



HAL
open science

Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique

Anh Quan Nguyen

► **To cite this version:**

Anh Quan Nguyen. Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2016. Français. NNT : 2016TOU30380 . tel-01743727

HAL Id: tel-01743727

<https://theses.hal.science/tel-01743727>

Submitted on 26 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Fédérale



Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *Université Toulouse III Paul Sabatier*

Discipline ou spécialité : *Génie Civil*

Présentée et soutenue par

Anh Quan NGUYEN

Le 13 Décembre 2016

Titre :

Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique

JURY

*Sandrine GEOFFROY
Denys BREYSSE
Thierry CHAUSSADENT
Barthélémy STECK
Jean-François LATASTE
Jean-Paul BALAYSSAC
Fabrice DEBY
Gilles KLYSZ*

*Pr. Université de Toulouse
Pr. Université de Bordeaux
Directeur de Recherche IFSTAR
Ingénieur R&D EDF Chatou
MdC. Université de Bordeaux
Pr. Université de Toulouse
MdC. Université de Toulouse
MdC. Université de Toulouse*

*Présidente
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Co-directeur de thèse
Co-encadrant de thèse*

Ecole doctorale : *Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGEP)*

Unité de recherche : *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)*

Directeurs de Thèse : *Jean-Paul BALAYSSAC, Gilles KLYSZ, Fabrice DEBY*

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *Université Toulouse III Paul Sabatier*
Discipline ou spécialité : *Génie Civil*

Présentée et soutenue par

Anh Quan NGUYEN

Le 13 Décembre 2016

Titre :

**EVALUATION NON DESTRUCTIVE DU GRADIENT DE
TENEUR EN EAU DANS LES STRUCTURES EN BETON ARME
PAR RESISTIVITE ELECTRIQUE**

JURY

Sandrine GEOFFROY
Denys BREYSSE
Thierry CHAUSSADENT
Barthélémy STECK
Jean-François LATASTE
Jean-Paul BALAYSSAC
Gilles KLYSZ
Fabrice DEBY

Pr. Université de Toulouse
Pr. Université de Bordeaux
Directeur de Recherche IFSTTAR
Ingénieur R&D EDF Chatou
MdC. Université de Bordeaux
Pr. Université de Toulouse
MdC. Université de Toulouse
MdC. Université de Toulouse

Présidente
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Encadrant de thèse
Encadrant de thèse

Ecole doctorale : *Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGEP)*
Unité de recherche : *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)*
Directeurs de Thèse : *Jean-Paul BALAYSSAC, Gilles KLYSZ, Fabrice DEBY*

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE :

Docteur de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, spécialité : Génie Civil

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE :

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)
INSA/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Ranguel
31077 Toulouse cedex 04 France

Remerciement

Je tiens à remercier ici tout tous ceux qui par leur aide et leur soutien m'ont permis de réaliser ce travail.

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions à l'Université Toulouse III Paul Sabatier et à l'INSA de Toulouse, et financé par le Ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, dans le cadre d'un contrat doctoral MeGep.

En premier lieu je remercie M. Gilles Escadeillas, l'ancien directeur et M. Alain Sellier, le directeur actuel du LMDC, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire, en master comme en thèse.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse : M. Gilles Klysz, M. Fabrice Deby et M. Jean-Paul Balayssac qui ont dirigé et accompagné ce travail. Ils m'ont orienté et soutenu tout au long de ces trois années de thèse. Je leur exprime toute ma reconnaissance pour leurs qualités de recherche et leurs qualités humaines d'écoute, de disponibilité, et d'encouragement que j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec eux.

J'adresse toutes mes reconnaissances envers mon professeur, M. Gilles Klysz, qui a encadré ma thèse. Ses connaissances scientifiques, ses valeurs humaines ainsi que sa passion de recherche m'ont apporté beaucoup d'améliorations au cours de la réalisation de cette thèse. Qu'il trouve ici, et tout au fond de mon cœur, mes gratitudes et mes admirations profonds.

Je tiens à remercier ensuite Fabrice Deby, qui m'a transfert ses connaissances solides de recherche, pour ses précieux conseils et ses apports enrichissants. Un très grand merci à mon aimable Directeur de thèse, M. Jean-Paul Balayssac pour ses partages de connaissance, ses conseils scientifiques, et ses encouragements tout au long de ces trois années de thèse.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à M. Denys Breyse et M. Thierry Chaussadent pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail ; ainsi qu'à Mme. Sandrine Geoffroy d'avoir présidé le jury de thèse. Mes remerciements sincères vont également à M. Jean-François Lataste, M. Barthélémy Steck d'avoir jugé mon travail, en tant que membres du jury.

