

Propriétés électriques et capacité d'auto-détection d'un béton haute performance renforcé par des fibres métalliques amorphes

Théophile Bouillard^{1,2}

¹Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA)

²Laboratoire Matériaux et Durabilité de la Construction (LMDC)

RESUME

Dans le cadre du projet Cigéo, l'Andra étudie, comme solution alternative aux bétons armés, des bétons renforcés par des fibres résistantes à la corrosion. L'objectif de ce travail de thèse est d'optimiser et de caractériser des bétons haute performance renforcés par des fibres métalliques amorphes, dans le but de substituer, du moins partiellement, les armatures dans le béton armé. En plus de l'apport sur les performances mécaniques, ces fibres sont aussi utilisées pour le monitoring de l'endommagement du béton à partir de mesures électriques. L'article se divise ainsi en deux parties, la première est consacrée à la compréhension des propriétés électriques des bétons, et la deuxième à son potentiel d'auto-détection.

Mots-clefs : Béton fibré, Fibres métalliques amorphes, Flexion, Auto-détection.

I. INTRODUCTION

L'Andra a la responsabilité du projet de stockage géologique profond Cigéo, dans lequel les déchets radioactifs seront stockés dans des galeries souterraines. Le réseau de galeries sera situé à environ 500 m de profondeur dans une formation argileuse stable et imperméable. Les galeries s'étendront sur environ 15 km², avec une longueur cumulée de 270 km et permettront de stocker environ 83 000 m³ de déchets. Ce stockage est prévu sur plusieurs milliers d'années. A l'issue de la phase d'exploitation, les galeries seront scellées et les interventions humaines ne seront plus possibles. De ce fait, les enjeux liés à la durabilité et la surveillance des éléments structuraux sont importants. Les alternatives au béton armé classique pourraient permettre d'accroître la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures. C'est dans cette optique que l'Andra a financé une thèse sur l'étude d'un béton haute performance renforcé par des fibres résistantes à la corrosion. En effet, l'ajout de fibres dans le béton peut permettre de réduire en partie les armatures, et donc de réduire les risques liés à la corrosion notamment la production de dihydrogène dans ce milieu anoxique.

L'un des objectifs de ce travail est de mieux comprendre les propriétés électriques des différents bétons étudiés. Dans ce cadre, un suivi de la résistivité électrique des bétons subissant un séchage progressif a été réalisé. L'étude est réalisée dans le but de développer un « smart material » ou « matériau intelligent » en français. Le principe du smart material traduit la capacité d'auto-détection d'un matériau, c'est-à-dire sa capacité à renseigner sur son état de contrainte, de

déformation et/ou d'endommagement par des mesures non destructives. Dans cette étude, c'est la réponse électrique du béton qui est exploitée. Pour le moment, ces essais d'auto-détection ont été réalisés sur des éprouvettes à l'état saturé, dans la suite de ces travaux, ces mêmes essais seront étendus avec des degrés de saturation variables. En effet, il sera montré que le degré de saturation a un impact majeur sur les propriétés électriques du béton.

II. MATERIAUX

Cinq formulations ont été étudiées pour montrer l'impact du dosage en fibres et de leurs dimensions sur les propriétés du béton. Pour l'ensemble des formulations, les bétons sont autoplaçants de classe SF1 selon la norme NF EN 12350-8, avec une classe de résistance C60/75 selon la norme NF-EN 12390-3. La méthode pour mettre au point les formulations a été de travailler avec quasiment le même squelette granulaire pour toutes les compositions pour se focaliser sur l'effet des fibres. Cependant, le dosage en superplastifiant a été ajusté pour maintenir des maniabilités similaires. Le détail des compositions est donné dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Détail des formulations

Désignation Composition	BR	FF20- 30L6	FF20- 20L6	FF30- 30L6	FF30- 20L6
Ciment (kg/m ³)	450	450	450	460	460
Filler (kg/m ³)	45	45	45	45	45
Sable (kg/m ³)	984	984	984	984	984
Gravillon (kg/m ³)	672	672	672	659	659
Fibres (kg/m ³)	0	20	20	30	30
SP (kg/m ³)	4,2	6,6	6,5	7,45	7,35
Eau (kg/m ³)	187	187	187	187	187
Étalement au cône d'Abrams (cm)	65	64	65	57	58
E/C	0,42	0,42	0,42	0,41	0,41
RI	0	0,342	0,227	0,513	0,342

