

Fissuration des ouvrages en béton armé

Auscultation par mesure de résistivité électrique

Jean-François LATASTE
CDGA, Université Bordeaux I
Laboratoire d'études et de recherches
sur les matériaux (LERM)

Denys BREYSSE
Colette SIRIEIX
Michel FRAPPA
CDGA, Université Bordeaux I

Jean-Pierre BOURNAZEL
Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux
(LERM) Soletanche-Bachy

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la caractérisation par auscultation non destructive des ouvrages en béton et en béton armé, le CDGA et le LERM travaillent en collaboration au développement de la méthode de mesure des résistivités électriques. Cette technique consiste à évaluer, à l'aide d'un dispositif quadripolaire carré, la résistivité apparente d'un parement à partir d'une mesure de surface, ce qui permet de caractériser son anisotropie électrique.

En terme de durabilité, la fissuration est généralement identifiée comme un facteur pénalisant pour les structures en béton armé. La détection, mais aussi la caractérisation complète de la fissuration, présente donc un intérêt certain pour la connaissance de l'état d'endommagement d'un ouvrage.

Les travaux de modélisation, complétés par des mesures sur des éléments de structures artificiellement ou réellement altérés, permettent d'illustrer l'aptitude de la technique à détecter et localiser les fissures. Le protocole d'investigation permet aussi la caractérisation partielle de la nature des fissures.

DOMAINE : Ouvrages d'art – Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

As part of the program to characterize concrete and reinforced concrete structures by means of non-destructive investigation techniques, the CDGA and LERM research organizations have been working jointly to develop the electrical resistivity measurement method. This technique consists of evaluating, with the help of a four-probe square device the apparent resistivity of structural cladding on the basis of a surface measurement, which then allows characterizing the corresponding electrical anisotropy.

In durability terms, cracking is typically identified as a penalizing factor for reinforced concrete structures. Both the detection and complete characterization of cracking are thus of significant interest in comprehending a structure's state of damage.

The modeling work presented herein, supplemented by measurements conducted on either artificially or physically-altered structural elements, serves to illustrate the capacity of the technique to detect and locate cracking. This investigation procedure also allows for the partial characterization of crack typology.

FIELD: Structural engineering - Engineering sciences.

Introduction

La gestion du patrimoine bâti est une problématique identifiée depuis quelques années. L'objectif est de minimiser les coûts d'entretien d'un ouvrage, notamment en effectuant des opérations mineures de maintenance, avant que les désordres n'atteignent un seuil de gravité qui nécessiterait des moyens trop importants (en terme de coûts, de matériel ou de temps). Les maîtres d'ouvrages souhaitent donc contrôler l'état de leurs ouvrages et, le cas échéant, évaluer de manière fiable et précise leur degré d'endommagement. Pour cela, ils peuvent avoir recours à différentes techniques, qui permettent de caractériser un ouvrage soit à l'échelle de la structure, soit à l'échelle d'un élément de la structure, soit au niveau du matériau.

La fissuration des ouvrages en béton et en béton armé correspond généralement à une altération des propriétés mécaniques ou physiques du matériau. La connaissance exacte de ce type de désordre (localisation, densité, typologie) doit permettre en outre d'en comprendre la cause et de définir le type de réparation à envisager.

Cet article illustre la capacité de la méthode de mesure des résistivités électriques appliquée à une surface à caractériser l'endommagement des bétons et, notamment, l'état de fissuration.

Présentation de la problématique

Fissuration des ouvrages en béton armé

La présence de fissures sur un parement ou une structure en béton armé témoigne généralement d'un endommagement de cet élément. Les causes peuvent être de différentes natures : mécaniques (application de contraintes non prévues lors du dimensionnement, chocs, etc), physiques (variations de températures) ou chimiques (réaction des composants du béton avec des agents extérieurs créant un gonflement du matériau, par exemple les attaques sulfatiques), ou bien encore le processus de retrait du béton.

Mais une fissure peut aussi être à l'origine d'une altération du béton. À l'échelle du matériau, le rôle de l'enrobage est d'assurer une protection aux armatures. L'enrobage ralentit, voire empêche, la progression d'agents extérieurs susceptibles de corroder les armatures (chlorures par exemple), et maintient autour de l'acier des conditions favorables à sa passivation (Raharinaivo et *al.*, 1998). Quoique les phénomènes de transfert dans la matrice cimentaire soient essentiellement diffusifs, l'augmentation locale de la perméabilité du béton liée à la présence d'une fissure est préjudiciable. Cela correspond en effet à un affaiblissement de la fonction d'étanchéité que doit assurer l'enrobage. Une fissure peut provoquer l'amorçage ou l'accélération du processus de pollution du béton et des aciers et elle constitue un chemin d'accès privilégié des éléments agressifs vers le cœur du matériau (Laurencet et *al.*, 2000). Elle est dans tous les cas un facteur aggravant de l'endommagement des structures en béton, et nécessite toujours une attention particulière. La corrosion des armatures est en effet le mécanisme qui provoque le plus de dégâts dans les structures en béton armé.

Différentes études ont été menées afin de préciser les différents paramètres décrivant les fissures et leur processus de formation (Gérard et *al.*, 1997). Les fissures primaires sont créées lors d'un chargement inhabituel du matériau, et les fissures secondaires (moins importantes) apparaissent dans un second temps et contribuent à la fermeture partielle des fissures primaires. De la même manière, en se plaçant du point de vue du transfert des fluides dans le matériau, on peut distinguer les fissures actives des fissures passives. Gérard et *al.* appellent fissures actives celles qui affectent les propriétés mécaniques et de transfert du matériau ; les fissures passives, qui perturbent essentiellement les propriétés mécaniques du matériau, ne sont activées que lorsque la structure est mise en charge. Selon la norme NF P 95-103 (AFNOR, 1993), une fissure est dite active quand son ouverture évolue en fonction des sollicitations de différentes natures (thermiques, hydriques, mécaniques) ; une fissure est dite passive quand son ouverture ne varie plus de façon sensible même quand elle est soumise aux diverses sollicitations.

La densité de fissuration et l'ouverture sont des paramètres qui conditionnent la corrosion des aciers, mais cette dépendance débute dès la présence d'une seule fissure et dès les faibles ouvertures. Par exemple, pour une ouverture de 0,1 mm et un enrobage de 2 cm, une fissure a une influence sensible sur l'amorçage de la corrosion de l'acier (Raharinaivo et *al.*, 1986). Le caractère traversant d'une fissure est aussi identifié comme un paramètre préjudiciable. En effet, dans ce cas, les fluides peuvent librement et régulièrement circuler dans la fissure, ce qui contribue à lixivier rapidement le matériau et à entraîner de plus en plus loin les fluides agressifs. Dans une fissure non traversante, on observe généralement un auto-colmatage partiel de la fissure par les salissures et les produits de corrosion qui vont alors freiner à nouveau la pénétration d'agents extérieurs (Laurencet et *al.*, 2000).