Je remercie tout particulièrement mes parents pour leur soutien et pour tous les moyens qu'ils m'ont donnés pour réaliser mes études. Leur amour infini sans condition me motive pendant les moments les plus difficiles.

Merci aux professeurs et aux techniciens du laboratoire avec qui j'ai l'opportunité de travailler : Sylvain Dos Santos, Yann Bouaskeur, Laurent Boix, Carole Soula, Vanessa Mazars, David Guillouset, Marc Bégué, Guillaume Lambaré, Frédéric Leclerc.

Merci à mes amis du bureau 213 et du laboratoire avec qui je partage les échanges scientifiques et les moments de joie et à ceux qui ont participé plus ou moins à la réussite de cette thèse : Kahina, Thomas, Maha, Gillani, Sylvain, Hung, Nam, Célestine, Khadim, Tam, Dalèle, Duc et ceux qui j'ai oublié m'excusent.

Grand merci à vous tous.

TABLE DES MATIERES

RESUME	17
ABSTRACT	19
CHAPITRE 1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	27
1.1. INTRODUCTION	29
1.2. LE CONTROLE NON DESTRUCTIF (CND).....	29
1.2.1. Avantages et inconvénients des techniques destructives.....	30
1.2.2. Avantages et inconvénients des techniques de CND.....	31
1.2.3. Application des techniques de CND	32
1.3. LA CORROSION ET LA DURABILITE DU BETON ARME	33
1.3.1. Le processus de corrosion de l'acier	33
1.3.2. Causes de la corrosion de l'acier.....	34
1.3.2.1 La carbonatation.....	35
1.3.2.2 La pénétration des ions chlorure.....	36
1.3.2.3 Le rôle majeur de l'eau dans la durabilité du béton et des ouvrages	38
1.4. LA RESISTIVITE ELECTRIQUE.....	38
1.4.1. Définition	38
1.4.2. Conduction du courant électrique dans les structures en béton armé.....	40
1.4.3. Résistivité apparente.....	41
1.4.4. Les techniques existantes pour la mesure de résistivité.....	42
1.4.4.1. Mesure par transparence	42
1.4.4.2. Mesure sur site.....	43
1.4.5. Paramètres influençant la résistivité du béton	48
1.4.5.1. Paramètres concernant les propriétés du béton.....	48
1.4.5.2. Paramètres liés aux conditions de mesure	52
1.4.5.3. Résistivité électrique et teneur en eau	57
1.4.5.4. Résistivité et corrosion des armatures	60
1.4.6. Exploitation possible des mesures de résistivité	62
1.5. CONCLUSION.....	63

CHAPITRE 2	65
PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE POUR LA RECHERCHE DU GRADIENT DE LA TENEUR EN EAU DANS LES STRUCTURES EN BETON ARME	65
2.1. INTRODUCTION	69
2.2. MESURES DE RESISTIVITE EN SURFACE AVEC LE DISPOSITIF QUADRIPOLAIRE	69
2.2.1. Bases théoriques.....	69
2.2.2. Différentes configurations de mesure avec le dispositif quadripolaire	73
2.2.3. Caractérisation du gradient de teneur en eau dans le béton par résistivité	75
2.3. INFLUENCE DE L'ACIER SUR LA MESURE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE	78
2.4. EFFETS DE BORD SUR LA MESURE DE RESISTIVITE EN SURFACE.....	81
2.5. PROPOSITION D'UNE NOUVELLE PROCEDURE POUR LA MESURE DE LA RESISTIVITE D'UN BETON AYANT UN GRADIENT DE TENEUR EN EAU	86
2.5.1. Procédure de mesure proposée.....	86
2.5.2. Méthode d'exploitation de la courbe de potentiel	88
2.5.3. Configuration symétrique	92
2.5.4. Simulation numérique d'une mesure de résistivité sur un matériau ayant un gradient de résistivité	94
2.6. ETUDE NUMERIQUE SUR LA TAILLE DU MILIEU AUSCULTE SUR LA RESISTIVITE MESUREE.....	98
2.7. ANALYSE NUMERIQUE DES EFFETS DE BORD ET DE L'ACIER SUR LA MESURE DE RESISTIVITE	99
2.7.1 Effets de bord et des aciers.....	101
2.7.2 Modélisation de la configuration Wenner sur des structures en béton armé	106
2.8. METHODOLOGIE PROPOSEE POUR LA SUITE DE L'ETUDE	111
CHAPITRE 3	113
PROCEDURES EXPERIMENTALES	113
RESUME DU CHAPITRE 3	115
3.1. INTRODUCTION	117
3.2. MESURE DE RESISTIVITE DU BETON PAR TRANSMISSION.....	117
3.2.1. Introduction	117
3.2.2. Mode opératoire	117

