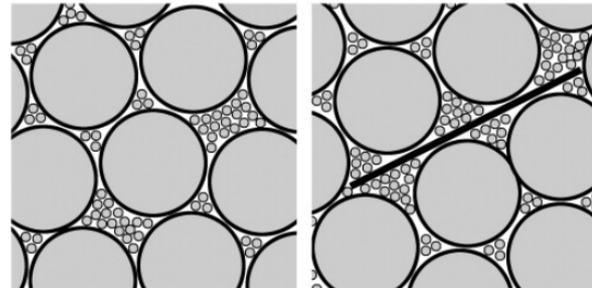


Figure 2. Influence des fibres sur la compacité du squelette granulaire (tirée de [MAR 10])

Fraction volumique de sable (%)	60	40	20
Dénomination	Matrice A	Matrice B	Matrice C
Ciment (kg/m^3)	555	833	1110
Eau (kg/m^3)	221	332	442
Sable (kg/m^3)	1397	1040	520

Tableau 2. Formulations des trois matrices de mortier

Fraction vol. de fibres (%)	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80
Super-plastifiant (kg/m ³)	10	12	14	20	22	25	70
Temps d'écoulement (sec)	<1	2	3	3	3	5	7
Air entraîné (%)	2	3	3	4	4	3	5
Ségrégation visible	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non

Tableau 3. Dosages en super-plastifiant et propriétés à l'état frais (matrice avec 60 % sable)

Fraction vol. de fibres (%)	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80
Super-plastifiant (kg/m ³)	6	8	8	10	13	16	60
Temps d'écoulement (sec)	<1	2	3	3	3	5	6
Air entraîné (%)	2	5	3	6	5	3	4
Ségrégation visible	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non

Tableau 4. Dosages en super-plastifiant et propriétés à l'état frais (matrice avec 40 % sable)

2. Procédures expérimentales

2.1. Propriétés à l'état frais

La consistance est mesurée grâce à un maniabilimètre LCPC pour mortier ; le dosage en super-plastifiant étant ajusté pour un temps d'écoulement inférieur à 5 secondes.

La quantité d'air entraîné est mesurée grâce à un aéromètre à mortier.

2.2. Mesure de la résistivité électrique

Les mesures de la résistivité électrique ont été réalisées sur des éprouvettes prismatiques 4*4*16cm. Un générateur de fonctions (HAMEG 8030-4) fournit un courant alternatif d'amplitude $U = 0.5V$, et l'intensité i est donnée par un multimètre de table (Goodwill Instek GDM -8045 G). Les résultats fournis sont les valeurs moyennes de trois mesures sur trois éprouvettes de même formulation. La résistivité est calculée selon l'équation 1 :

$$\rho = \frac{US}{iL} \quad (1)$$

Avec :

ρ résistivité électrique (Ωm)

U tension (V)



Figure 3. Ségrégation des mortiers avec 20 % de sable (vol.) et plus de 0.6 % de fibres (vol.)

Fraction vol. de fibres (%)	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80
Super-plastifiant (kg/m ³)	2	3	3	4	16	10	50
Temps d'écoulement (sec)	<1	2	3	3	3	5	5
Air entraîné (%)	1	1	2	3	2	5	5
Ségrégation visible	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui

Tableau 5. Dosages en super-plastifiant et propriétés à l'état frais (matrice avec 20 % sable)

i intensité (A)

S section transversale de la barre (m²)

L longueur de la barre (m)

2.3. Propriétés mécaniques

Les résistances en compression et flexion ont été mesurées selon la norme NF EN 196-1 à une échéance de 90 jours. Les valeurs des résistances en compression sont les valeurs moyennes de 6 mesures, celles de résistance en flexion sont les valeurs moyennes de 3 mesures.

3. Résultats et discussion

3.1. Propriétés à l'état frais

Il a été vu dans le paragraphe 1.3 que le dosage en super-plastifiant (cf. tableaux 3 à 5) a été ajusté afin de maintenir une consistance fluide. Ces dosages sont raisonnables (inférieurs à 5 % de la masse de ciment) jusqu'à une fraction volumique de fibres de 0.6 %. Lorsque cette dernière atteint 0.8 %, les dosages en super-plastifiant atteignent environ 10 % de la masse du ciment, et une telle quantité d'adjuvants tend à freiner l'hydratation et le durcissement de la pâte de ciment au jeune âge. Ces échantillons ont dû être démoulés à 48h au lieu de 24h. Un tel dosage de super-plastifiant peut aussi être un facteur augmentant le risque de ségrégation. Pour les échantillons comportant une fraction volumique de sable de 20 % et des fractions volumiques de fibres supérieures à 0.6 %, un phénomène de ségrégation locale des fibres sur la partie supérieure des échantillons a été observé, comme le montre la figure 3.