La norme NF P 95-103 distingue les catégories microfissure, fissure ou crevasse en fonction de l'ouverture. Les dispositions constructives indiquées dans les règlements européens, qui doivent assurer la durabilité des ouvrages, ont été élaborées pour limiter l'ouverture des fissures. Il semble toutefois que des dispositions prises pour limiter l'activité ou la profondeur des fissures puissent contribuer à la viabilité des ouvrages.

Auscultation des ouvrages fissurés

L'étude d'un ouvrage fissuré répond généralement à la même démarche que celle adoptée lors de l'évaluation de son état général. On peut ainsi définir plusieurs degrés d'informations qui sont choisis par le maître d'ouvrage, et dont dépendent le choix de la technique d'investigation. Pour l'étude de la fissuration les différents niveaux sont : la détection et l'identification du désordre, sa localisation et la définition de son étendue, la typologie du désordre (fissure traversante, délaminage), sa

géométrie (profondeur, ouverture, étendue, etc.) et son intensité (densité de fissuration, activité, etc.) puis son évolution dans le temps (Lataste et *al.*, 2001a). Chaque technique a donc son domaine de validité et son degré de précision. Mais il faut noter que, dans le cas des fissures, une étude fine en laboratoire (mesure de la perméabilité sur carotte par exemple) n'est pas envisageable, le prélèvement par carottage perturbant trop fortement les caractéristiques de la fissure étudiée. L'analyse se fait donc généralement sur site avec des techniques non destructives. Le tableau I indique les principales techniques d'investigations appropriées à l'étude des fissures *in situ*. On notera les niveaux des informations obtenues grâce aux techniques, le terme typologie désignant les anomalies mises en évidence par la méthode, et le terme caractérisation indiquant le type d'information que l'on peut obtenir.

TABLEAU I
Techniques non destructives de détection et de caractérisation de la fissuration
d'après (OECD-NEA, 1998) (AFGC-COFREND, 2002)

| Méthodes | Détection | Localisation | Typologie | Caractérisation | Commentaires |
|---|-----------|--------------|---|--|--|
| Inspection visuelle / vidéo | partielle | partielle | - fissures débouchantes en surface uniquement | - orientation - état d'humidité - ouverture - suivi dans le temps (vidéo) | <i>inadaptée pour détecter les délaminages</i> |
| Interférométrie (holographie, speckle) | oui | oui | - fissures débouchantes - délaminages | - orientation | <i>interf. speckle adaptée à l'auscultation de grandes surfaces</i> |
| Acoustique (ondes de surface impact-écho) | oui | oui | - fissures débouchantes - délaminages | - profondeur des délaminages - suivi de propagation (*) | <i>sensible à la profondeur de fissuration (*) émission acoustique</i> |
| Ultrasonores | oui | oui | - fissures débouchantes | - profondeur - densité de fissuration | |
| Thermographie infrarouge | oui | oui | - fissures débouchantes et actives - délaminages | | <i>adaptée à l'auscultation de grandes surfaces</i> |
| Résistivité électrique | oui | oui | - fissures débouchantes - délaminages | - orientation - état d'humidité - profondeur | |

La détection des fissures débouchantes et des délaminages, ainsi que leur caractérisation (longueur, profondeur, évolution, etc.), ont été identifiées comme des besoins par les maîtres d'ouvrages (OECD-NEA, 1998). Actuellement, il ne semble pas exister de méthode capable de fournir toutes les informations recherchées. La solution réside donc dans la combinaison de différentes méthodes. Généralement, on cherche à détecter les anomalies avec une méthode permettant une étude étendue, puis on caractérise plus finement le désordre au moyen d'une ou plusieurs autres techniques.

Mesure de la résistivité électrique d'un béton

Résistivité électrique des bétons

Le béton est un matériau hétérogène composé de granulats et d'une matrice cimentaire, cette dernière comportant une porosité. D'un point de vue électrique, on distingue généralement deux phases, la phase solide qui correspond à la partie résistante, et la phase liquide qui est essentiellement celle qui va permettre la circulation du courant électrique dans le matériau. Cette représentation ne fait pas de distinction entre les granulats et la matrice qui, bien qu'ils soient tous deux solides, ne tiennent vraisemblablement pas le même rôle dans la conduction électrique. Cette représentation très schématique permet toutefois d'interpréter les variations de résistivités apparentes à l'échelle qui nous intéresse.

La résistivité, et son inverse la conductivité, dépendent donc fortement de la quantité de fluide interstitiel présent, de sa concentration ionique, mais aussi de sa capacité à circuler au sein de la matrice. Ainsi, on considère que la résistivité permet de caractériser en partie la porosité du béton : son volume, la tortuosité de son réseau, et le degré d'inter-connectivité des pores (Andrade et *al.*, 2000).

Les fissures et délaminages représentant des voies privilégiées de circulation des fluides au sein du matériau, la mesure électrique est adaptée à la détection et à la caractérisation de ces désordres.

Les mesures de résistivité électrique du béton servent actuellement de mesures complémentaires destinées à affiner l'interprétation des autres mesures électriques possibles, c'est-à-dire la détermination du potentiel de corrosion (servant à localiser les zones de corrosion active probable des armatures) (RILEM⁽¹⁾) (ASTM, 1997) et la mesure de la résistance de polarisation (permettant d'estimer une vitesse de corrosion des aciers) (RILEM⁽²⁾) (Elsener et *al.*, 1997). Les résultats exposés plus bas illustrent la capacité de la méthode de mesure des résistivités à être utilisée comme une méthode à part entière d'évaluation de l'état d'endommagement des structures en béton et en béton armé. Pour un protocole de mesure adapté, l'état de fissuration d'une structure peut être qualifié, et les derniers développements laissent augurer des capacités de la technique à caractériser finement les fissures.

Dispositif de mesure

Dans le cadre des travaux menés sur l'évaluation non destructive (END) de l'état d'endommagement des structures en béton et en béton armé, un dispositif de mesure quadripolaire a été développé. Cet appareil porte-électrodes de section carrée permet de réaliser des mesures pour différentes directions d'injection du courant électrique et de caractériser ainsi l'anisotropie électrique du matériau. Les dimensions de cet appareil (5 cm de côté) ont été choisies afin que la mesure ne soit pas perturbée par la présence des granulats, tout en permettant une étude des premiers centimètres de béton, c'est-à-dire du béton d'enrobage, qui est généralement le siège des altérations. Les électrodes métalliques sont équipées d'éponges humides afin d'assurer un bon couplage électrique avec la surface auscultée. Le protocole de mesure a été défini par des études spécifiques, pour assurer un maximum de précision (Lataste et *al.*, 2001b).