Les fibres métalliques amorphes utilisées sont commercialisées par Saint-Gobain SEVA sous le nom de FIBRAFLEX. Elles sont caractérisées par une résistance à la traction de 1400 MPa et une forte adhérence à la matrice cimentaire. Elles sont réputées résister à la corrosion et mises en œuvre dans des milieux particulièrement agressifs. Deux dimensions de fibres ont été retenues pour cette étude : les « F30-L6 » (30×1,6×0,029 mm) et les « F20-L6 » (20×1,6×0,029 mm). L'indice de renforcement RI, renseigné dans le tableau 1 ci-dessus est souvent utilisé pour caractériser les bétons fibrés. Il est calculé conformément à l'équation (1).

$$RI = V_f \times L / d_{eq} \quad (1)$$

Avec, d_{eq} , le diamètre équivalent de la fibre, qui est égal à $\sqrt{4be/\pi}$ (b, la largeur, et e, l'épaisseur des fibres), V_f , le dosage volumique en fibres (en %), et L, la longueur de la fibre.

III. RESISTIVITE ELECTRIQUE DES BETONS EN CURE ET PENDANT UN SECHAGE PROGRESSIF

Méthode

La première campagne expérimentale a pour but de suivre l'évolution de la résistivité des différentes formulations en fonction de leur degré de saturation. Dans cette optique, 3 éprouvettes cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ont été préparées pour chacune des compositions étudiées. Après le coulage, les éprouvettes ont été placées dans une salle de cure à 20°C et 90%HR et ont été démoulées après 24h. Ces conditions de cure ont été maintenues pendant 28 jours, puis les éprouvettes ont été placées en étuve pour un séchage progressif. La température de l'étuve a été fixée initialement à 50°C , puis a été montée à 80°C pour accélérer le processus de séchage jusqu'à la stabilisation de la masse des éprouvettes. Tout au long de la campagne, les masses ont été mesurées pour suivre l'évolution du degré de saturation. Comme la température affecte aussi la résistivité électrique du béton ((Liu and Presuel-Moreno, 2014) - (Elkey and Sellevold, 1995)), avant chaque mesure, les éprouvettes ont été au préalable recouvertes de film plastique et maintenu à température ambiante pendant 24h.

Les mesures de résistivités électriques ont été réalisées avec un résistivimètre « Ohmega » commercialisé par MDS. Pour réaliser la mesure, l'éprouvette est placée entre deux plaques métalliques qui servent d'électrodes. Des éponges humidifiées sont intercalées entre l'éprouvette et les plaques métalliques, permettant ainsi d'améliorer le contact entre les deux. La première étape consiste à évaluer la résistance électrique intrinsèque du système de mesure. Ainsi, une première mesure sans échantillon est réalisée. Ensuite celle-ci est placée au centre du dispositif et la mesure est réalisée. Enfin, une autre mesure sans échantillon est faite. La résistance du béton est alors déduite en soustrayant la moyenne des deux mesures à vide à la mesure avec l'éprouvette.

Résultats

Après 28 jours de cure humide, juste avant que les éprouvettes ne soient placées en étuve, leur résistivité à l'état saturé a été mesurée. Le tableau 2 illustre les résultats obtenus.

TABLEAU 2. Résistivité à 28j à l'état saturé

	BR	FF20-30L6	FF20-20L6	FF30-30L6	FF30-20L6
ρ_{28j} (k Ω .cm)	$38,09 \pm 1,38$	$22,42 \pm 1,41$	$27,43 \pm 2,51$	$17,38 \pm 0,84$	$22,83 \pm 1,17$

Le béton de référence (BR) est caractérisé par la résistivité électrique la plus élevée. Ne contenant pas de fibre, les propriétés électriques sont essentiellement régies par les caractéristiques de la microstructure et de la nature de la solution interstitielle. Dans ce cas, la conductivité est qualifiée d'électrolytique, c'est-à-dire qu'elle est due au déplacement des ions dans la solution interstitielle (Whittington et al., 1981). Pour les bétons renforcés de fibres (BRF), la conductivité électrolytique cohabite avec la conductivité électronique. Cette dernière est induite par le mouvement des électrons dans les matériaux conducteurs, en l'occurrence les fibres.