Une légère augmentation de la quantité d'air entraîné a été observée en présence des fibres pour la quasi-totalité des formulations. L'évolution de la quantité d'air entraîné en fonction de la quantité de fibres est néanmoins aléatoire pour ces faibles fractions volumiques de fibres.

En présence de granulats de dimensions plus importantes (gravier de Dmax 10 mm), les auteurs de [YAK 13] n'ont pas observé une réelle influence des fibres sur la quantité d'air entraîné.

D'autres auteurs ont utilisé des polymères en combinaison avec des fibres carbone et remarqué une augmentation de la quantité d'air entraîné [CHE 96b]. Cependant, il est impossible de conclure de ces résultats si la quantité d'air entraîné supplémentaire est causée par les fibres ou le polymère.

En l'absence de granulats, une fraction volumique d'environ 0.4 % a entraîné une quantité d'air supplémentaire de 2 % dans [XU 01] (5.32 % avec fibres contre 3.42 % sans fibres).

Afin de quantifier l'influence des fibres sur l'air entraîné, il aurait été également possible de maintenir une quantité de super-plastifiant constante et de faire varier la fraction volumique de fibres dans des proportions plus importantes. Cependant, cette étude aurait un désavantage : l'augmentation de l'air entraîné serait la combinaison de l'effet direct de la présence des fibres et, indirectement, de leur effet de diminution de la fluidité du mélange à l'état frais.

Les auteurs de [MAR 10] ont établi une estimation de la quantité maximale de fibres que l'on peut ajouter à un mélange afin de limiter le risque de formation d'oursins. Cette formule (cf. équation 2), valable pour des fibres rigides a été appliquée aux trois matrices cimentaires étudiées dans cet article ; les résultats sont donnés dans le tableau 6. Ces valeurs sont ici données à titre indicatif, car les fibres de carbone sont en réalité déformables, et non rigides. De plus, leur élanement est de 860 (sans prendre en compte le risque de rupture des fibres lors du malaxage), alors que les fibres étudiés dans [MAR 10] présentaient des élanements compris entre 20 et 100.

Cependant, ces estimations démontrent qu'il ne serait pas recommandable, selon ce modèle, d'incorporer des fractions volumiques en fibres rigides d'élanement 860 de plus de 0, 0.15 et 0.31 % aux matrices cimentaires étudiées (respectivement A, B et C). Les résultats de cette étude suivent cette logique, puisque la présence de fibres tend à augmenter la quantité d'air occlus pour l'ensemble des matrices. L'accroissement très marqué de la demande en super-plastifiant lorsque la fraction volumique de fibres dépasse 0.6 % est lui aussi cohérent avec les résultats de [MAR 10].

$$(\phi_f)_{max} = \frac{400}{r} \left(1 - \frac{\phi_s}{\phi_m}\right) \quad (2)$$

Avec :

$(\phi_f)_{max}$ fraction volumique maximale en fibres (%)

r élanement des fibres (longueur/diamètre)

ϕ_s fraction volumique des granulats dans le mélange

ϕ_m compacité maximale des granulats utilisés

Matrice	Matrice A	Matrice B	Matrice C
$(\phi_f)_{max}$ (%)	0	0.16	0.31

Tableau 6. Quantités maximales de fibres pour les trois matrices (approche rhéologique de [MAR 10])

3.2. Masses volumiques apparentes

Les masses volumiques apparentes mesurées après séchage des mortiers sont données dans les tableaux 7 à 9. Les masses volumiques apparentes des formulations contenant des fibres sont, dans la quasi-totalité, plus faibles que celles des mortiers non fibrés. Ces résultats sont tous cohérents avec les mesures des quantités d'air entraîné.

3.3. Propriétés mécaniques

Les résistances en flexion et compression sont données dans les tableaux 7 à 9. Les valeurs des résistances en compression sont comprises entre 80 et 100 MPa pour la quasi-totalité des formulations ; l'influence des fibres sur cette propriété est donc faible, avec une variation relative maximale de l'ordre de 20 %. On peut observer dans ces tableaux que la variation de la résistance en compression est liée à la quantité d'air entraîné. L'influence directe des fibres sur la résistance en compression peut donc être considérée comme négligeable.

Sur la résistance en flexion, l'influence des fibres augmente lorsque la fraction volumique de sable diminue. En l'absence de fibres, la résistance en flexion augmente quand la fraction volumique de sable augmente de 20 à 60 %. L'augmentation de la résistance en flexion due aux fibres est donc plus visible lorsque la fraction volumique en sable est la moins importante (20 %). De plus, la liaison entre fibre et matrice cimentaire est meilleure en l'absence de sable, les fibres sont donc plus efficaces. Cependant, lorsque la fraction volumique en fibres est comprise entre 0.4 et 0.8 %, l'influence de la fraction volumique de sable semble négligeable.