Le dispositif est connecté à un résistivimètre (modèle DET4/5D, société MEGGER) qui injecte un courant constant entre les deux électrodes d'injection et qui mesure la différence de potentiel entre les électrodes de mesure (fig. 1 et 2). On en déduit alors la résistivité apparente du matériau (ρ_a) en multipliant le rapport de la différence de potentiel sur l'intensité par un facteur géométrique (k) qui dépend de la géométrie du dispositif.

Détection, localisation et caractérisation partielle des fissures

Détection et localisation de fissure et délaminage sur site

Dans un premier temps, nous allons illustrer les capacités de la technique à détecter et localiser les endommagements de type fissure-délaminage.

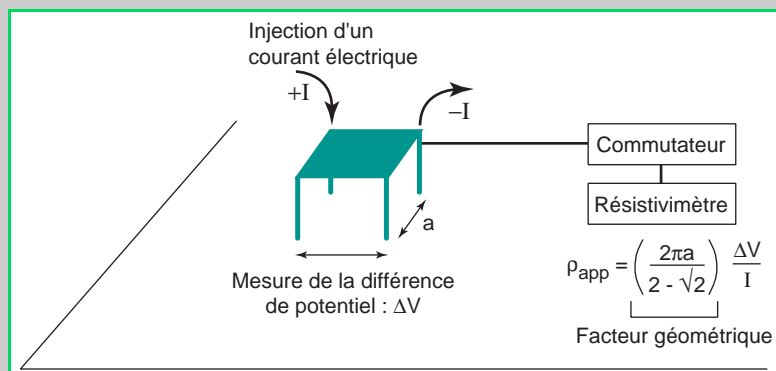
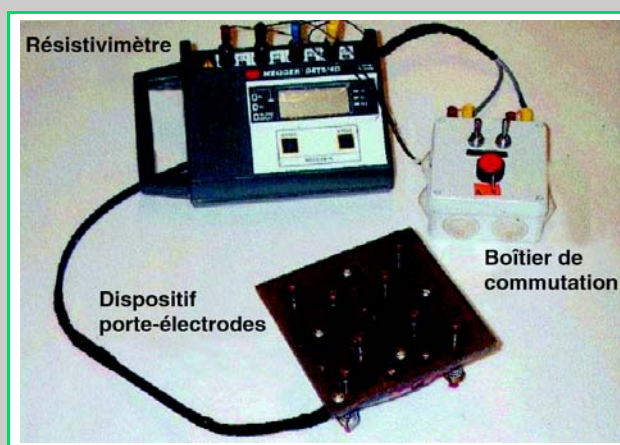


Fig. 1 - Schéma de principe du quadripôle carré.

Fig. 2 - Matériel de mesure.



L'étude a été réalisée sur la partie supérieure d'une dalle de toit-terrasse. Le béton de la zone auscultée est âgé de plus de 40 ans et exposé à l'atmosphère naturelle. Les mesures ont été réalisées plus particulièrement sur une zone de 1 m x 0,5 m, reconnue préalablement par auscultation visuelle et acoustique (Villesuzanne, 1999). Le choix de la zone est fonction de la présence d'une large fissure en travers de la dalle et de secteurs délaminés (fig. 3). Les mesures réalisées selon un pas régulier de 5 cm permettent d'établir la carte d'isoresistivité apparente de la surface. La résistivité apparente moyenne du béton dans les zones saines est de 800 Ohm-mètres ($\Omega.m$). Les résistivités apparentes dans les zones délaminées sont en moyenne de 1400 $\Omega.m$, avec des valeurs maximales au-delà de 2600 $\Omega.m$. À la verticale de la fissure et à ses abords, les résistivités apparentes moyennes sont respectivement de l'ordre de 200 et 600 $\Omega.m$. L'interprétation des variations de résistivités apparentes montre la sensibilité de la méthode à la présence d'une fissure et au délaminage. La zone délaminée apparaît sur la carte comme plus résistante que le béton environnant ; de même, la résistivité apparente à proximité de la fissure est plus faible. Dans le cas étudié, on notera que la localisation des désordres recherchés correspond au relevé initial et que, de plus, la réponse en variation de résistivité électrique est différente selon la nature de l'endommagement.

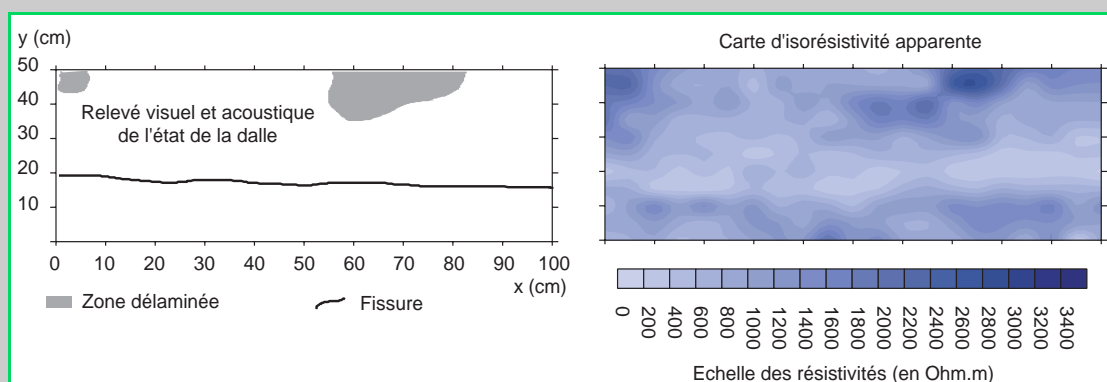
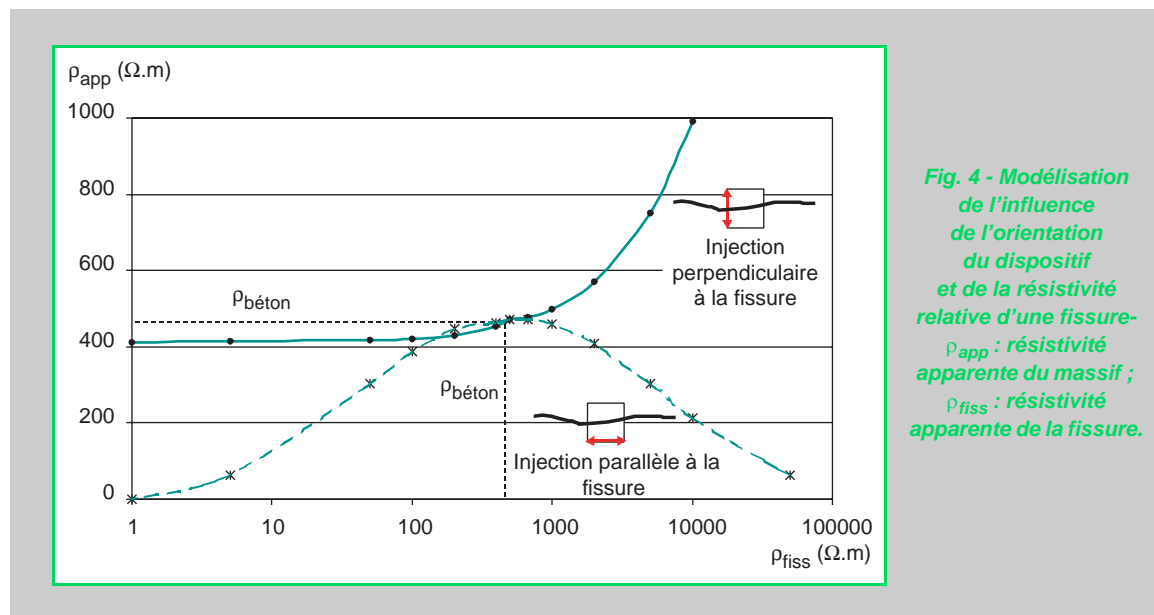