Le dosage et l'élanement des fibres impactent la résistivité électrique des BRF. Pour une même géométrie de fibre, c'est la formulation avec un dosage plus important qui présentera une résistivité plus faible. Et pour un même dosage, c'est la fibre la plus longue qui engendrera une résistivité plus faible. Comme le montre la figure 1, il existe une relation linéaire entre la résistivité et l'indice de renforcement (RI). Plus l'indice de renforcement est élevé, plus la résistivité est faible. En effet,

avec des fibres plus longues, la probabilité d’occurrence d’un cheminement plus ou moins continu pour les électrons est élevée (Chiarello and Zinno, 2005). Cette théorie probabiliste, appelée théorie de la percolation permet d’expliquer ce phénomène (Sassani et al., 2017).

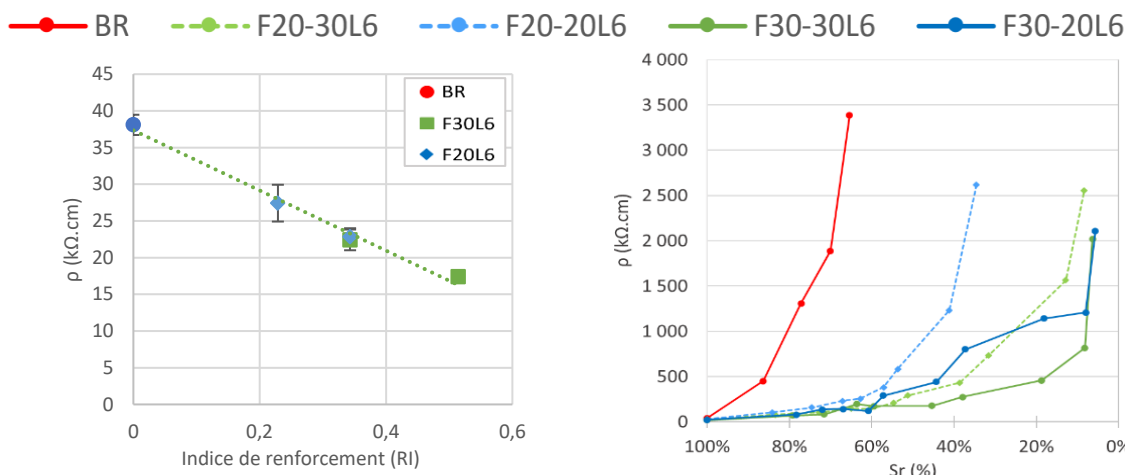


FIGURE 1. Résistivité à 28 jours, à l’état saturé en fonction de RI

FIGURE 2. Résistivité en fonction du degré de saturation (Sr)

La figure 2 illustre l’évolution de la résistivité en fonction du degré de saturation (Sr). Lorsque que le BR est séché, Sr diminue, les pores se vident petit à petit de la solution interstitielle qui est remplacée par de l’air. Le matériau devient alors de plus en plus électriquement isolant et assez rapidement la résistance est trop élevée pour pouvoir être mesurée avec le matériel disponible. En-dessous de 65% de saturation, il n’y a plus assez de connectivité par le biais de la solution interstitielle pour que les ions circulent en phase aqueuse. Il en découle une très forte augmentation de la résistivité après une courte période de séchage.

Pour les BRF, il faut descendre à des valeurs de degré de saturation plus faibles pour observer une variation significative de la résistivité. Jusqu’à 60% de degré de saturation, les résistivités restent du même ordre de grandeur. C’est en dessous de 60% de saturation que des changements significatifs peuvent être observés. Les fibres contribuent à la conductivité du béton du fait de leur capacité à faire transiter les électrons. A l’état saturé, les électrons circulent de fibres en fibres de 3 manières. La première par contact direct entre deux fibres (s’il y a lieu), la deuxième par effet tunneling et la dernière en étant relayés par les ions présents dans la solution interstitielle. Lorsque le béton est suffisamment sec, ces échanges se font plus difficilement. A partir d’un certain seuil de saturation, la résistivité augmente drastiquement. Cette augmentation apparaît d’autant plus précocement que les fibres sont plus courtes et que le dosage est plus faible. Pour toutes les formulations, on peut remarquer un degré de saturation seuil à partir duquel la résistivité augmente rapidement. Dans le cas du béton sans fibre, ce seuil est atteint très tôt car l’évaporation de l’eau interstitielle entraîne une diminution de l’interconnectivité entre les pores. Alors que les fibres peuvent faire le pont à travers une zone sèche vers une zone contenant encore de la solution interstitielle. Par exemple, pour le BR, entre l’état saturé et 86% de saturation, la résistivité a été multipliée par 11,2. A contrario, les formulations renforcées par des fibres ont vu leurs résistivités être multipliées par seulement 3,2 ; 3,5 ; 3,8 et 3,5 pour des degrés de saturation de 83%, 84%, 79%, 78% et les formulations F20-30L6, F20-20L6, F30-30L6 et F30-20L6 respectivement. Cela montre que

la conductivité des BRP est bien moins impactée par la variation de degré de saturation, et par conséquent, que la conductivité est majoritairement électronique.