3.2.3. Préparation des corps d'épreuve	123
3.3. TEST DE REPETABILITE	127
3.4. RESULTAT DE MESURES SUR DALLES EN BETON / BETON ARME	129
3.4.1. Sur les dalles non carbonatées	130
3.4.1.1. Résultats sur la dalle non armée	130
3.4.1.2. Résultats sur la dalle armée	133
3.4.1.3. Effet de court-circuit sur la dalle armée.....	137
3.4.2. Effet de l'état électrochimique de l'acier sur les mesures de résistivité.....	140
3.5. CONCLUSION.....	142
CHAPITRE 4	145
ANALYSE NUMERIQUE	145
RESUME	147
4.1. INTRODUCTION	149
4.2. EQUATIONS CONSTITUTIVES DU MODELE NUMERIQUE	149
4.3. MODELE DE BUTLER-VOLMER.....	150
4.3.1. Système électrochimique de la corrosion	150
4.3.2. La corrosion uniforme	151
4.4. EXPLOITATION NUMERIQUE DE L'ETUDE EXPERIMENTALE	154
4.4.1. Description.....	154
4.4.2. Mode opératoire	156
4.4.3. Résultats de simulation.....	159
4.4.3.1. Simulation de la dalle non carbonatée à 43 jours	160
4.4.3.2. Simulation de la dalle non carbonatée à 265 jours	164
4.4.3.3. Simulation de la dalle carbonatée à l'état saturé (jour 0).....	165
4.5. ETUDE PARAMETRIQUE DES FACTEURS INFLUENÇANT DE L'EFFET DE BORD	167
4.6. ETUDE SUR L'INFLUENCE DES MAILLES D'ARMATURES	169
4.6.1. Objectif.....	169
4.6.2. Mode opératoire.....	169
4.6.3. Résultats	172
4.7. CONCLUSION.....	174

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	177
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	183

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 : Dégradation des armatures en fonction du temps [Tuutti, 1982]	34
Figure 1. 2 : Mécanisme de la carbonatation de la portlandite [Thiery et al., 2007 cité dans Baroghel-Bouny et al., 2008]	36
Figure 1. 3 : Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures [Duval, 1992].....	37
Figure 1. 4 : Illustration du principe de la mesure de résistivité	39
Figure 1. 5 : Schéma de mesure de résistivité par transparence en laboratoire [McCarter et al., 2015].....	42
Figure 1. 6 : Le dispositif multi-anneaux développé dans la thèse de [Du Plooy, 2013].	43
Figure 1. 7 : Principe de la mesure de la résistivité du béton d'enrobage [Naar, 2006]..	44
Figure 1. 8 : Principe simplifié de la mesure de résistivité par sondes noyées	44
Figure 1. 9 : Mesure de résistivité avec dispositif bipolaire (a) et quadripolaire de type Wenner (b).....	46
Figure 1. 10 : Influence de la taille de l'électrode sur la résistivité mesurée avec le dispositif à deux et à quatre électrodes [Millard, 1991].....	47
Figure 1. 11 : Influence de taille et du type de granulat sur la variabilité de la résistivité [Morris et al., 1996].	49
Figure 1. 12 : Influence du rapport e/c sur ρa [Lataste, 2002].....	51
Figure 1. 13 : Variation de la résistivité électrique avec la température [Millard, 1991].	53
Figure 1. 14 : Densité de courant en fonction de la profondeur z et de l'écartement L des électrodes (J_0 correspond à J_x à $z = 0$) pour deux points d'injection sur la surface, selon [Telford et al., 1990].	54
Figure 1. 15 : Fraction du courant circulant sous une épaisseur z pour un écartement d'électrodes L [Telford et al., 1990].	55
Figure 1. 16 : Coefficient de variation en fonction du nombre de mesures pour différents écartements d'électrodes [Du Plooy, 2013].....	55
Figure 1. 17 : Schéma de propagation du front humide dans le matériau, selon l'hypothèse proposée dans [Lataste, 2002].....	56
Figure 1. 18 : Relation entre la teneur en eau et la résistivité électrique dans les bétons (a) contaminés par des chlorures et (b) contaminés par des sulfates et différents taux de chlorures [Saleem et al., 1996].....	58
Figure 1. 19 : Relations entre la teneur en eau ou en eau chlorée et la résistivité électrique [Balayssac et al., 2006]	58
Figure 1. 20 : Relation entre teneur en eau du béton et résistivité électrique [Laurens et al., 2005].....	59
Figure 1. 21 : Relation entre teneur en eau et la résistivité électrique dans la littérature [Østvik et al., 2006].....	60

