

# Evaluation non-destructive de la fissuration des ouvrages massifs en béton par la méthode de résistivité électrique en forage

E. TAILLET <sup>a,b</sup>, J.F. LATASTE <sup>a</sup>, P. RIVARD <sup>b</sup>, A. DENIS <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire I2M – Université de Bordeaux, Avenue des facultés – Bât.18, 33405 Talence, France

<sup>b</sup> Département Génie Civil – Université de Sherbrooke, J1K 2R1, Sherbrooke, Québec, Canada

## Résumé

*Les fissures sont un des endommagements le plus préjudiciables à la pérennité des structures en béton. Les méthodes non-destructives sont bien développées pour l'étude des altérations en surface, mais peu de techniques sont adaptées à la caractérisation de défauts dans la masse. Dans cet article, des mesures de résistivité électrique sont réalisées pour l'étude des fissures et discontinuités (joint, interfaces, ...) au sein des ouvrages massifs en béton par l'intermédiaire de forages préexistants. L'étude repose, sur une première approche numérique (éléments finis) en 2D-axisymétrie permettant d'appréhender les corrections à apporter sur les mesures et de montrer l'influence de deux paramètres de fissure: l'ouverture et le contraste de résistivité entre la discontinuité et le béton. Une dernière partie de l'étude s'appuie sur une validation expérimentale effectuée sur un ouvrage hydraulique à l'aide d'une sonde électrique. Ces travaux ont permis de caractériser des fissures isolées et d'identifier des interfaces sur un ouvrage réel en conditions naturelles.*

## Abstract

*Cracks are one of the most harmful damage to the durability of concrete structures. The non-destructive methods appear to be effective for the detection and the location of surface cracks but they might be unsuitable for investigation of massive concrete body. In this paper, the electrical resistivity measurements are made for the study of cracks and discontinuities (concrete joints, interfaces ...) in massive concrete structures by preexisting boreholes. The study is based on a first numerical approach (finite elements) 2D-axisymmetry to understand the corrections on data and show the influence of two parameters of crack: the aperture and the resistivity contrast between the discontinuity and the concrete. The last part of the study is based on an experimental validation made on a hydraulic structure with an electrical probe. These studies were used to characterize isolated cracks and identify interfaces on a real structure under natural conditions.*

**Mots clefs : Résistivité électrique, fissuration, béton, contrôle non-destructif**

## 1. Introduction

Le vieillissement des structures massives en béton est un problème majeur en raison de la dégradation des propriétés et des performances du béton. La réparation des structures est souvent moins chère en reconstruction, il est, donc, important de faire un diagnostic par des méthodes de contrôle non-destructif (CND). Les objectifs sont de détecter, localiser et caractériser les zones altérées. L'accent est notamment mis sur les interfaces liées aux reprises de bétonnage qui représentent des zones typiques de défauts. La zone de contact béton/substratum et les fissurations sont également prises en compte. La résistivité électrique en surface est considérée comme une méthode efficace dans la détection des fissures et d'autres types de dommage [1] et [2]. Cependant, la méthode est limitée en raison de la dépendance entre la profondeur d'investigation et la résolution. L'augmentation de l'espacement entre deux électrodes permet de sonder sur des profondeurs plus importantes au détriment de la résolution [3]. L'utilisation des méthodes électriques en forage peut être une solution pour ausculter à l'intérieur de la structure.

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, ces techniques appelées diagraphies (électriques, acoustiques, optiques ou nucléaires) ont été mises au point pour la prospection pétrolière afin d'obtenir un enregistrement continu des propriétés de la roche profonde [4] et [5].

Cet article traite de l'utilisation d'une sonde électrique dans des forages préexistants dans une structure en béton. Les études numériques et expérimentales montrent les capacités de la méthode à détecter et caractériser des zones endommagées.

## 2. Méthode de mesure

La méthode consiste à enregistrer une mesure continue de paramètre physique (ici la résistivité électrique) en fonction de la profondeur, lors du passage de la sonde dans le forage. La sonde 2PEA-1000 (Mount Sopris Instrument) utilisée est un dispositif de type normal (Fig.1). Elle comporte une électrode d'injection du courant (A), des électrodes de mesure de potentiel (M), une électrode de retour du courant (B) et une électrode de potentiel de référence (N).

