
Caractérisation d'un béton fibré par méthode non destructive

JF. Lataste(*), M. Behloul(**), D. Breysse(*)

(*) Université Bordeaux 1 – CDGA (GHYMAC)
Avenue des facultés, bâtiment B18, 33405 Talence.
jf.lataste@cdga.u-bordeaux1.fr

(**) Lafarge
61 rue Belles feuilles, 75782 Paris Cedex.

RÉSUMÉ. Les travaux présentés dans l'article sont les résultats d'une étude paramétrique sur l'orientation des fibres métalliques dans un béton haute performance fibré. Des mesures de résistivité électrique sont réalisées sur des éprouvettes dont les fibres sont artificiellement orientées lors du coulage. L'exploitation des résultats prouvent la capacité de cette technique à caractériser la distribution des fibres de manière non destructive

ABSTRACT. Works presented in the article are parametric study results, on the steel fibre distribution, in a High Performance Fibre Reinforced Concrete (HPFRC). Electrical resistivity measurements have been done on samples whose fibres have been oriented during casting. Results interpretation proves the ability of the technique to characterise in a non destructive way, the distribution of fibres.

MOTS-CLÉS : Contrôle Non Destructif, béton de fibre, résistivité électrique, orientation, anisotropie.

KEYWORDS: Non Destructive Testing, Fibre Reinforced Concrete, electrical Resistivity, distribution, anisotropy.

1. Introduction

L'innovation dans les sciences de la construction passe en partie par le développement de nouveaux matériaux et la maîtrise de leurs propriétés. Le béton renforcé de fibres est l'un de ces matériaux. Les fibres augmentent la résistance mécanique du béton, réduisent son retrait plastique, augmentent sa résistance aux impacts et améliore sa résistance au feu. Avec ce matériau, les ingénieurs sont capables de projeter de nouvelles structures originales par leur design et leur conception, mais aussi par leurs capacités à résister aux diverses sollicitations extérieures (Pimienta *et al.*, 2004) (Behloul *et al.*, 2004).

Les caractéristiques de ce type de matériaux repose sur la présence de fibres qui peuvent être de différentes natures : métalliques, synthétiques, naturelles, fibres de verre ou de carbone... dans cette étude seuls les bétons de fibres métalliques sont considérées.

L'influence des fibres apparait de différentes manières selon les auteurs : par leur capacité à contrôler les fissures, comme des absorbeurs d'énergie, par leur capacité à transférer les charges, par leur résistance en traction, ... mais la plupart d'entre eux s'accordent à reconnaître que les paramètres conditionnant ces propriétés sont (outre la nature des fibres) leur densité volumique, et leur orientation (Zollo, 1997).

Si la densité de fibre est un paramètre a priori maîtrisable par la formulation du matériau, le facteur « orientation » reste difficile à évaluer, et la plupart des dimensionnements considérant les bétons renforcé de fibre se basent sur l'hypothèse d'une répartition des fibres aléatoire en orientation, et homogène dans la masse (Dupont *et al.*, 2005). En d'autres termes, tout est ramené à la notion de densité de fibre. Pourtant cette hypothèse peut être mise en défaut dans les certains cas : structure à géométrie complexe, proximité des bords, présence de reprise de bétonnage, ... De plus, la connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait les ingénieurs du bon dimensionnement de leur structure, voire qui permettrait l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation initiale.

A ce jour, il n'existe pas de méthode non destructive ergonomique de caractérisation des fibres dans le béton. Des résultats ont été acquis par l'utilisation d'outils de laboratoire tel que les rayons X, l'analyse d'image (Ferrara *et al.*, 2006). Des travaux récents (AFGC, 2002) s'orientent sur le dimensionnement optimisé par l'étude d'éléments tests coulés préalablement, puis détruits afin de contrôler directement les paramètres de répartition des fibres, afin de valider la formulation et les processus de réalisation des éléments.