Figure 1. 22 : Relation inverse entre le courant de corrosion et la résistivité électrique [Carino, 1999]	61
Figure 2. 1 : Source électrique sur la surface d'un milieu homogène [Telford et al., 1990]	70
Figure 2. 2 : Mesure par le dispositif quadripolaire	71
Figure 2. 3 : Variation de potentiel sur la surface pour deux points d'injection en surface	73
Figure 2. 4 : Mesures de résistivité sur la surface par dispositif multi-électrodes [Fares et al., 2015].....	76
Figure 2. 5 : Résistivité apparente en fonction du temps de l'immersion dans l'eau de la dalle en béton [Fares et al., 2015]	76
Figure 2. 6 : Evolution de la résistivité apparente en fonction du temps pour 4 méthodes de mesure [Villain et al., 2015].....	77
Figure 2. 7 : Résistivité apparente sur dalles submergées dans de l'eau contenant du NaCl [Du Plooy, 2013]. (T1-T7 représente le temps d'immersion dans l'eau avec T1 étant 0,1 jour et T7 étant 23,2 jours).....	78
Figure 2. 8 : Position de mesures de résistivité utilisées [Presuel-Moreno et al., 2013].	79
Figure 2. 9 : Positions de mesure de résistivité recommandées [Breyse et al., 2005]....	80
Figure 2. 10 : Positions de mesures recommandées par [Polder, 2001].....	80
Figure 2. 11 : Etude des effets de bord [Lataste, 2002].....	82
Figure 2. 12 : Travaux de [Sengul et al., 2008] (a) influence de la taille d'échantillons sur la mesure Wenner (b) Mesure en transmission prise comme référence (c) Effet de la géométrie des échantillons sur la mesure Wenner avec l'écartement de 20mm	84
Figure 2. 13 : Influence de la position de mesure sur la mesure Wenner sur bloc [Sengul et al., 2008].....	85
Figure 2. 14 : Schéma de la procédure de mesure proposée.....	86
Figure 2. 15 : Courbes de potentiel avant et après le décalage en fonction de la distance r_3 du point de mesure à C1	88
Figure 2. 16 : Exemple d'une courbe de potentiel issue des mesures expérimentales	89
Figure 2. 17 : Configuration symétrique	92
Figure 2. 18 : Exemple d'une courbe de résistivité apparente en fonction de la distance du point de mesure à une source électrique (r_1)	94
Figure 2. 19 : Illustration du gradient de résistivité sur la structure étudiée	95
Figure 2. 20 : Modèle utilisé pour étudier l'effet du gradient de résistivité	96
Figure 2. 21 : Résultat de la simulation sur le modèle avec gradient de résistivité (type « séchage »).....	97
Figure 2. 22 : Résultat de la simulation sur le modèle avec gradient de résistivité (type « humidification »).....	97
Figure 2. 23 : Résistivité apparente obtenue sur modèles numériques de différente taille	99
Figure 2. 24 : Modèle de la petite dalle armée (a) et de la petite dalle non armée (b) ..	101

Figure 2. 25 : Détails géométriques de la petite dalle armée (a) vue de dessus, (b) vue de côté	102
Figure 2. 26 : Détails de la grande dalle armée	103
Figure 2. 27 : Courbes de résistivité obtenues par la simulation numérique sur les modèles non armés	105
Figure 2. 28 : Courbes de résistivité obtenues par la simulation numérique sur les modèles armés.....	105
Figure 2. 29 : Modélisation de la configuration sur des éléments en béton armé. Deux configurations testées dans [Salehi, 2013]; Configuration 1 : mesure perpendiculaire à l'acier au-dessus de la maille ; Configuration 2 : mesure perpendiculaire à l'acier au-dessous de la maille.....	107
Figure 2. 30 : Résultat de simulation avec les configuration de [Salehi, 2013].....	108
Figure 2. 31 : Test mesure perpendiculaire à l'acier	109
Figure 2. 32 : Modèle de petite dalle armée. Mesure au-dessus de l'acier avec le dispositif Wenner (a) à 17,5 cm du bord et (b) à 2 cm du bord	110
Figure 3. 1 : Schéma des mesures sur les échantillons	119
Figure 3. 2 : Installation dans le laboratoire	120
Figure 3. 3 : Loi empirique corrigée issue des essais en transmission (béton non carbonaté).....	122
Figure 3. 4 : Loi empirique de résistivité en fonction de la teneur en eau volumique (béton non carbonaté)	122
Figure 3. 5 : Dalle armée, vue générale et vue de côté.....	124
Figure 3. 6 : Les corps d'épreuve fabriqués et conditionnés au-dessus des réservoirs d'eau dans la salle climatisée	124
Figure 3. 7 : Programme expérimental.....	125
Figure 3. 8 : Dispositif expérimental de génération du gradient de teneur en eau vertical permanent.....	126
Figure 3. 9 : Position des mesures	127
Figure 3. 10 : Installation des mesures (a) et flûte multi-électrode (b)	128
Figure 3. 11 : Test de répétabilité.....	129
Figure 3. 12 : Evolution de la résistivité apparente de la dalle non armée, face humide en fonction de r_1 et pour différentes échéances.	131
Figure 3. 13 : Perte de masse des dalles armée et non armée en fonction du temps	132
Figure 3. 14 : Evolution de résistivité apparente aux différents points de mesure en fonction du temps ($r_1= 4$ cm et $r_1=9$ cm).....	132
Figure 3. 15 : Evolution de la résistivité apparente sur la face sèche de la dalle non armée en fonction du temps.....	133
Figure 3. 16 : Résultats de mesure au droit de l'acier 2 cm (face humide)	134
Figure 3. 17 : Résultats de mesure au droit de l'acier 4 cm (face humide)	134
Figure 3. 18 : Résistivité mesurées au droit de l'acier 2 cm (face sèche)	136
Figure 3. 19 : Résultats de mesures au droit de l'acier 4 cm (face sèche).....	136