Fig. 3 - Auscultation d'une dalle sur site.

Approche numérique de la caractérisation des fissures

Une modélisation par éléments finis en trois dimensions a permis d'évaluer la sensibilité de la technique à différents paramètres caractérisant la fissuration (Sirieix et *al.*, 2002). Le calcul réalisé avec le logiciel CÉSAR-LCPC a porté sur l'étude de l'influence de la résistivité de la fissure et de l'orientation du dispositif par rapport à l'anomalie. La résistivité électrique du béton a été fixée à $480 \Omega.m$, celle de la fissure variant de $1 \Omega.m$ à $50 k\Omega.m$. Simultanément, la modélisation a pris en compte l'orientation du dispositif par rapport à la fissure en considérant deux cas distincts : 1 - l'injection du courant électrique est parallèle à la fissure, et 2 - l'injection est perpendiculaire à la fissure. Notons que, dans tous les cas, le dispositif est considéré comme « à cheval » sur la fissure. En fonction des différents paramètres, on relève la résistivité apparente du massif modélisé. Le résultat de ces calculs est porté sur la figure 4.



Le graphique montre comment les paramètres résistivité de la fissure et orientation du dispositif influent sur la mesure de résistivité apparente. Dans tous les cas, on vérifie que si la résistivité apparente de la fissure est voisine de celle du béton, la détection du défaut n'est en pratique pas possible. On observe que, dans le cas d'une injection du courant électrique perpendiculaire à la fissure, la mesure de résistivité détecte nettement l'anomalie uniquement si celle-ci est plus résistante que le béton, et cela se traduit par une augmentation de la résistivité apparente mesurée. Dans le cas d'une injection du courant électrique parallèle à la fissure, la résistivité mesurée est dans tous les cas inférieure à la résistivité apparente du béton. La différence apparaît comme d'autant plus importante que le contraste de résistivité est fort.

L'interprétation des réponses du quadripôle en fonction des deux paramètres étudiés est liée au rôle tenu par la fissure, qui va se comporter selon le cas comme un guide des lignes de courant ou comme une barrière isolante. Le courant électrique circulant dans le béton, représenté par des lignes de courant, va toujours circuler à travers les milieux les plus conducteurs entre les électrodes d'injection. Les différents cas sont interprétés sur la figure 5.

Les résultats obtenus illustrent l'intérêt d'exploiter les mesures des résistivités électriques pour les deux directions d'injection du courant électrique. En effet, on constate que, pour un travail réalisé pour une seule direction d'injection, la détection de l'anomalie n'est pas toujours possible (cas de la fissure conductrice, pour une injection perpendiculaire à celle-ci). De plus, dans le cas de l'injection du courant parallèlement à la fissure, il est impossible de connaître directement sa résistivité relative. On montre bien ici la complémentarité des deux mesures, qui permettent de détecter et de caractériser la nature électrique de la fissure. L'opération est peu contraignante et rapide (permutation d'un commutateur), et permet une interprétation beaucoup plus complète des mesures.

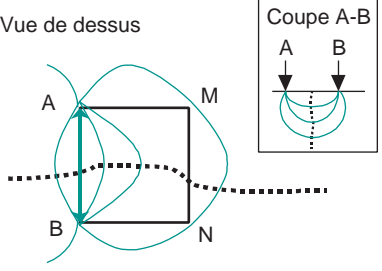
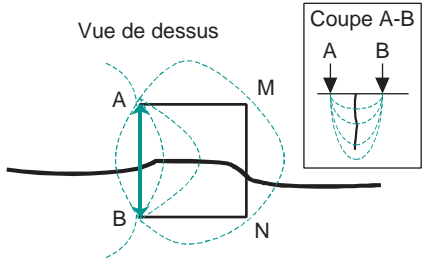
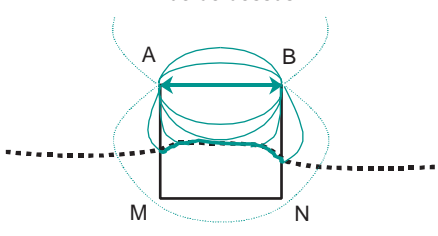
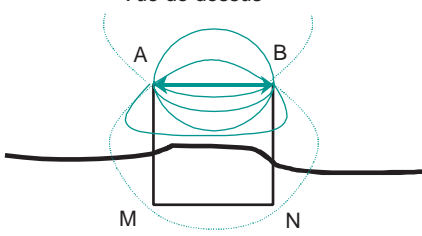
| | Fissure conductrice ($\rho < 480 \text{ Ohm.m}$) | Fissure isolante ($\rho > 480 \text{ Ohm.m}$) |
|--|---|--|
| Dispositif perpendiculaire à la fissure | <p>Vue de dessus</p>  <p>Coupe A-B</p> <p>Les lignes de courant traversent la fissure. Celle-ci se comporte comme une résistance faible, placée en série. Son influence sur la résistivité globale mesurée est très faible.</p> | <p>Vue de dessus</p>  <p>Coupe A-B</p> <p>La fissure se comporte comme une barrière isolante gênant fortement la circulation du courant. Elle se comporte comme une résistance élevée, placée en série ; les lignes de courant vont en profondeur pour la contourner. Elle a pour effet de créer une forte différence de potentiel entre les 2 côtés de la fissure (donc entre M et N).</p> |
| Dispositif parallèle à la fissure | <p>Vue de dessus</p>  <p>Les lignes de courant, cherchant toujours le chemin le moins résistant, vont être canalisées par la fissure conductrice. Il en résulte que la différence de potentiel créée de l'autre côté de la fissure (côté MN) est très faible. Cela se traduit par une faible résistivité apparente mesurée.</p> | <p>Vue de dessus</p>  <p>La fissure va dans ce cas tenir le rôle d'une barrière isolante empêchant les lignes de courant de circuler du côté MN. La différence de potentiel créée entre M et N est artificiellement basse. On mesure donc une résistivité apparente faible.</p> |

Fig. 5 - Distribution du courant autour d'une fissure.
- A et B sont les électrodes d'injection du courant électrique.
- M et N sont les électrodes de mesure de la différence de potentiel.