Les résultats exposés dans cet article portent sur l'utilisation de la mesure de résistivité électrique pour la caractérisation avec une méthode non destructive, de l'orientation des fibres dans le béton.

2. Programme expérimental

2.1. Réalisation des corps d'épreuve

Il s'agit d'étudier huit dalles de 60x60cm² et de 2 à 5 cm d'épaisseur, constituées d'un béton de fibres métalliques de type Ductal® (à l'exception d'une seule considérée comme référence et composée de béton Ductal® non fibré). Le béton haute performance fabriqué est issu d'une formulation déjà utilisée par Lafarge sur certains ouvrages en service (Behloul *et al.*, 2004) (figure 1).

Tableau 1. *Caractéristiques (typiques) du béton Ductal® étudié*

Densité	2500 kg/m ³
Résistance en compression	180 MPa
Resistance en traction	8 MPa
Résistance post-pic	5 MPa
Module d'Young	50 000 MPa
Coefficient de poisson	0.2
Retrait	0
Coefficient de fluage	0.2
Dilatation thermique	12.10-6 m/(m.°C)

Les dalles diffèrent les unes des autres par le mode de coulage qui a été utilisé. Ce procédé est la manière retenue pour créer de la variabilité entre dalles (voire sur une même dalle) concernant la répartition et l'orientation des fibres. Ainsi un coulage du centre, d'un coin, de deux coins opposés ne vont pas induire la même disposition des fibres dans le béton, du fait de la proximité des bords, et des modes d'écoulement de la pâte (figure 2.). La fluidité de ce béton est mesurée à 235mm (après 20 chocs), les bétons testés ont entre 12 et 48 heures.



Figure 2. *Coulage d'une dalle -
Coulage au centre de la dalle.*

2.2. Mesures de résistivité électriques

Les mesures de résistivités électriques sont réalisées en aveugle (sans connaître à priori les modes de coulage). Le protocole de mesures est défini initialement et fixé pour tous les corps d'épreuve (Latasse, 2002). Il s'agit de mesurer la résistivité électrique apparente au moyen d'un dispositif quadripolaire carré de 5 ou 10 cm de côté (figure 3). L'injection d'un courant électrique associée à la mesure de la différence de potentiel permettant de calculer la résistivité apparente du matériau. Les mesures sont réalisées en chaque point pour différentes orientations du dispositif afin de caractériser sur une même zone les propriétés électriques dans différentes directions. Le béton étant un matériau isotrope électriquement à cette échelle de

mesure, toute différence de résistivité apparente en fonction de la direction investiguée traduit l'influence des fibres métalliques (conductrices par comparaison au béton). Ainsi, sur la base de ces mesures de résistivité on est capable de définir des axes plus ou moins résistifs qui vont permettre de remonter à l'orientation des fibres localement.

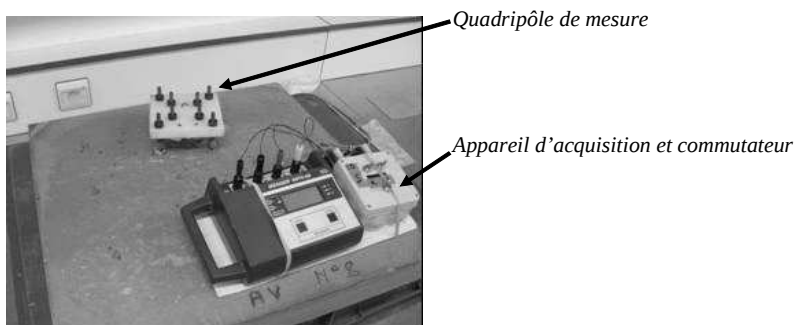


Figure 3. *Dispositif de mesure.*

Les deux dimensions de dispositif retenues (5 et 10 cm, respectivement notées Q5 et Q10) permettent d'investiguer différentes profondeurs depuis la surface. Les résultats obtenus pour les différentes profondeurs d'investigation étaient similaires qualitativement (un contraste moyen de résistivité apparente entre la surface et le fond est calculé à 1.54). Dans la suite du document nous ne distinguerons plus les différentes profondeurs d'investigation. Les données sont « refondues » ensemble afin d'améliorer l'interprétation par zone.