Figure 3. 20: Illustration de l'effet de court-circuit sur la face humide de la dalle armée, non carbonatée, à 29 et 265 jours.....	138
Figure 3. 21: Effet de court-circuit sur la face sèche à différentes échéances	139
Figure 3. 22: Effet de court-circuit sur dalle armée, non carbonatée (ligne continue) et carbonatée (ligne pointillée)	141
Figure 4. 2 : Courbes de polarisation des 2 électrodes réversibles et équilibre du système de corrosion uniforme résultant de leur couplage.....	152
Figure 4. 3 : Détails géométriques du modèle de simulation dans COMSOL Multiphysics ®	155
Figure 4. 4: Organigramme simulation de numérique sur COMSOL essai à 43 jours .	157
Figure 4. 5: Procédure de simulation sur la dalle à 265 jours sur la face humide.	159
Figure 4. 6: Résultat de simulation sur dalle non armée totalement saturée à 1 jour (avec un intervalle de confiance de 99%).....	160
Figure 4. 7 : Profil de résistivité simulé pour la dalle à 43 jours (face sèche)	161
Figure 4. 8 : Profil de résistivité simulé pour la dalle à 43 jours (face humide).....	161
Figure 4. 9 : Résultat des simulations et comparaison avec les mesures des dalles non carbonatées sur la face humide à 43 jours (avec un intervalle de confiance de 99%)	163
Figure 4. 10 : Résultat des simulations et comparaison avec les mesures sur les dalles non carbonatées sur la face sèche à 43 jours (avec un intervalle de confiance de 99%)	163
Figure 4. 11 : Résultat de simulation avec les mesures sur les dalles non carbonatées à 265 jours sur la face humide (avec l'intervalle de confiance de 99%).	164
Figure 4. 12 : Résultat de simulation sur les dalles carbonatées saturée (avec un intervalle de confiance de 99%).	165
Figure 4. 13 : Etude paramétrique par simulation numérique : chute de résistivité en fonction de résistivité du béton, avec deux enrobages et deux états électrochimiques de l'acier	168
Figure 4. 14 : Modèle de simulation pour l'étude sur le maillage d'acier (les points représentent les positions des électrodes d'injection et de récupération du courant)	170
Figure 4. 15 : Différentes configurations testées par la simulation.....	171
Figure 4. 16 : Etude sur l'influence du maillage d'acier (maille de 10 cm).....	172
Figure 4. 17 : Etude sur l'influence du maillage d'acier (maille de 15 cm).....	173
Figure 4. 18 : Etude sur l'influence du maillage d'acier, avec 2 lits d'acier reliés (maille de 15 cm)	174