De manière générale, à l'échelle de la mesure (centimétrique), on fait l'hypothèse simplificatrice qu'une fissure sèche (donc *a priori* inactive et non traversante) est isolante, et qu'une fissure humide, voire saturée, est au contraire conductrice.

Conclusion partielle

La mesure de résistivité, sous réserve d'un protocole adapté, permet donc de détecter et de localiser différents types de désordres sur les structures en béton et en béton armé. La détermination de l'état d'humidité d'une fissure, possible en étudiant les résistivités apparentes, est une donnée importante pour la caractérisation de l'état d'endommagement du béton.

Détermination de la profondeur de fissuration

Approche numérique

Le travail sur la caractérisation géométrique de la fissuration débute par une modélisation numérique sous CÉSAR-LCPC, qui a pour objet l'étude de l'influence de l'ouverture et de la profondeur des fissures. À ce stade de l'étude, la modélisation est simplifiée en travaillant sur une section du système quadripôle-parement. Cette « coupe » correspond au plan orthogonal à la surface auscultée et passant par les deux électrodes d'injection, dans le cas d'une injection perpendiculaire à une fis-

sure isolante (résistivité infinie). L'étude est donc réduite à un problème en deux dimensions. La résistance apparente est mesurée au droit des points d'injection, comme cela est fait dans le cas de dispositifs bipolaires (fig. 6). Les largeurs des fissures sont de 0,1, 0,5 et 1 mm, les profondeurs de 0,5, 2,5 et 5 cm, le cas de référence étant celui où les dimensions de la fissure sont respectivement de 0,5 mm et 2,5 cm. Les résultats obtenus (portés sur la figure 7) montrent, dans le cas étudié, l'absence totale de dépendance de la résistivité apparente par rapport à l'ouverture des fissures. Par contre, on note une relation quasi-linéaire entre la mesure électrique et la profondeur de fissuration.

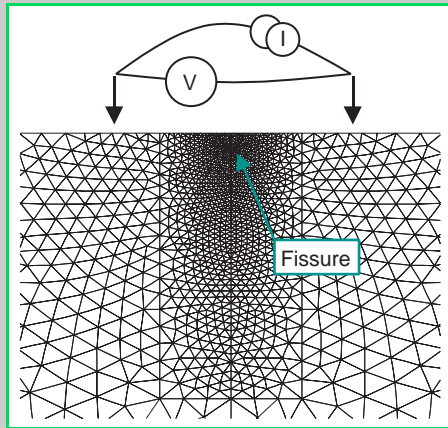


Fig. 6 - Étude par éléments finis de la fissuration.

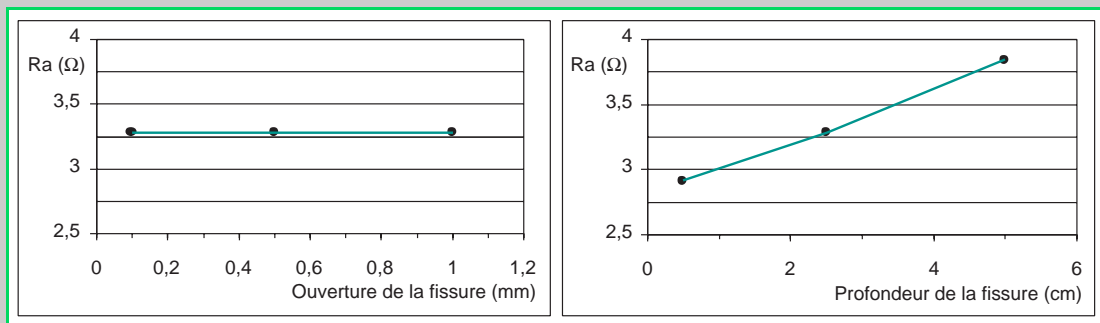


Fig. 7 - Influence de l'ouverture et de la profondeur d'une fissure sur la résistance électrique apparente du béton. Étude numérique.

Validation des résultats sur fissuration artificielle

Une poutre en béton armé de 3 m x 0,24 m x 0,15 m a été coulée afin de valider les résultats issus des simulations numériques. Le corps d'épreuve comporte sur sa face supérieure (15 cm de large) et dans la partie non armée trois films plastiques isolants devant représenter des fissures « idéales » (c'est-à-dire planes, ouvertes et régulières). Comme l'indique le tableau II, deux fissures sont disposées transversalement à la poutre avec des profondeurs respectives de 2,5 et 5 cm. La troisième fissure, profonde de 2,5 cm, est mise en place parallèlement à l'axe longitudinal de la poutre.

Les mesures de résistivités électriques sont réalisées selon le profil axial de la surface supérieure de la poutre, et dans les deux configurations du dispositif. La configuration alpha correspond à une direction d'injection transversale, et bêta à une direction d'injection longitudinale. La résistivité apparente moyenne du béton mesurée est de 80 Ω .m.

Le profil des résistivités apparentes en fonction de l'axe longitudinal de la poutre est présenté sur la figure 8. Les positions et orientations des fissures permettent d'observer la cohérence des résultats des mesures.

TABLEAU II
Présentation de la poutre artificiellement fissurée

| Fissure | A | B | C |
|-------------|---|---|---|
| Orientation | Perpendiculaire à l'axe longitudinal de la poutre | Perpendiculaire à l'axe longitudinal de la poutre | Parallèle à l'axe longitudinal de la poutre |
| Ouverture | 0,2 mm | 0,2 mm | 0,2 mm |
| Profondeur | 2,5 cm | 5,0 cm | 2,5 cm |