IV. POTENTIEL D'AUTO-DETECTION SOUS EFFORTS DE TRACTION PAR FLEXION

Méthode

Pour mettre en évidence le potentiel smart material des différentes formulations, des essais de traction par flexion 3 points en chargement cyclique ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques ($100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$) conservées en salle de cure à 20°C et 90% HR pendant 28 jours. Pour localiser la fissuration, ces éprouvettes ont été entaillées à la scie sur une profondeur de 17,5 mm et une largeur de 3 mm à mi-travée de l'éprouvette. Pour le suivi des propriétés électriques, un pont de Wheatstone a été utilisé. Un tel montage permet de déterminer une résistance électrique inconnue et par le même principe, de quantifier précisément de faibles variations d'une résistance électrique. Le principe consiste à brancher dans une boucle 4 résistances, parmi celles-ci, 3 ont des valeurs ajustables et 1 résistance a une valeur inconnue (ici celle du béton). Au milieu de la boucle, un multimètre y est branché pour mesurer la différence de potentiel entre les deux branches. Au début de l'essai, les deux branches sont équilibrées en réglant les 3 potentiomètres afin d'obtenir une différence de potentiel (V_{b0}) la plus proche possible de 0 V. On admet comme postulat que l'endommagement du béton impacte sa résistance électrique avec pour effet de déséquilibre le pont. Ainsi, l'initiation d'une fissure va entraîner un déséquilibre du pont et ainsi faire apparaître une différence de potentiel (ΔV). Il est donc possible de suivre l'évolution de la résistance électrique du béton par le biais de la différence de potentiel au milieu de la boucle du pont de Wheatstone.

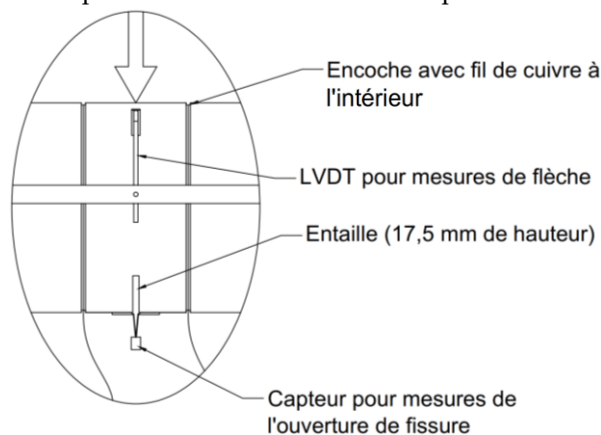


FIGURE 3. Installation des électrodes

Pour l'application du champ électrique au béton, des électrodes externes ont été installées. A cette fin, des fils de cuivre de 0,8 mm de diamètre encerclant l'éprouvette ont été mis en place à 25 mm de part et d'autre de la mi-travée. Pour faciliter la mise en place et pour améliorer le contact entre le béton et ces électrodes, deux fines gorges ont été taillées dans le béton, et une peinture conductrice a été appliquée avant d'y loger les fils de cuivre. Le schéma de l'installation est présenté sur la figure 3.

L'essai a été inspiré des travaux de T. Ferdiansyah (Ferdiansyah et al., 2022). Il s'agit d'un essai de traction par flexion 3 points dont le scénario de chargement comporte 5 cycles de chargement - déchargement contrôlés par la vitesse d'ouverture de la fissure à raison de $30 \mu\text{m}/\text{min}$ dans les deux sens. Ces cycles se sont déclenchés à différents pourcentages du pic de chargement (F_{max}), ce dernier ayant été déterminé par une campagne d'essais préliminaires. Un premier cycle a été réalisé avant le pic de charge, plus précisément lorsque la charge a atteint 60% de F_{max} , dès lors l'éprouvette a été déchargée jusqu'à 1 kN. Les quatre autres cycles ont lieu dans le domaine post pic et ont été déclenchés à 80%, 60%, 40% et 20% de F_{max} . Pour chaque boucle, la phase de déchargement a été poursuivi jusqu'à une force de 1 kN.