Fraction vol. de fibres (%)	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80
Masse vol. apparente (kg/m^3)	2240	2211	2214	2189	2188	2214	2133
Résistance en comp° (MPa)	101.1	90.7	90.7	90.8	99.2	105.8	85.4
Résistance en flex° (MPa)	10.4	11.5	12.2	12.8	12.7	13.5	13

Tableau 7. Propriétés mécaniques après 90 jours de cure (matrice avec 60 % sable)

3.4. Résistivité électrique

L'évolution de la résistivité électrique en fonction de la fraction volumique de fibres est visible pour les trois matrices cimentaires sur la figure 4. Leurs valeurs sont données dans le tableau 10. Pour une fraction volumique

Fraction vol. de fibres (%)	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80
Masse vol. apparente (kg/m^3)	2160	2070	2155	2009	2052	2073	2045
Résistance en comp ^o (MPa)	98.2	81.5	99.5	78.4	80.5	89.1	83.6
Résistance en flex ^o (MPa)	7	8.9	10.2	12.2	13.8	14.6	14.6

Tableau 8. Propriétés mécaniques après 90 jours de cure (matrice avec 40 % sable)

Fraction vol. de fibres (%)	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80
Masse vol. apparente (kg/m^3)	2055	2050	2026	1972	2018	-	-
Résistance en comp ^o (MPa)	90.8	94.7	84.7	88.2	100.4	-	-
Résistance en flex ^o (MPa)	4.2	9.1	11.4	11.6	13.3	-	-

Tableau 9. Propriétés mécaniques après 90 jours de cure (matrice avec 20 % sable)

de sable 60 %, l'effet des fibres sur la résistivité électrique est nettement moins efficace que lorsque la fraction volumique de sable est de 20 ou 40 %. Ce phénomène a été également observé dans [WEN 07] (figure 3 dans la référence), avec un changement de l'allure des courbes résistivité vs volume de fibres lorsque le rapport des masses de sable et de ciment est entre 0.75 et 1.

Pour les mélanges des matrices A et B, on peut également constater que la résistivité ne décroît plus que "légèrement" lorsque la fraction volumique est supérieure à 0.4 % ; on peut donc en conclure que les formulations avec des fractions volumiques de sable autour de 40 % et des fractions volumiques de fibres comprises entre 0.2 et 0.4 % présentent un compromis optimal entre leur coût/impact environnemental et leur résistivité électrique ; de plus, leurs performances mécaniques sont satisfaisantes.

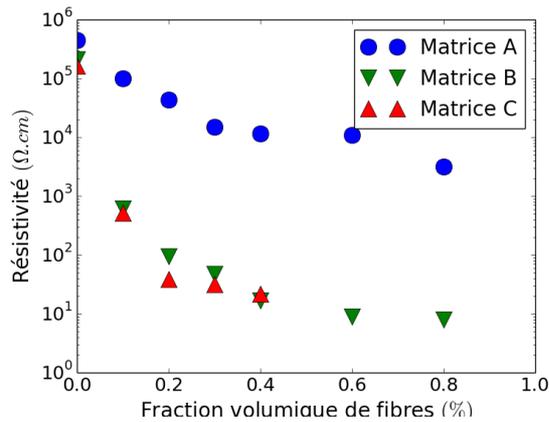


Figure 4. Résistivité électrique après 90 jours de cure

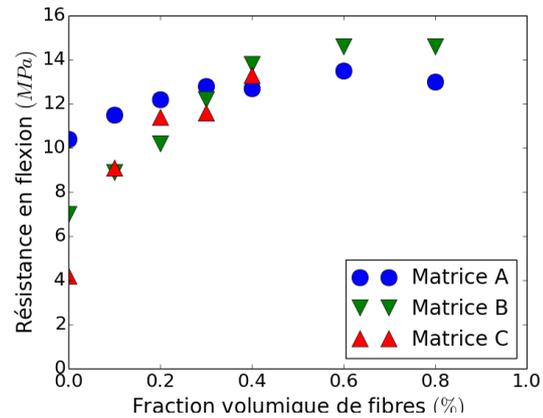


Figure 5. Influence des fibres sur la résistance en flexion

Fraction volumique de fibres (%)	Matrice A (60 % sable)	Matrice B (40 % sable)	Matrice C (20 % sable)
0	451 114.9	208 827.7	162 605.9
0.1	99 346.4	617.5	509.1
0.2	43 750.1	95.3	39.4
0.3	14 949.4	46.6	32.6
0.4	11 666.7	16.8	22.3
0.6	10 892.9	9.3	-
0.8	3 140.5	7.9	-