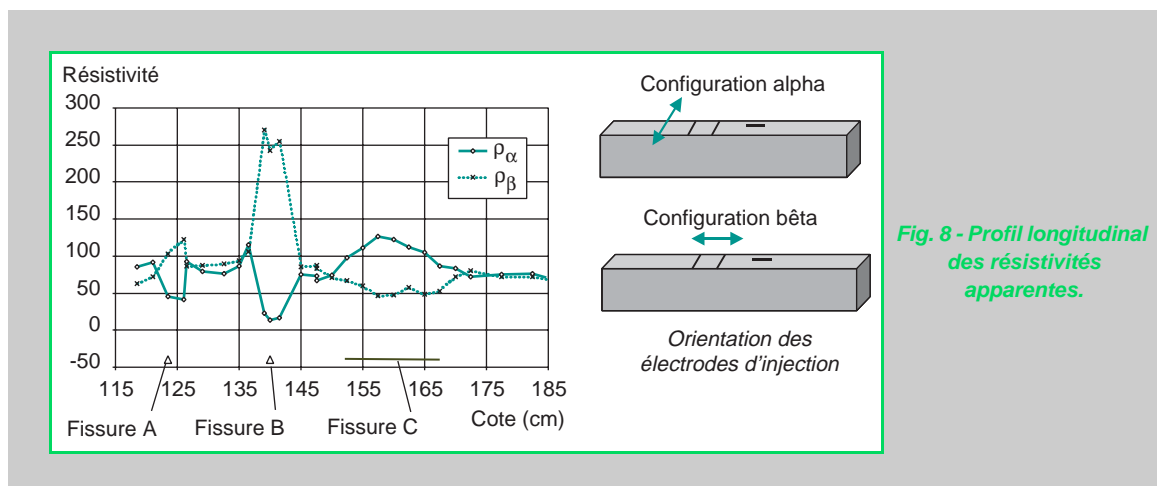


Fig. 8 - Profil longitudinal des résistivités apparentes.

On note en effet que, lorsque la mesure est réalisée parallèlement à l'axe d'une fissure (cas de la configuration alpha sur les fissures A et B, et de la configuration bêta sur la fissure C), la résistivité apparente est plus faible que la moyenne. À l'inverse, dans le cas contraire (injection du courant perpendiculairement à l'allongement de la fissure, c'est-à-dire dans les cas de la configuration bêta au droit de A et B et de alpha avec C), la résistivité apparente est plus élevée au droit de l'hétérogénéité. En outre, on constate que, plus la fissure est profonde, plus la variation de résistivité apparente est importante (cf. les résistivités apparentes sur les fissures A et B). Concernant la distance de détection, on constate que la fissure perturbe la résistivité apparente lorsqu'elle est située à une distance du centre du dispositif à peu près égale à l'écartement entre les électrodes.

Dans tous les cas, les mesures sont significativement perturbées et l'effet des fissures sur la résistivité apparente dépasse largement celui lié à la variabilité de la résistivité du béton.

Pour caractériser la fissuration, on étudie alors l'anisotropie électrique du matériau. Le rapport des résistivités apparentes donne le coefficient d'anisotropie (A_n) du matériau. Le tracé du profil du logarithme décimal du coefficient d'anisotropie ($dA_n = \log_{10} A_n$) est donné sur la figure 9. Le graphique permet de vérifier que, sur les zones homogènes (c'est-à-dire entre les fissures), dA_n est proche de 0, valeur caractéristique de l'isotropie du matériau. La valeur de dA_n (sur le cas étudié : $A_n = \rho_\alpha / \rho_\beta$) est positive ou négative selon l'orientation des fissures par rapport à la disposition de l'appareil lors de la mesure.

La valeur absolue de dA_n au droit des fissures A et C est identique à la précision des mesures près : la déviation est de 0,50. Pour la fissure B, on trouve $|dA_n| = 1,25$. Il semble donc que ce traitement de la mesure fasse ressortir une relation entre les propriétés électriques du matériau et la profondeur des désordres de type fissure.

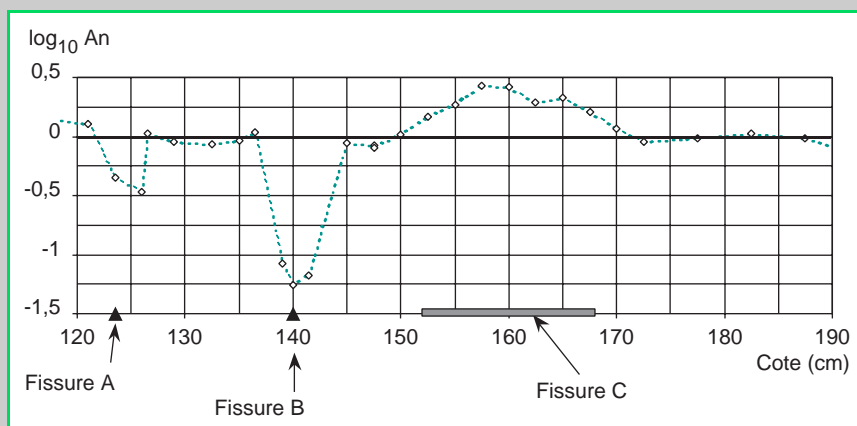


Fig. 9 - Profil longitudinal du logarithme décimal de l'anisotropie $\log_{10} A_n$

Cette représentation permet d'avoir simultanément, pour un profil, la position des fissures (le long de l'axe), leur orientation par rapport à une orientation de l'appareil, connue lors de l'inspection (le signe de la variation), et une indication (amplitude de la variation) sur la profondeur des fissures.

Extension de l'étude aux fissures réelles

Les résultats obtenus sur une poutre réelle en béton armé comportant des fissures artificielles étant concluants, l'étude a été orientée sur un cas plus représentatif d'une situation d'endommagement réel. Une poutre de caractéristiques identiques à celles de la poutre de l'étude précédente a été coulée. Le ferrailage a été légèrement sous-dimensionné afin d'obtenir de la fissuration sous faibles sollicitations mécaniques. Après le relevé de l'état initial et un repérage de la position des aciers par mesures électromagnétiques, elle a été soumise à une flexion quatre points. Pour les différents paliers de chargement, la fissuration créée sur la fibre tendue de la poutre, dans la partie centrale, présentait différentes ouvertures et profondeurs. Les mesures de résistivités apparentes ont été réalisées selon un protocole défini et un pas régulier, sur la moitié de la longueur d'une des faces latérales (fig. 10).

Les résistivités apparentes ont été relevées pour les deux configurations : pour alpha, les électrodes de courant ont été orientées dans le sens de la hauteur de la poutre et, pour bêta, parallèlement à l'axe longitudinal. Les cartes (fig. 11) présentent les variations de résistivités apparentes sur la zone auscultée quand la poutre est soumise à un effort de 67,5 kN (charge de rupture théorique calculée à 58 kN). Le positionnement des aciers et des fissures (référéncés de f1 à f6 sur les figures) est indiqué. Une fissure, remarquable par le fait qu'elle concentre l'essentiel des déformations, présente une ouverture plus importante que les autres (f2). Elle est représentée sur la figure par un trait plus épais. La partie « muette » de la carte correspond au secteur non sondable de la poutre du fait de la proximité des appareils d'appuis.

On établit, de la même manière que précédemment, la carte du logarithme décimal de l'anisotropie (fig. 12).