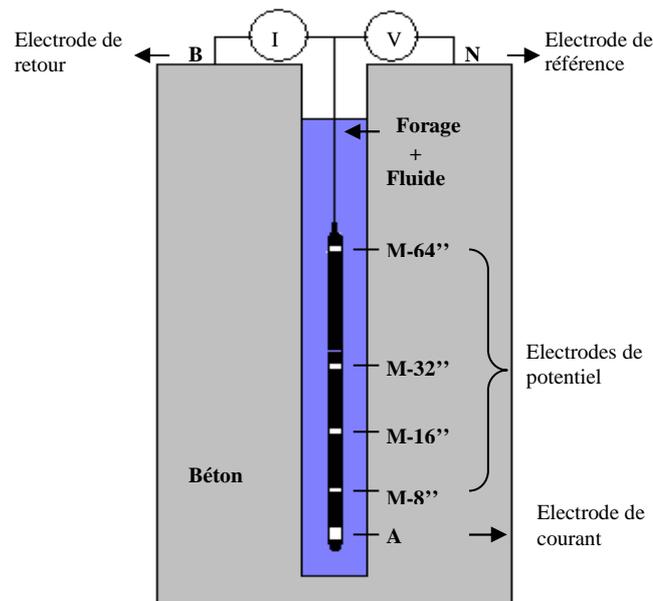


Fig1. Schéma de la sonde normale 2PEA-1000

Les électrodes A et M sont proches. B et N, distants de A, sont dits à l'infini. Cette configuration est comparable à un dispositif de surface de type « pôle-pôle ».

La mesure de potentiel en M permet de calculer la résistivité (Eq.1),

$$\rho = 4.\pi.AM.(V/I) \quad (1)$$

Où  $\rho$  est la résistivité (Ohm.m), V est la mesure de potentiel (V), I est l'intensité du courant (A) et  $AM_i$  est l'espacement entre l'électrode A et M (m). Les espacements  $AM_i$  de la sonde sont fixés à 8" (M-8'' = 0,2 m), 16" (M-16'' = 0,4 m), 32" (M-32'' = 0,8 m) et à 64" (M-64'' = 1,6 m). L'augmentation de l'espacement permet de sonder des volumes plus importants de matériau. Le rayon d'investigation est défini comme étant la distance à laquelle le milieu est affecté par le courant. Pour une sonde normale, 50% du signal électrique enregistré correspond à la réponse du matériau à une distance de la sonde inférieure à  $2AM$  [6]. Toutefois, cette valeur peut être discutable [7].

En milieu hétérogène, la résistivité est appelée la résistivité apparente,  $\rho_a$ . Elle est une valeur globalisant la résistivité dans le volume d'investigation. Cette valeur dépend de la composition du matériau, de son état (porosité, humidité) et des conditions et paramètres de mesure.

## 3. Approche numérique

Le but de cette section est de modéliser une sonde électrique et de comprendre la distribution du courant dans un domaine présentant ou non des discontinuités le long du forage. Le logiciel d'éléments finis Comsol3D © est utilisé et plus particulièrement le module AC/DC.

### 3.1. Définition du modèle

Le milieu est supposé homogène, isotrope et infini. Le problème est réduit à un modèle 2-D axisymétrique, axé au centre du forage. Le modèle est défini selon trois sous-domaines: l'outil (électrodes et les pièces isolantes de la sonde), le forage et la structure en béton. L'ensemble du domaine est défini par des éléments triangulaires de

côté variant de 0,001 m à 1 m. De par la présence de la paroi du forage (au minimum à 0.04 m de l'axe), le maillage s'ajuste de façon automatique à la géométrie du modèle. Le maillage est très fin de l'axe de symétrie jusqu'en marge du forage, une zone qui correspond à la zone étudiée. En supplément, un espacement entre nœud égal à 0,001 m de part et d'autre de la source de courant A est créé afin de garantir de la précision au point d'injection du courant.

Dans ce système, des conditions aux limites et aux interfaces sont définies : conditions isolantes sur les surfaces de l'outil et la surface de contact (air / béton), et conditions de potentiel nul aux limites du volume de béton situées à l'infini. En outre, une intensité de courant continu de 1A est appliquée sur la surface de l'électrode A. Les conditions de continuité et de conservation du potentiel de courant ont été imposées aux différentes interfaces.

Dans un milieu homogène, isotrope et infini, la résistivité du fluide de forage  $\rho_m$  est égale à la résistivité du béton,  $\rho_t$ . La résistivité apparente,  $\rho_a$  doit être égale à la résistivité du modèle imposée. Pour valider le modèle, une erreur a été calculée pour chaque espacement AM (Eq. 2):

$$E (\%) = ((\rho_t - \rho_a) / \rho_t) \times 100 \quad (2)$$

L'incertitude du modèle choisi est toujours estimée inférieure à 5%.