Neuf zones de mesures sont étudiées sur chaque dalle. Ceci afin de compléter l'évaluation des caractéristiques locales (à l'échelle de la mesure, c'est à dire avec le dispositif de 5 cm de coté le volume ausculté est de quelques centimètres cubes), par une évaluation des caractéristiques à l'échelle de la dalle.

Préalablement à toute analyse des résultats, l'étude des dérives, des bruits de mesures, de l'influence de biais (tel que la proximité des bords) a été menée afin de s'assurer de la représentativité des résultats de la méthode électrique. De plus, simultanément au coulage, des vidéos sont enregistrées afin d'avoir un élément de validation des mesures de résistivité par un contrôle direct de l'orientation des fibres. Les deux analyses sont menées parallèlement et indépendamment l'une de l'autre, puis les résultats sont finalement comparés.

3. Résultats

3.1. Analyse globale

L'analyse des résultats montre que le comportement électrique des bétons fibrés est très différent de celui du même béton sans fibre. En considérant les mesures « superficielles » (obtenues avec le dispositif de 5 cm de côté), on note que la résistivité moyenne pour le béton sans fibre est de 30.4 Ohm.m, elle est comprise entre 5.4 et 17.0 pour les bétons fibrés. Les valeurs de résistivité sur les bétons fibrés sont très contrastées entre dalles, zones, et orientations de la mesure. Pour le béton sans fibre la valeur moyenne est beaucoup plus constante sur toute la dalle et les orientations. Les coefficients de variations sont de 0.05 pour le béton sans fibre, et compris entre 0.13 et 0.30 selon les dalles pour les bétons fibrés (en intégrant toute position sur la dalle, et toutes orientations). En fait cette variabilité est aussi observable sur les extremums mesurés : valeurs entre 26.3 et 34.7 Ohm.m sur la dalle sans fibre, et 0.1 à plus de 22.8 (voire 41.0 !!) Ohm.m sur les dalles fibrées. Ces variations sont qualitativement identiques à celles observées avec le plus grand dispositif de mesure (de 10 cm de côté). Elles traduisent l'influence de la présence des fibres métalliques (très conductrices) tant par leur effet de masse (résistivités globalement plus faibles sur les bétons fibrés), que par leurs orientations (résistivités électriques contrastées selon les directions de mesures).

Si on considère la présence des fibres d'acier, elles représentent une voie privilégiée de circulation du courant électrique dans le béton. Toutefois en fonction des positions respectives des électrodes par rapport à « l'axe conducteur », cela peut se traduire sur la mesure par une augmentation ou une baisse de la résistivité apparente du matériau. La détermination de la résistivité du béton de fibre ne représente donc pas en soit l'information recherchée (elle est très variable selon le site de mesure). L'exploitation des contrastes paraît porter plus d'information, et permet d'accéder à la distribution et à l'orientation des fibres ; nous travaillons ainsi avec l'anisotropie électrique déduite des valeurs de résistivité mesurées.

De ces mesures brutes est extrait l'indicateur « anisotropie électrique locale » qui traduit une orientation particulière des propriétés électriques du matériau à l'échelle de la mesure : plus l'anisotropie est importante, plus les fibres sont orientées, et inversement. Les anisotropies maximales calculées (avec Q5) pour le béton non fibré sont de 0.045. Elles sont comprises entre 0.708 et 2.695 pour les bétons fibrés, sachant que 0 représente la valeur pour un matériau isotrope, et que des seuils d'anisotropie marquée ont été définis à ± 0.3 (Lataste, 2002). Ainsi l'anisotropie de la dalle sans fibre ne représente que le bruit de mesure, celles calculées sur les dalles fibrées sont les effets des fibres. Relativement à ces seuils d'anisotropie avérée, le pourcentage de valeur anisotrope est calculé sur les différentes dalles : 0% pour la dalle non fibrée, variant entre 50 et 90% pour les dalles fibrées. Ces tendances sont identiques pour les plus grandes profondeurs d'investigations (accessibles avec Q10).