Résultats

Les courbes Force-CMOD présentées sur les figures 4 et 5 illustrent la réponse mécanique des différentes formulations. Les cycles de chargement-déchargement entraînent des boucles d'hystérésis. Lors du premier cycle, le chargement équivaut à 60% de la charge maximale, de ce fait, le béton n'est pas endommagé car la courbe Force-CMOD évolue de manière quasi linéaire. Durant la phase de déchargement, la courbe suit la même pente que pendant chargement. Il est en de même pour le début du 2^{ème} cycle. C'est seulement lorsque la charge se rapproche du pic que la courbe n'est plus linéaire, indiquant ainsi que le béton est à présent irrémédiablement endommagé.

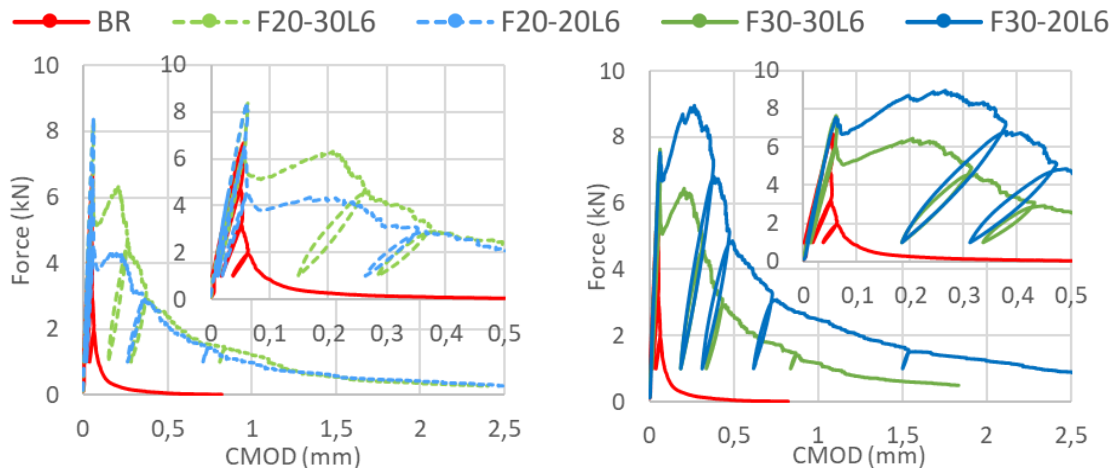


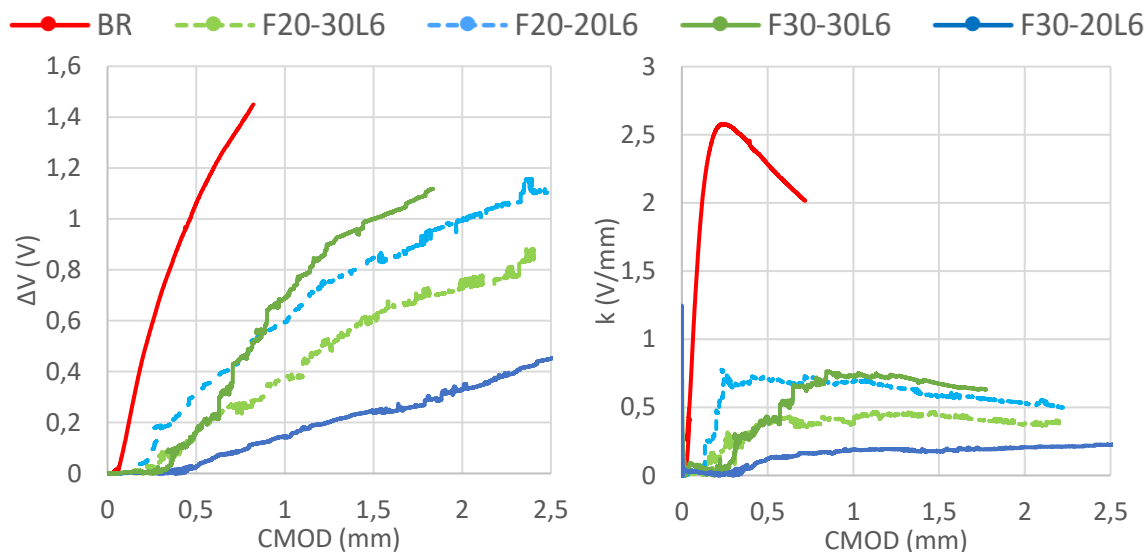
FIGURE 4. Force en fonction de la CMOD – formulations à 20 kg/m³