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1 : Gamme de résistivité électrique de différents bétons	40
Tableau 1. 2 : Interprétations de résistivité électrique du béton pour le risque de corrosion des aciers	62
Tableau 1. 3 : Résistivité comme un indicateur de durabilité	62
Tableau 2. 1 : Différents configurations pour la mesure de résistivité électrique avec le dispositif quadripolaire [Lataste, 2002; Reichling et al., 2014]	74
Tableau 2. 2 : Exemple de décalage des mesures de différence de potentiel pour l'obtention d'une courbe de potentiel.....	87
Tableau 2. 3 : Exemple d'exploitation de la courbe de potentiel pour différentes configurations dans la littérature	90
Tableau 2. 4 : Résistivités calculées selon la configuration symétrique avec la courbe de potentiel donnée dans la Figure 2. 16	93
Tableau 2. 5 : Détails des modèles numériques	104
Tableau 2. 6 : Résultats de simulation avec les configurations de [Salehi, 2013]	107
Tableau 2. 7 : Résultat de simulation des mesures Wenner perpendiculaires à l'acier sur la petite dalle armée	109
Tableau 2. 8 : Résultat de simulation des mesures Wenner au-dessus de l'acier	110
Tableau 3. 1 : Résultats de mesures sur échantillons par application directe de loi d'Ohm	120
Tableau 3. 2 : Porosité vraie et degré de saturation corrigé des échantillons	121
Tableau 3. 3 : Formulation du béton	123
Tableau 3. 4 : Chute de résistivité pour chaque cas de mesure	140
Tableau 3. 5 : Chute de la résistivité moyenne à 1 jour pour l'acier passif et actif.....	141
Tableau 4. 1 : Paramètres électrochimiques des aciers passifs à 43 jours	162
Tableau 4. 2 : Gammes de paramètres électrochimiques selon [Sohail, 2013]	162
Tableau 4. 3 : Ecart entre la simulation et les mesures sur les dalles non carbonatées à 43 jours.....	164
Tableau 4. 4 : Ecart entre la simulation et les mesures sur les dalles non carbonatées à 265 jours.....	165
Tableau 4. 5 : Paramètres électrochimiques de l'acier actif par la simulation des mesures sur la dalle carbonatée à l'état saturé (jour 0).....	166
Tableau 4. 6 : Ecart entre la simulation et les mesures sur les dalles carbonatées à 0 jour	167
Tableau 4. 7 : Paramètres électrochimiques de l'acier trouvés par [Sohail et al., 2015]	167

Résumé

La connaissance de la nature et de l'étendue de la détérioration du béton armé est une nécessité pour les maîtres d'ouvrage dans un souci d'une meilleure gestion des patrimoines bâtis. Le contrôle non destructif (CND) est pour cela intéressant car il permet d'ausculter un ouvrage sans l'endommager afin de quantifier les indicateurs d'état du béton armé favorables à sa dégradation. Parmi ces indicateurs la teneur en eau est un élément clé du développement des pathologies du béton armé et notamment de la propagation de la corrosion des armatures. En vue de quantifier la teneur en eau et plus particulièrement son gradient dans le béton, la mesure de la résistivité, une des techniques non destructives les plus sensibles à cet indicateur, est particulièrement pertinente. La caractérisation du gradient de teneur en eau à l'intérieur du béton d'enrobage par des méthodes non destructives est encore peu étudiée. C'est donc l'objectif que nous avons fixé à notre travail, afin d'améliorer le diagnostic de la corrosion des armatures.

Un dispositif quadripolaire linéaire est utilisé. Il est composé de deux électrodes extérieures injectant le courant (appelées « électrodes de courant ») et deux électrodes intérieures (appelées « électrodes de potentiel ») permettant la mesure de la différence de potentiel à la surface de l'élément ausculté. En déplaçant une électrode de potentiel à l'intérieur de la zone d'injection du courant, tout en laissant les autres électrodes fixes, nous obtenons une courbe de potentiel. Cette courbe est alors exploitée selon une configuration dite « symétrique » permettant de tracer la courbe de résistivité en fonction de l'écartement électrode de courant-électrode de potentiel qui est relié à la profondeur d'investigation. Cette configuration permet d'exploiter de façon plus aboutie la courbe de potentiel afin d'étudier le gradient de résistivité lié, dans le cas présent, au gradient de teneur en eau. Une étude numérique sur l'influence de la géométrie des corps d'épreuve et des armatures d'acier est réalisée. Elle confirme que la résistivité obtenue à partir de mesures réalisées près des bords des structures est fortement augmentée par rapport à la résistivité réelle du matériau ausculté. En revanche, la présence d'acier a plutôt tendance à faire baisser la résistivité apparente même dans le cas où la mesure est effectuée près des bords. Il s'agit d'un effet de court-circuit qui diminue la densité de courant passant dans le béton. L'épaisseur d'enrobage influence également la chute de résistivité. On a montré qu'il est possible de profiter de cet effet pour s'affranchir des problèmes liés aux effets de bord. Nous proposons donc de réaliser les mesures de résistivité au droit des armatures et de mettre en place une procédure d'inversion permettant de remonter au gradient de résistivité.