Sur ces cartes, on observe dans tous les cas l'influence notable des cadres transversaux sur la résistivité apparente, notamment dans la configuration alpha. L'influence moindre de l'armature longitudinale, présente sur toute la longueur de la poutre, est liée à la proximité des bords qui perturbent aussi la résistivité apparente. L'effet de bord est visible sur le gradient croissant de résistivité sur la partie haute de la poutre ($Y < 45$). Il semble que seules les deux fissures situées à des abscisses supérieures à 125 cm soient clairement détectées (dont la fissure f2, la plus ouverte). Celles-ci se trouvent à proximité de la zone de rupture et on peut donc supposer qu'elles sont plus « actives » que les fissures plus éloignées. Pour ces fissures, la résistivité apparente est inférieure à celle du béton en configuration alpha, et légèrement supérieure en configuration bêta. Cela semble indiquer qu'il s'agit de fissures isolantes, donc vraisemblablement sèches. Ce point est cohérent avec les observations réalisées lors de la mesure.

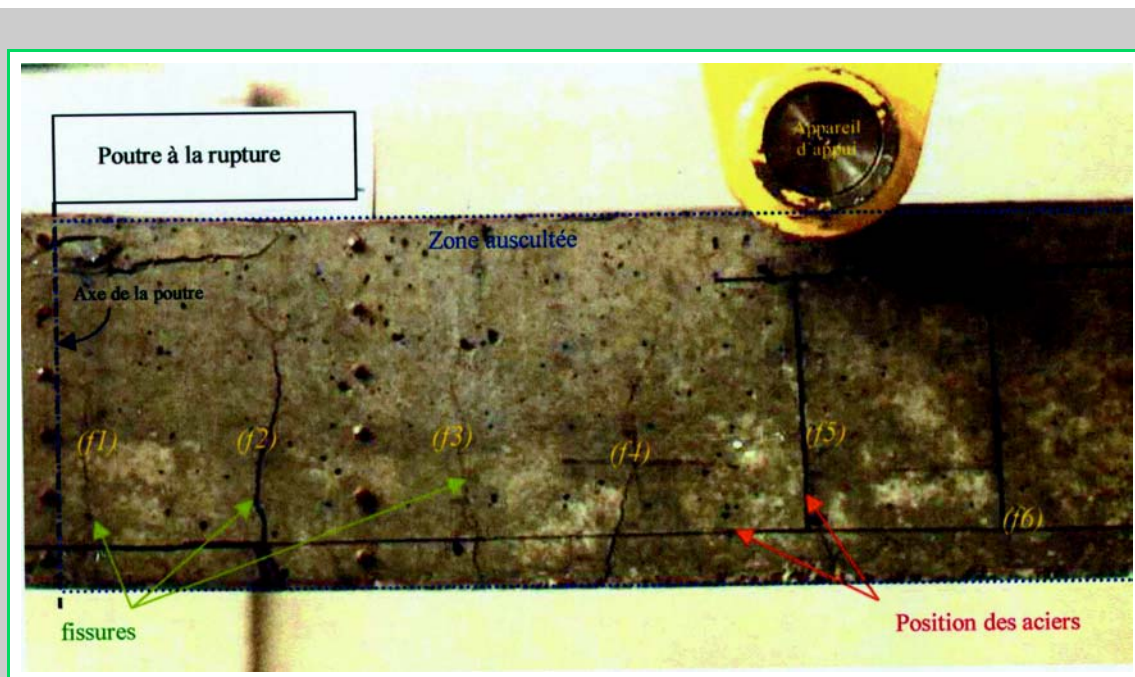


Fig. 10 - Zone auscultée, état à la rupture.

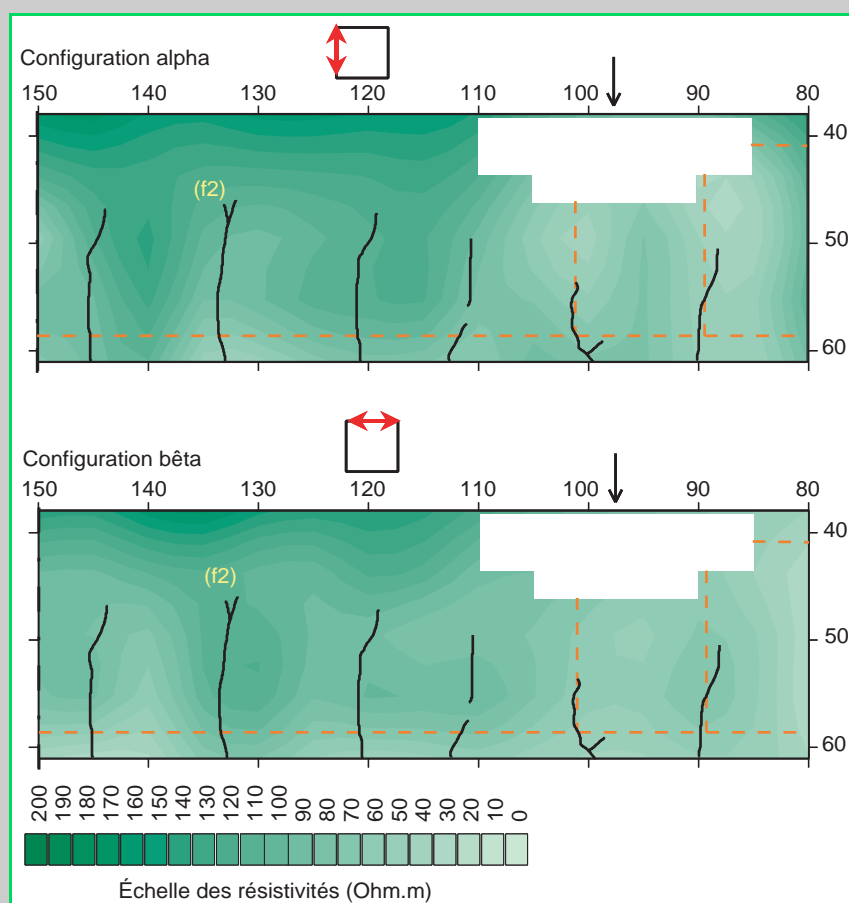
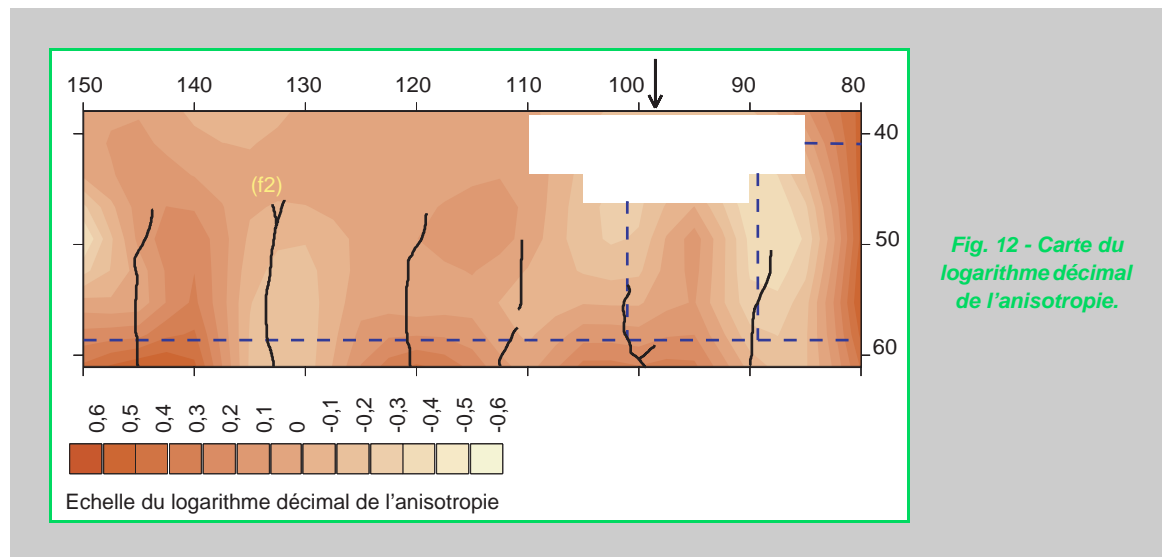