3.2. Caractérisation de l'orientation des fibres

Pour aboutir à la description de l'orientation des fibres, les résultats¹ des mesures de résistivités sont donnés sous forme de diagramme radial présentant les valeurs de résistivités selon les directions de mesure de l'appareil. Sur ces diagrammes sont matérialisés l'axe de plus grande résistivité. L'intensité d'orientation des fibres (traduit par l'intensité de l'anisotropie électrique pour les différentes directions investiguées) est rendue par la longueur (à l'échelle) de l'axe de plus grande résistivité (figure 4.)

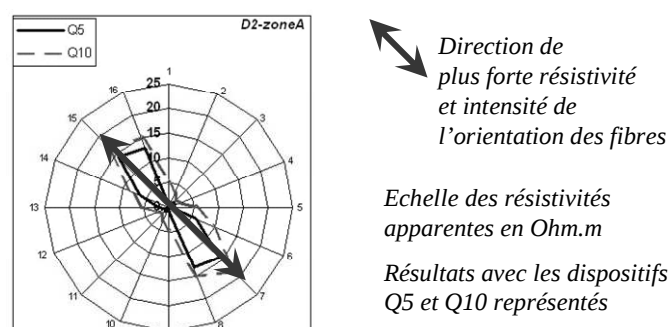


Figure 4. Mode de représentation de l'orientation et de l'intensité des propriétés électriques (à l'échelle d'une mesure) – variation des résistivités apparentes, en fonction des directions d'investigation.

On détermine ainsi l'orientation des propriétés électriques localement (sur une zone de mesure). Puis, l'assemblage des différentes zones investiguées par dalle (9 zones / dalles) permet de visualiser l'orientation générale des fibres sur la dalle entière. Elle est ensuite comparée aux éléments issus de l'étude visuelle réalisée lors du coulage. La figure présentée ci-dessous donne les résultats issus de l'analyse visuelle (traits pointillés traduisant l'axe d'orientation des fibres), localement et à l'échelle de la dalle, ainsi que les résultats des mesures électriques (axe de plus grande résistivité donné par la double flèche, et intensité de l'orientation des fibres (traduit par la longueur des doubles flèches)). On observe que sur les cas étudiés, les fibres sont orientées perpendiculairement aux axes de plus grande résistivité.

Pour la dalle 2, le coulage du centre explique que les fibres (loin des bords) se soient orientées perpendiculairement aux lignes de flux de l'écoulement. On observe que les fibres sont perpendiculaires aux axes rayonnants du centre de la dalle. L'intensité de l'anisotropie est à peu près constante sur la dalle traduisant bien le fait que l'écoulement du béton lors du coulage s'est fait de manière régulière selon toutes

¹ Seuls les résultats obtenus sur deux dalles, sur les huit auscultées, sont présentés dans ce document.

les directions. On peut alors penser que les zones de mesures sont suffisamment loin des bords pour que l'écoulement de la pâte de béton n'ait pas été influencée par les bords lors du coulage. Seule au centre de la dalle (lieu du coulage) l'intensité de l'anisotropie est plus faible.