### 3.2. Correction des mesures

Le diamètre du forage associé à la nature et la densité du fluide le remplissant, influence grandement les mesures. Les premières corrections sur l'effet du fluide de forage et son diamètre ont été faites par Schlumberger puis par Scott sous la forme d'un algorithme [8]. En utilisant les données de modélisation, une régression multiple non linéaire est réalisée afin de définir l'équation de correction spécifique à la sonde (Eq.3). Les variables identifiées sont :  $C_{v/m}$  (le contraste entre la résistivité du béton et la résistivité du fluide de forage),  $C_{a/m}$  (le contraste entre la résistivité apparente et la résistivité du fluide de forage) et le rapport entre AM et  $D_B$  (espacement de la sonde et diamètre du forage). ( $C_{v/m}$ ) est considéré comme une variable dépendante tandis que ( $C_{a/m}$ ), ( $AM/D_B$ ) et leur produit sont considérés comme des variables indépendantes.

$$\begin{aligned} \ln(C_{v/m}) = & -0,00075. \ln(C_{a/m})^4 + 0,02299. \ln(C_{a/m})^3 + 0,06325. \ln(C_{a/m})^2 + 1,11849. \ln(C_{a/m}) + \\ & 0,01300. \ln(AM/D_B)^4 + 0,10401. \ln(AM/D_B)^3 + 0,21102. \ln(AM/D_B)^2 + 0,07903. \ln(AM/D_B) + \\ & 0,00069. \ln(C_{a/m})^4. \ln(AM/D_B) - 0,01209. \ln(C_{a/m})^3. \ln(AM/D_B) + 0,02144. \ln(C_{a/m})^2. \ln \\ & (AM/D_B) - 0,10210. 2. \ln(C_{a/m}). \ln(AM/D_B) - 0,00624. \ln(AM/D_B)^4. \ln(C_{a/m}) + 0,03798. \ln \\ & (AM/D_B)^3. \ln(C_{a/m}) + 0,01112. \ln(AM/D_B)^2. \ln(C_{a/m}) \end{aligned} \quad (3)$$

La Fig.2 montre le pourcentage d'erreur des données non corrigées et corrigées par rapport au modèle pour les quatre espacements. Le modèle a une résistivité de béton égale à 200 Ohm.m, la résistivité du fluide est égale à 10 Ohm.m et le diamètre de forage de 0,15 m. Le calcul du pourcentage d'erreur est obtenu par l'équation 2. L'équation de correction génère des données cohérentes avec l'observation, avec une erreur inférieure à 5%.

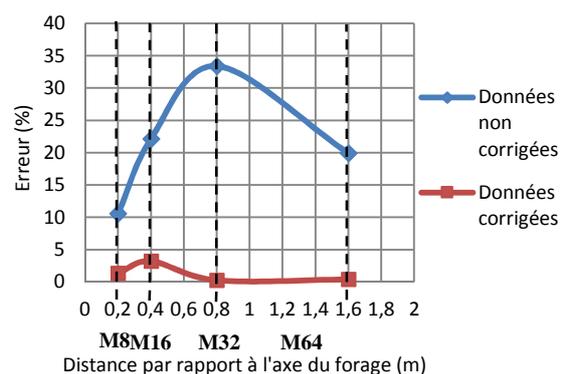


Fig.2. Pourcentage d'erreur pour les données non corrigées et corrigées en fonction d'AM

### 3.3. Etude de sensibilité aux paramètres de fissure

Pour étudier la perturbation générée par une discontinuité dans le béton, nous introduisons une fissure horizontale conductrice avec une ouverture  $h$ , une résistivité de fissure  $\rho_f$  et une extension infinie, située à mi-profondeur du modèle. Dans la modélisation, nous avons considéré le contraste de résistivité entre les différents milieux.  $C_{v/m}$  est le contraste entre la résistivité du béton et de la résistivité du fluide du forage, et  $C_{t/f}$  est le contraste entre la résistivité du béton et la résistivité de la fissure.

Nous avons calculé une variation relative au droit de la fissure c'est-à-dire une diminution relative de résistivité. Le calcul est le même que pour l'équation 2 avec  $\rho_t$  et  $\rho_a$  corrigée au droit de la fissure. Dans les figures suivantes, nous considérons un bruit de 1% (estimé expérimentalement voir section 4.2). Cette valeur a été évaluée par la répétabilité de mesures sur site dans un seul forage et dans des conditions stables.