FIGURE 5. Force en fonction de la CMOD – formulations à 30 kg/m³

Le BR offre une faible capacité de déformation et une chute rapide de la capacité portante post-pic. Sans fibre, le béton offre qu'une faible résistance à la propagation de la fissure. De ce fait, les cycles s'enchaînent rapidement avec de faibles valeurs de CMOD. La réponse des BRF en post-pic est significativement différente. Les cycles ont lieu pour des valeurs de CMOD beaucoup plus importantes que pour le BR. Une fois que le pic est atteint, les premières microfissures se sont développées et de leur coalescence résulte une ou plusieurs macrofissures au fond de l'entaille. Pendant la phase de déchargement, la fissure se referme partiellement sans revenir à la valeur initiale car le matériau est endommagé. La pente de la courbe force-CMOD est alors plus faible que pendant le cycle précédent, ce qui indique une perte de raideur de l'éprouvette, conséquence de l'endommagement. Le comportement des bétons fibrés pendant le troisième cycle est particulier. En effet, un comportement durcissant est observé, la charge continue à augmenter alors que les fissures s'ouvrent davantage. Ce phénomène se produit pendant ce cycle car la CMOD est alors dans une plage où sont les fibres les plus efficaces (entre 0,1 mm et 0,2 mm). Pour les derniers cycles, le béton est dans un état d'endommagement avancé, les fibres confèrent encore une résistance résiduelle mais sont de moins en moins efficaces car elles rompent les unes après les autres jusqu'à la fin de l'essai.

La figure 6 illustre l'évolution de la différence de potentiel ΔV en fonction de la CMOD. Les courbes ΔV - CMOD des formulations fibrées ont toutes la même évolution qui est divisée en trois phases. Dans un premier temps, la réponse est quasi nulle : le matériau n'est pas assez endommagé pour donner une réponse électrique significative. Il faut attendre une CMOD de l'ordre de 0,15 mm pour

les formulations à 20 kg/m³ et de l'ordre de 0,2 mm pour les formulations à 30 kg/m³ pour amorcer une sensibilité. A partir de ce stade, la relation entre ΔV et la *CMOD* devient plus ou moins linéaire jusqu'à la fin de l'essai. Les résultats montrent que lorsque l'ouverture de la fissure augmente, ΔV augmente également, ce qui traduit une augmentation de la résistance électrique entre les deux électrodes. Le BR montre la meilleure sensibilité à cette variation, car pour une *CMOD* donnée, le ΔV correspondant est plus élevé. En l'absence de fibres, l'endommagement du béton entraîne de plus forte variation de résistance électrique. Contrairement au béton fibré, l'ouverture de la fissure atteint rapidement une valeur critique à partir de laquelle il n'y a plus de contact entre les lèvres de la fissure entraînant ainsi une discontinuité occupée par l'air. Dans le cas des BRF, malgré l'ouverture de la fissure, les fibres continuent d'assurer à la fois une continuité structurelle mais aussi une continuité électrique entre les deux lèvres de la fissure. Cette continuité est assurée jusqu'à la rupture de la fibre. Cependant, d'autres phénomènes entrent en jeu. Lorsque les fibres sont sollicitées, elles s'allongent entraînant ainsi une augmentation progressive de leur résistance électrique. Une fois que la contrainte atteint la résistance à la traction de la fibre, celle-ci casse et n'assure plus son rôle de transfert et de contraintes et d'électrons de part et d'autre de la fissure. Toutefois, il est toujours possible que des électrons parviennent à circuler grâce à l'effet tunnel dans le cas où les deux faciès de rupture de la fibre sont encore très proches. Une fois que les deux parties de la fibre sont assez éloignées, le pont est rompu et donc la résistance globale du béton augmente.