Fig. 11 - Cartes d'isorésistivités apparentes.

Les contrastes étant accentués sur la carte de dA_n , les effets liés aux armatures ou aux fissures sont plus visibles, et les effets de bords s'estompent.

Il reste à exploiter les résultats de manière complète, c'est-à-dire à étudier les anisotropies, pour la caractérisation de la profondeur des fissures, et à interpréter les gradients de résistivité apparente, pour le zonage des propriétés de la poutre.



Conclusion

Les effets de la fissuration des bétons armés sont clairement identifiés par les experts comme préjudiciables à la pérennité des ouvrages. La connaissance des causes et des conséquences de la fissuration, ainsi que de leurs mécanismes, a fait l'objet de nombreuses études. Dans le cadre de la réhabilitation des ouvrages, l'enjeu majeur est de savoir comment caractériser les désordres de manière fine afin de pouvoir les intégrer dans l'évaluation structurelle ou les corriger. La mesure des résistivités électriques se présente potentiellement comme une méthode exploitable, de par sa sensibilité à certains facteurs révélateurs d'une altération (variation de porosité, présence de fissures). Les travaux présentés sont issus d'une utilisation et d'une exploitation originale de la mesure de résistivité apparente, dont l'objet est généralement tourné vers la caractérisation de l'état des armatures. Ils montrent l'aptitude de la méthode à détecter et à localiser la fissuration et le délaminage. Pour des contrastes de résistivité apparente suffisants entre les fissures et le béton, la méthode permet aussi de distinguer les fissures sèches des fissures humides, le rôle de chacune dans le processus de corrosion étant fort différent. L'étude menée sur un corps d'épreuve endommagé artificiellement montre la dépendance des variations de résistivité apparente en fonction de la profondeur des fissures et laisse penser que cette grandeur sera ainsi accessible au contrôle non destructif. Des travaux complémentaires sont encore à mener, notamment sur les effets des armatures ou des bords.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFGC-COFREND, Communications orales du Groupe de Travail AFGC-COFREND : « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton armé », **2002** (en cours), <http://listes.lcpc.fr/listes/info/afgc-cofrend>.

Ouvrages d'art – Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Traitement des fissures et protection du béton, NF P 95-103, AFNOR, **1993**, 26 pages.

ANDRADE C., ALONSO C., ARTEAGA A., TANNER P., *Methodology based on the electrical resistivity for calculation of reinforcement service life*, 5th CANMET/ACI International conference, **2000**, pp. 899-915.

ASTM, Test method C-876 : *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*, **1997**.

ELSENER B., KLINGHOFFER O., FROLUND T., RISLUND E., SCHIEGG Y., BÖHNI H., *Assessment of reinforcement corrosion by means of galvanostatic pulse technique*, *International Conference « Repair of concrete structures »*, Svolvaer, Norway, **1997**, 10 pages.

GÉRARD B., REINHARDT H.-W., BREYSSE D., *Measured transport in cracked concrete*, Rilem Report 16 Penetration and permeability of concrete, Chapitre 8, **1997**, pp.265-324.

LATASTE J.-F., BREYSSE D., ABRAHAM O., FARGEOT B., *Evaluation Non Destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé : Stratégie générale et identification des besoins*, COSS'01, XIX^{èmes} rencontres universitaires de génie civil, Lille 3-4 mai **2001a**, 6 pages.

LATASTE J.-F., SIRIEIX C., FRAPPA M., BREYSSE D., *Electrical resistivity measurement applied to Non Destructive Testing in civil engineering : Influence of the humidity*, 7th EEGS, Birmingham (UK), September 2-6 **2001b**, pp. 60-61.

LAURENCET P., JACCOUD J.-P., Fissuration, étanchéité, et durabilité des structures en béton armé, *Annales du bâtiment et des travaux publics*, **6**, **2000**, pp. 13-22.

OECD-NEA, Development priorities for Non Destructive Examination of concrete structures in nuclear plant, NEA/CSNI/R(98)**6**, **1998**, 62 pages.

RAHARINAIVO A., BREVET P., GRIMALDI G., PANNIER G., Relationships between deterioration and reinforcing-steel corrosion, *Durability of building materials*, vol. 4, **1986**, pp. 97-112.

RAHARINAIVO A., ARLIGUÉ G., CHAUSSADENT Th., GRIMALDI G., POLLET V., TACHÉ G., *La corrosion et la protection des aciers dans le béton*, éd. Presses des Ponts et Chaussées, Paris, **1998**, 167 pages.

RILEM TC 154, (1), *Recommandations Half cell potential measurements – potential mapping to locate corroding reinforcement in concrete structures*.

RILEM TC 154, (2), *Méthodes d'essai pour mesurer sur site la vitesse de corrosion des armatures dans le béton au moyen de la méthode de résistance de polarisation*.

SIRIEIX C., LATASTE J.-F., BREYSSE D., FRAPPA M., Caractérisation de l'endommagement du béton par mesures électriques, *Matériaux et Construction*, vol. 35, **2002**, pp. 204-210.

VILLESUZANNE B., *Application des mesures de propriétés électriques au diagnostic d'endommagement d'ouvrages en béton*, Rapport de DEA, INSA Toulouse, **1999**, 67 pages.