La Fig.3 illustre la variation relative en fonction de l'ouverture  $h$ , avec un diamètre de forage,  $D_B$  égal à 0,1 m,  $C_{t/f}$  égal à 10 et  $C_{t/m}$  égal à 10. La variation relative est importante pour de grandes ouvertures et de petits espacements. On considère que les variations relatives inférieures à 1% (bruit de mesure) ne sont pas significatives. Pour un grand espacement (M64), une ouverture de fissure égale à 1 cm (avec  $C_{t/f} = 10$ ) n'est pas détectée (Fig. 3).

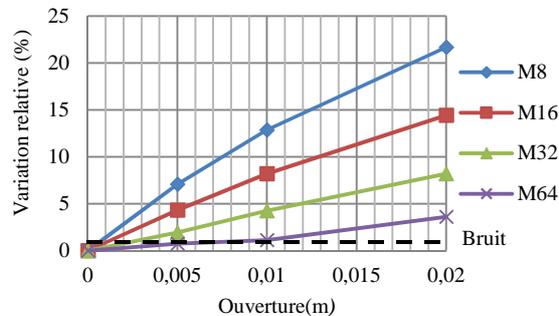


Fig.3. Influence de l'ouverture pour chaque espacement ( $C_{t/f} = 10$ )

La Fig.4 montre la variation relative en fonction du contraste de résistivité entre le béton et la fissure  $C_{t/f}$ , pour un diamètre de forage de 0,1 m, une ouverture de fissure de 0,01 m et un  $C_{t/m}$  égal à 10. La conclusion est similaire à celle de l'ouverture. La variation relative au droit de la fissure est importante lorsque le contraste est grand et l'espacement est petit. Pour une fissure mince ( $h = 0,01$  m), un contraste compris entre 1 et 2 ne donne aucune information. Pour un contraste compris entre 2 et 3, seulement M8 et M16 fournissent des variations relatives significatives. Pour un contraste entre 3 et 7, M32 apporte des informations supplémentaires. Le couplage les informations des quatre espacements ne peut être utilisé lorsque le contraste,  $C_{t/f}$ , est supérieur à 7.

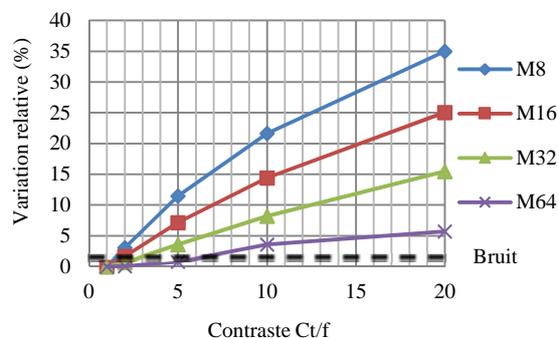


Fig.4. Influence du contraste pour chaque espacement ( $h = 0,01$  m)

La réponse de l'outil dépend de l'ouverture de la fissure, du contraste avec le béton et de l'espacement utilisé. La détection des fissures est basée sur sa représentation dans un volume d'investigation sphérique de rayon égal à 2AM. Une fissure mince ( $h = 0,01$  m) avec un faible contraste ( $C_{t/f} = 2$ ) ne peut pas être détectée dans un volume d'un rayon égal à 2 x 80cm (pour M32) (figure 4).

## 4. Approche expérimentale

### 4.1. Présentation du site expérimental

Les mesures ont été effectuées sur quatre forages d'une structure hydraulique en béton massif, âgée d'environ 50 ans. La structure est composée d'un béton de masse comportant des granulats de 75 mm à 150 mm de diamètre. La nature de ces granulats est un calcaire argileux concassé. Le béton a une résistance à la compression variant entre 20 et 45 MPa. Il y a peu ou pas d'armature dans la structure. Le béton est considéré comme saturé en eau car la structure est relativement ancienne et est en contact avec l'eau du canal à proximité. La structure est adjacente à un talus où l'électrode de retour (N) a été plantée. Le substratum, sur lequel repose la structure, est un schiste très fracturé. Ainsi, il a de nombreuses fractures naturelles subhorizontales.

## 4.2. Résultats

Les données proviennent d'investigations géophysiques réalisées durant les étés 2010 et 2011. Les mesures ont été effectuées au cours de la remontée de la sonde, avec une vitesse d'enregistrement de l'ordre de 0,60 m / min. Le pas de mesure a été fixé à 0,05 m.