Pour la partie expérimentale deux types de mesures ont été effectuées, sur des dalles en béton (armé et non armé) et sur des échantillons carottés. Deux types de béton sont

examinés, non carbonaté et carbonaté, correspondant respectivement aux états passif et actif de l'acier. Les dalles en béton sont conditionnées avec une procédure spécifique afin de créer un gradient de teneur en eau sur l'épaisseur de la dalle. Deux types de gradient sont étudiés : le séchage et l'humidification. Les mesures sont réalisées directement au-dessus de l'acier pour les dalles armées afin d'analyser l'impact de l'acier grâce à la comparaison avec les mesures sur les dalles non armées. Afin d'avoir des effets de bord identiques les mesures sur dalles armées et non armées sont effectuées sur la même position. Les mesures commencent sur le béton saturé puis sont répétées régulièrement afin de suivre le séchage du matériau jusqu'à la stabilisation du gradient. Les mesures sur la face humide montrent leur intérêt pour l'étude du gradient de teneur en eau. En revanche les mesures sur la face sèche semblent plus difficiles à exploiter. Dans les deux cas, l'effet de la perte d'eau sur la résistivité du béton est bien mis en évidence puisqu'on enregistre une augmentation de la résistivité du béton au fil du temps. En outre, comme pour les expérimentations numériques, il a été mis en évidence que la présence de l'armature diminue significativement la résistivité. Des mesures en transmission sur carottes ont également été réalisées afin d'obtenir une loi empirique entre la teneur en eau et la résistivité, utilisée ensuite pour l'inversion numérique des mesures sur les dalles avec gradients.

Les résultats expérimentaux constituent les données d'entrée utilisées pour retrouver, grâce à des études numériques, les gradients de résistivité du béton ainsi que les paramètres électrochimiques de l'acier. Deux modèles ont été créés, un pour la dalle armée et un autre pour la dalle non armée. Deux résultats de mesure ont été exploités dans les analyses numériques correspondant respectivement à deux états d'établissement du gradient de teneur en eau : un gradient en phase de stabilisation et un gradient établi. Les réactions électrochimiques présentes à l'interface béton-acier sont modélisées par la relation de Butler-Volmer. La loi empirique précédemment déterminée, qui décrit la relation entre la teneur en eau et la résistivité électrique, a été utilisée pour simuler le gradient de teneur en eau. Les résultats de simulations montrent l'intérêt de la méthodologie pour la recherche du gradient de résistivité, avec une erreur inférieure à 10% dans la plupart des cas étudiés. La simulation a montré que la mesure de résistivité permet effectivement de déterminer le gradient de résistivité et de définir les paramètres électrochimiques de l'acier via le modèle de Butler-Volmer.

Mots clés : Contrôle non destructif, gradient de teneur en eau, résistivité électrique, état de corrosion, inversion numérique.

Abstract

The knowledge of the nature and the extent of the deterioration of concrete is required by building owners to better manage the structures. For this purpose non-destructive testing (NDT) is interesting because it allows examining a structure without inducing any damage in order to study relevant parameters involving degradations of reinforced concrete. Among these parameters water content of concrete is a key parameter of the development of reinforced concrete pathologies and especially the corrosion of reinforcement. In order to quantify water content and its gradient in concrete, resistivity measurement, one of the most sensitive non-destructive techniques to water content, is used. The characterization of moisture gradient in cover concrete by non-destructive methods is little studied. It is the goal that we set to our work in order to improve the diagnosis of reinforcement corrosion.

A linear quadripole device is used in our work, with two outer electrodes injecting the current (called "current electrodes") and two inner electrodes (called "potential electrodes") measuring the potential difference. We obtain a curve that plots the potential of all points located between current electrodes versus the distance. This curve is exploited by a "symmetrical configuration" to draw a resistivity curve as a function of the spacing between current electrode and potential electrode which is linked to the investigation depth. This configuration allows us to exploit more successfully the potential curve to study the resistivity gradient correlated, in our case, to the water content gradient.

A numerical study on the influence of the geometry of the testing element and the reinforcement is performed. It confirms that the resistivity obtained from measurements made near the edges of structures is strongly increased in comparison to the actual resistivity of the examined material. However, the presence of steel tends to reduce resistivity measurement even if it is made near the edges. It is due to the short circuit effect which increases the current density passing through the reinforcing bars. The cover thickness also influences the resistivity drop when the measurements are done right above the rebar. It has been shown that it is possible to take advantage of this effect to overcome the problems associated to boundary effects. So we propose to perform resistivity measurements above the rebars and to develop an inversion procedure to assess the resistivity gradient.

For the experimental part two kinds of measurement are performed on concrete slabs (reinforced and unreinforced) and on core samples. Two types of concrete are considered: non-carbonated and carbonated respectively corresponding to both active and passive conditions of the rebar. Concrete slabs are conditioned in a specific way to create a

vertical water content gradient. Two gradient types are studied: drying and wetting. The measurements are carried out directly over the rebar for reinforced slabs and in a way that allows studying only the impact of rebar on the measurement on unreinforced slabs. The measurement begins on the saturated concrete and is repeated regularly in order to monitor the drying of the material until the stabilization of the gradient. The measurements on the moist surface show the relevance of resistivity for the study of water content gradient. On the other hand, the measurements on the dry side seem more difficult to exploit. In both cases, we observe the effect of water loss of concrete as the concrete resistivity increases over time. As for numerical experiments it is demonstrated that the presence of the reinforcement significantly decreases the measurement of the resistivity. Measurements on cores are also performed. The resistivity at different degrees of saturation is measured by transmission. The results provide an empirical law of water content versus resistivity which is used for the numerical inversion of the measurements on the slabs with gradients.