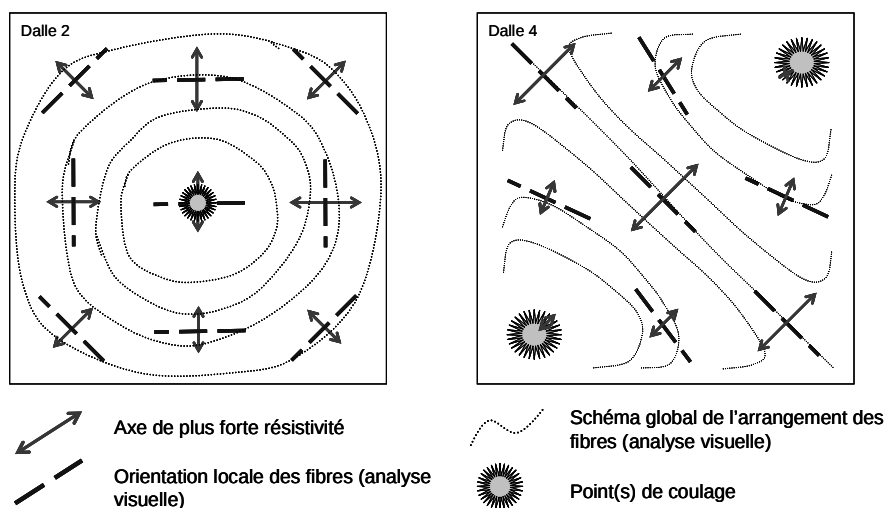


Figure 5. Schéma de distribution des fibres, déduite des mesures de résistivité, et issus de l'analyse visuelle.

Pour la dalle 4 on retrouve une orientation globale à 45° (sur la deuxième diagonale) de la surface auscultée. On note toutefois qu'en dehors de cette diagonale, l'orientation des fibres (déduite des mesures électriques) est légèrement désaxée. Ce point est confirmé par les observations lors du coulage, et confirme la bonne sensibilité de la technique électrique vis-à-vis de l'orientation. Les deux points de coulage sont marqués par la difficulté à faire ressortir clairement un axe prépondérant. Cela traduit vraisemblablement le manque d'organisation des fibres au point du coulage. Si on étudie l'intensité de l'orientation (l'anisotropie électrique), on observe que sur la zone de contact des deux flux de béton (lors du coulage) les fibres sont particulièrement orientées (valeurs de l'anisotropie supérieures à 2). Cette zone simule une reprise de bétonnage. En effet dans ce cas de figure, il est rare d'observer des fibres « couturant » le joint. Les fibres métalliques se placent ici encore perpendiculaires au flux lors du coulage, et, dans la zone de jonction, les fibres restent toutes parallèles entre elles.

4. Conclusion

Les mesures de résistivités électriques apparaissent comme un outil adapté à la caractérisation non destructive des bétons de fibres métalliques. La technique s'est avérée adaptée aux contraintes de travail sur ce type de matériau. Les résultats prouvent que cette méthode permet d'évaluer l'orientation des fibres. L'exploitation des résistivités apparentes mesurées sur différents axes donne déjà une indication sur l'orientation des fibres. Le travail sur les contrastes de résistivité électrique en fonction des directions investiguées (les anisotropies) sont de plus des indicateurs de « l'intensité d'orientation » des fibres.

5. Références

- AFGC-BFUP, *Ultra High Performance Fibre –Reinforced Concretes – Interim recommendations*, AFGC publications, France, 2002.
- Behloul M., Lee K.C., Etienne D., « Seonyu Ductal® footbridge », *Symposium AFGC*, Avignon, France, April 26-28 (2004) 6p.
- Dupont D., Vandewalle L., « Distribution of steel fibres in rectangular sections », *Cement and Concrete Composites*, 27 (2005), pp. 391-398.
- Ferrara L., Meda A., « Relationship between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements », *Material and Structure*, 39 (2006), pp. 411-420.
- Lataste JF., *Evaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesures de résistivité électrique*, Thèse de l'université Bordeaux 1 (2002), 294p.
- Pimienta P., Chanvillard G., « Retention of the mechanical performances of Ductal® specimens kept in various aggressive environments », *Symposium AFGC*, Avignon (France), April 26-28 (2004) 6p.
- Zollo R.F., « Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development », *Cement and Concrete Composites*, 19 (1997) pp. 107-122.