La correction de l'effet de forage tient compte du diamètre (95 mm) et de la résistivité du fluide de forage (10 Ohm.m). La Fig.5 montre les résultats corrigés obtenus pour le forage B6. Le bruit estimé sur le site expérimental est inférieur à 1%. Cette valeur a été déterminée par le calcul d'un coefficient de variation sur les mesures effectuées dans un même forage avec les mêmes conditions. Les variations supérieures au bruit peuvent être associées à des changements dans les propriétés du béton (variabilité spatiale naturelle) ou avec la présence de discontinuités le long du forage.

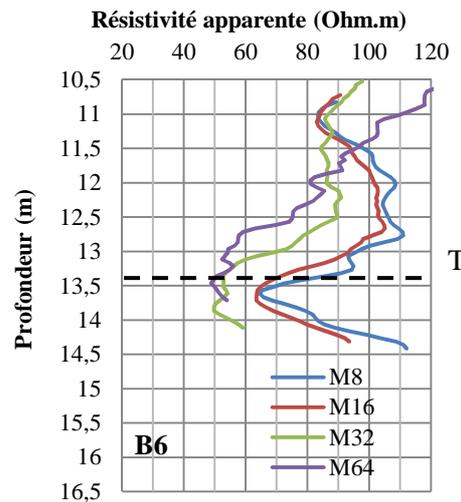


Fig.5. Variations des résistivités apparentes corrigées

Il existe une transition (T) entre deux milieux liée soit à des changements dans les propriétés internes du matériau ou à la modification de sa composition. La résistivité apparente augmente d'environ 60 à 100 Ohm.m. Du fait de la sensibilité de la méthode à son volume d'investigation, la détermination de la profondeur exacte de la transition est déterminée par la position des points d'inflexion, décalé de  $AM / 2$ . La profondeur corrigée est donc autour de - 13,4 m. Pour l'espacement M8 à -12,3 m et pour l'ensemble des espacements à -13,6 m, B6 montre une diminution de la résistivité. Dans la modélisation, ces variations sont liées à la présence de discontinuités. La cause des changements observés ne peut être déterminée sans informations supplémentaires.

## 5. Discussion

Les données de résistivité apparente corrigées du forage B6 sont comparées aux données en diagraphie d'imagerie acoustique (ABI-40) et d'imagerie optique (OBI-40) (Fig.6). La transition localisée à -13,4 m identifiée par les quatre espacements correspond à la transition entre le substratum et la structure en béton. La comparaison entre les données de résistivité apparente et les données acoustiques et optiques a montré que l'espacement M8 détecte des défauts à -13,6 m et à -12,3 m (Fig. 6). À -13,6 m, une diminution de la résistivité est identifiée par les quatre espacements. L'hypothèse est que la sonde détecte une fine couche conductrice. Elle correspond à la présence de deux fissures subhorizontales et une fissure subverticale (mesures optiques et acoustiques). Ces fines unités conductrices (couches, fissures ou joints) avec une épaisseur inférieure à l'espacement sont détectées, mais leurs caractéristiques propres ne sont pas atteintes. Ainsi, à -13,6 m, le faisceau de fissures est identifié comme une couche ayant une épaisseur équivalente égale à 0,30 m et une résistivité apparente entre 50 et 70 Ohm.m. A -12,3 m, les diagraphies acoustiques et optiques montrent que M8 détecte un joint de béton. La résistivité apparente au pic est comparée avec la résistivité vraie du béton calculée par la méthode d'inversion afin d'obtenir une variation relative. Elle est estimée à environ 6%. On fait l'hypothèse que la résistivité de fissure est égale à la résistivité du fluide de forage soit 10 Ohm.m et que par conséquent  $C_{if}$  est égal à environ 10. Se référant aux données de modélisation qui sont résumées à la figure 3, l'ouverture du joint est estimée à 4 mm + / - 1 mm. Ce résultat peut être considéré comme une estimation "en première approche". L'hypothèse d'une résistivité de fissure égale à celle du fluide du forage est discutable. Quoiqu'il en soit, l'hypothèse faite sur la résistivité fissure conduit à une estimation de l'ouverture minimale.

Une fissure moins contrasté électriquement, doit être plus largement ouverte pour créer le même effet sur les résistivités apparentes.