Tableau 10. Résistivité électrique après 90 jours de cure - résultats en Ωcm

4. Conclusions

Il est possible de formuler des mortiers présentant à la fois une très faible résistivité électrique, une consistance fluide et des résistances mécaniques élevées. Afin d'optimiser leur coût et leur impact environnemental, il est judicieux d'incorporer une quantité maximale de sable et une quantité minimale de fibres à ces formulations. Les résultats de cette étude démontrent que lorsque la fraction volumique de sable est limitée à 40 %, et non 60 % comme pour une formulation "typique", une fraction volumique de fibres comprise entre 0.2 et 0.4 % suffit à l'obtention d'une résistivité électrique de quelques Ωcm , contre $10E5 \Omega cm$ en l'absence de fibres. De plus, pour ces formulations, le dosage en super-plastifiant est raisonnable, ce qui est un atout supplémentaire quant au coût, à l'impact environnemental, et au risque de retard d'hydratation du ciment.

Les fibres de carbone peuvent ségréger en partie supérieure de l'échantillon à cause de leur masse volumique plus faible que celle du mélange cimentaire ; cependant, ce phénomène n'a pas été observé lorsque les quantités de sable et fibres respectent les recommandations données ci-dessus : fraction volumique de sable et de fibres de 40 % et 0.2-0.4 % respectivement.

Les résultats de [WEN 07] sont confirmés ; la percolation de la pâte de ciment au sein d'un matériau cimentaire est une condition nécessaire à l'obtention d'une faible résistivité électrique, notamment lorsque la fraction volumique en fibres est comprise entre 0.1 et 0.8 %.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier S.Meillère, K.Mahfoudhi et N.Favrie.

5. Bibliographie

- [BAE 10] BAEZA J., CHUNG D., ZORNOZA E., GARCÉS P., « Triple percolation in concrete reinforced with carbon fiber », *ACI Materials Journal*, vol. 107, n° 4, page396, 2010.
- [BAE 13] BAEZA F., GALAO O., ZORNOZA E., GARCÉS P., « Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites », *Materials & Design*, vol. 51, p. 1085 - 1094, 2013.
- [CHE 93] CHEN P., CHUNG D., « Carbon fiber reinforced concrete as an electrical contact material for smart structures », *Smart Materials and Structures*, vol. 2, n° 3, page181, 1993.
- [CHE 96a] CHEN P., CHUNG D., « Concrete as a new strain/stress sensor », *Composites Part B : Engineering*, vol. 27, n° 1, p. 11-23, 1996.
- [CHE 96b] CHEN P., CHUNG D., « Low-drying-shrinkage concrete containing carbon fibers », *Composites Part B-engineering - COMPOS PART B-ENG*, vol. 27, n° 3, p. 269-274, 1996.
- [FU 97] FU X., CHUNG D., « Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar », *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 9, p. 1313-1318, 1997.
- [HOU 05] HOU T., LYNCH J., « Conductivity-based strain monitoring and damage characterization of fiber reinforced cementitious structural components », p. 419-429, 2005.
- [MAR 10] MARTINIE L., ROSSI P., ROUSSEL N., « Rheology of fiber reinforced cementitious materials : classification and prediction », *Cement and Concrete Research*, vol. 40, n° 2, 2010.
- [WEN 06] WEN S., CHUNG D., « The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement », *Carbon*, vol. 44, n° 11, p. 2130 - 2138, 2006.
- [WEN 07] WEN S., CHUNG D., « Double percolation in the electrical conduction in carbon fiber reinforced cement-based materials », *Carbon*, vol. 45, n° 2, p. 263 - 267, 2007.
- [WOO 07] WOO L., KIDNER N., WANSOM S., MASON T., « Combined time domain reflectometry and AC-impedance spectroscopy of fiber-reinforced fresh-cement composites », *Cement and Concrete Research*, vol. 37, n° 1, p. 89-95, 2007.
- [XIE 96] XIE P., GU P., BEAUDOIN J., « Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres », *Journal of Materials Science*, vol. 31, n° 15, p. 4093-4097, 1996.
- [XU 01] XU Y., CHUNG D., « Silane-treated carbon fiber for reinforcing cement », *Carbon*, vol. 39, n° 13, 2001.
- [YAK 13] YAKHLAF M., SAFIYUDDIN M., SOUDKI K., « Properties of freshly mixed carbon fibre reinforced self-consolidating concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 46, p. 224-231, 2013.