FIGURE 6. ΔV en fonction de la *CMOD*FIGURE 7. k en fonction de la *CMOD*

Le facteur de jauge (k) présenté sur la figure 7 permet de caractériser le potentiel d'auto-détection d'un matériau. Ce facteur k correspond au ratio $\Delta V/CMOD$. Plus la valeur de k est élevée, plus le matériau est considéré comme sensible. Avec un facteur de jauge plus élevé, le matériau a la capacité de renseigner des informations plus précisément sur son état par le biais de ses propriétés électriques. Le facteur de jauge du BR augmente drastiquement après avoir atteint le pic mais diminue significativement à partir de 0,2 mm de *CMOD*. Pour les BRF, la sensibilité est quasi nulle avant d'atteindre un certain niveau d'endommagement. Mais il tend à se stabiliser assez rapidement. La stabilité du facteur de jauge est un point important dans l'application du monitoring. En effet, avec un facteur de jauge stable, il est possible de lier directement ΔV à la

CMOD et ce, indépendamment de l'état structurel du matériau. Au contraire, si le facteur de jauge n'est pas stable sur l'ensemble de l'essai, cela signifie que la relation entre ΔV et la CMOD n'est plus linéaire et qu'il n'est donc plus possible de passer directement de l'un à l'autre.

V. Conclusion

Cette contribution a permis de mettre en évidence le potentiel d'auto-détection du béton via des mesures électriques et de mieux en comprendre les phénomènes physiques qui y conduisent. Les mesures de résistivités à l'état saturé ont montré qu'il existe une corrélation entre l'indice de renforcement (RI) et la résistivité électrique. En séchant progressivement les éprouvettes, il a été montré qu'il y a un seuil critique de séchage à partir duquel la résistivité augmente drastiquement. Ce seuil critique, directement lié à la théorie de la percolation, est atteint plus rapidement pour les formulations dont le dosage en fibres est plus faible et avec des fibres plus courtes. Ainsi, il a été possible de montrer l'importance de la conductivité électronique, c'est-à-dire apportée par les fibres, par rapport à la conductivité électrolytique, c'est-à-dire apportée par la solution interstitielle contenue dans les pores. Enfin, la capacité d'auto-détection a été investiguée sur des éprouvettes en flexion 3 points. Ces essais réalisés sur des échantillons saturés ont montré qu'il faut atteindre une fissuration déjà bien initiée avant de pouvoir mesurer un changement significatif des propriétés électriques. Cependant, dans le cas des BRF, une fois ce stade atteint, il existe une relation plus ou moins linéaire entre la variation de la résistance électrique et l'ouverture de fissure. Quand cette dernière augmente, la résistance augmente aussi et inversement. Plusieurs phénomènes physiques induits par les fibres ou par la matrice cimentaire elle-même sont à l'origine d'une telle relation. Vis-à-vis de la sensibilité des mesures, le BR est capable de d'avoir une réponse électrique dès les plus faibles ouvertures de fissures et a une sensibilité plus élevée. D'autre part, en plus de meilleures performances mécaniques, les BRF gardent un facteur de jauge beaucoup plus stables mais plus faible que celui du BR. Les essais d'auto-détection ont ici été réalisés sur des bétons saturés, mais d'autres essais sont en cours avec des éprouvettes partiellement séchées. Ces essais permettront de vérifier dans quelles mesures les BRF et le BR sont capables de donner des informations sur leurs états lorsque le béton n'est pas saturé en eau.

VI. Références

- Chiarello, M., Zinno, R., 2005. Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cem. Concr. Compos.* 27, 463–469. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.001>
- Elkey, W., Sellevold, E.J., 1995. Electrical resistivity of concrete.
- Ferdiansyah, T., Balayssac, J., Turatsinze, A., n.d. Mesure de la variation de la résistance électrique du béton par pont de Wheatstone : application au suivi de la fissuration 38, 130–133.
- Liu, Y., Presuel-Moreno, F.J., 2014. Normalization of temperature effect on concrete resistivity by method using Arrhenius law. *ACI Mater. J.* 111, 433–442. <https://doi.org/10.14359/51686725>
- NF EN 12350-08 (2019) : Essais pour béton frais - Partie 8 : Béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône, NF EN 12390-3 (2003) : Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes
- Sassani, A., Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K., Arabzadeh, A., Taylor, P.C., 2017. Influence of mix design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive concrete. *Constr. Build. Mater.* 152, 168–181.
- Whittington, H.W., McCarter, J., Forde, M.C., 1981. The conduction of electricity through concrete. *Mag. Concr. Res.* 33, 48–60. <https://doi.org/10.1680/mac.1981.33.114.48>