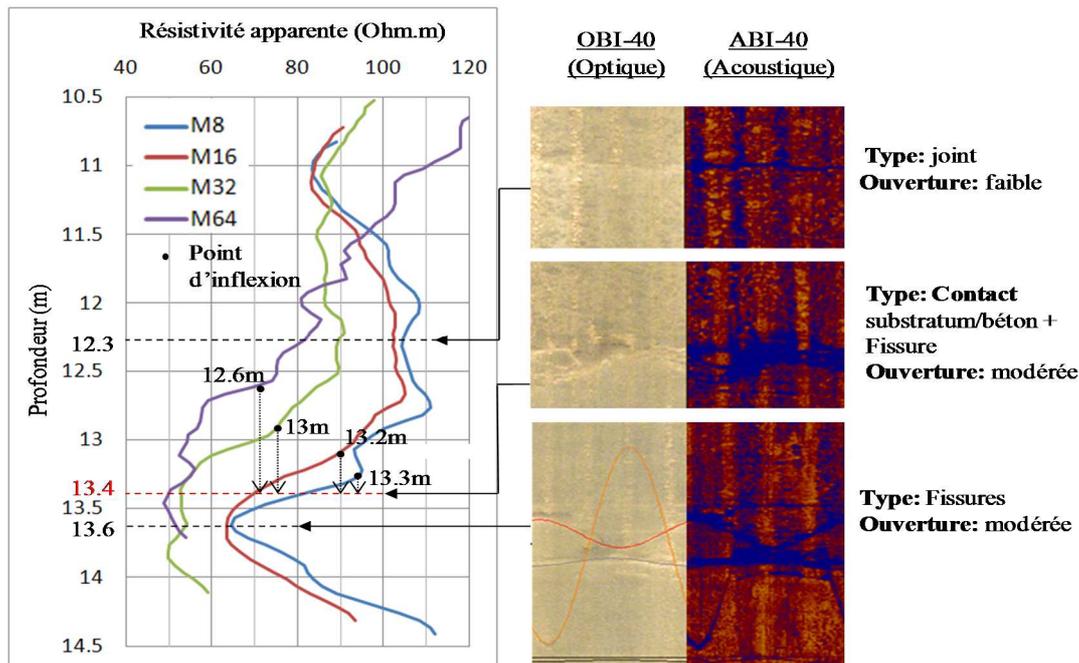


Fig.6. Confrontation des données de résistivité apparente corrigées et des données d'imagerie optique et acoustique

## 6. Conclusion

Les travaux montrent de nouveaux développements pour améliorer la caractérisation de la structure interne en béton de masse. Une sonde électrique détecte des zones endommagées et caractérise des fissures centimétriques ou pluri-millimétriques avec une extension infinie. Dans un milieu fissuré (interface horizontale), l'outil est sensible aux fissures isolées et infinies. Pour un contraste inférieur à 2, une fissure avec une ouverture inférieure à 5 mm ne peut pas être détectée. Cependant, pour un contraste supérieur à 5, une fissure avec une ouverture supérieure à 1 mm peut être localisée puis caractérisée. Cette étude montre aussi que la sonde électrique normale détecte un faisceau de fissures comme une fine couche conductrice. Des études approfondies sur la quantification de l'ouverture des fissures et de résistivité sont en cours. D'autres aspects sont également pris en compte à savoir l'extension et l'inclinaison des fissures.

## Références

- [1] Breyse D, Abraham O. Méthodologie d'évaluation non destructive des ouvrages en béton armé. Presses ENPC ed.; 2005.
- [2] Lataste JF, Sirieix C, Breyse D, Frappa M. Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. NDT E Int. 2003 9; 36(6):383-94.
- [3] Roy A, Dhar R. Radius of investigation in dc resistivity well logging. Geophysics 1971 08/01; 2013/02;36(4):754-60.
- [4] Serra O. Diagraphies différées - Bases de l'interprétation, Tome 1 : Acquisition des données diagraphiques. ElfExploration ed. Paris; 1979.
- [5] Desbrandes R. Diagraphies dans les sondages. Editions Technip ed. Paris; 1982.
- [6] Telford WS, Geldart LP, Sheriff RE. Applied Geophysics. Cambridge University Press ed. ; 1990.
- [7] Roy A, Dhar R. Radius of investigation in dc resistivity well logging. Geophysics 1971 08/01; 2013/02;36(4):754-60.
- [8] Scott JH. A FORTRAN algorithm for correcting normal resistivity logs for borehole diameter and mud resistivity. Geological Survey 1978;Open-File Report 78-669.