The results obtained in the experimental campaigns are the input data of numerical studies to find the resistivity gradient of concrete and the electrochemical parameters of rebars. Two models are created one for the reinforced slab and another one for the unreinforced slab. Two measurement results were considered in numerical analyses corresponding to two conditions of moisture gradient: a gradient in a phase of stabilization and an established gradient. The electrochemical reactions taking place on the concrete-steel interface are modeled by the Butler-Volmer equation. The empirical law previously determined which describes the relationship between water content and electrical resistivity is used to transform resistivity gradient into water content gradient. The results show the interest of the methodology for assessing resistivity gradient, with an error of less than 10% in most of the studied cases. We have also showed it is also possible to assess electrochemical parameters of the rebar via the Butler-Volmer model.

Keywords : Non-destructive evaluation, water content gradient, electrical resistivity, corrosion state, numerical inversion.

Introduction générale

Les ouvrages d'art en béton armé construits au cours de XXe siècle connaissent maintenant les traces de dégradation. La connaissance de la nature et de l'étendue de la détérioration du matériau est donc une nécessité pour les maîtres d'ouvrage dans un souci de meilleure gestion des patrimoines bâtis. L'intervention tardive de maintenance peut provoquer la défaillance des structures et un coût de réparation élevé. En effet, l'entretien et la réparation des ouvrages sont d'autant plus simples et moins coûteux que la détérioration est détectée, localisée et caractérisé suffisamment tôt.

Actuellement il existe deux grandes familles de techniques permettant de caractériser le béton. Une famille basée sur une approche ponctuelle quantitative mais destructive et l'autre à plus grand rendement, non destructive mais plus qualitative. Depuis une quinzaine d'années, et malgré la difficulté à obtenir un résultat fiable, les méthodes non destructives sont préférées aux techniques destructives classiques qui détériorent et endommagent la structure auscultée. Le prélèvement des échantillons peut endommager localement le matériau. En plus, les échantillons prélevés peuvent ne pas représenter la structure auscultée. L'état du matériau est probablement modifié par le prélèvement, et particulièrement sa teneur en eau, car il se fait le plus souvent sous l'eau. Par ailleurs, pour les raisons de sécurité, il n'est pas toujours possible d'effectuer le prélèvement sur certaines structures comme les enceintes de confinement des réacteurs nucléaires par exemple.

Ainsi les techniques de contrôle non destructif (CND) sont plus intéressantes et préférées par rapport aux techniques classiques pour ausculter une structure en béton armé. L'examen avec le CND ne provoque normalement pas d'altérations sur les ouvrages. Il est généralement rapide et moins coûteux que la méthode destructive avec les essais sur les prélèvements, et permet d'ausculter une grande surface de structure. Pourtant l'étude des propriétés du béton avec les techniques de CND reste encore incomplète et demande toujours plus d'avancement.

Problématique

Le béton armé est largement utilisé dans le domaine de la construction car c'est un matériau résistant, économique et durable avec une mise en œuvre assez simple. Cependant le béton est un matériau qui se dégrade au cours du temps en réagissant avec son environnement. Parmi les pathologies du béton armé la corrosion des aciers est un

des problèmes les plus étudiés. Les principales conséquences de la corrosion pour la sécurité de l'ouvrage sont la perte de section, la perte de ductilité de l'acier et la perte d'adhérence acier-béton, qui entraînent la défaillance de la structure en béton armé.

Le béton d'enrobage fournit aux armatures un milieu protecteur car les produits d'hydratation de la pâte de ciment créent un milieu alcalin qui protège l'acier de la corrosion. Mais ce milieu alcalin au pH élevé est détérioré par la pénétration des agents agressifs issus de l'environnement naturel ou de l'utilisation de l'ouvrage. On peut citer ici la carbonatation et la pénétration des ions chlorures. En général la corrosion résulte d'une combinaison de différents facteurs mais un facteur commun à toutes ces dégradations, nécessaire à l'initiation de la corrosion, est la teneur en eau. En effet les réactions chimiques ainsi que la pénétration des agents agressifs dans le béton nécessitent la présence d'eau. L'évaluation de la teneur en eau et de son gradient est donc une étape importante pour le diagnostic des structures en béton armé.

A l'origine employée dans le domaine géophysique, la méthode de mesure de résistivité électrique est utilisée dans le génie civil pour ausculter des structures en béton armé. Cette grandeur physique est sensible aux différents paramètres de durabilité du béton armé tels que la teneur en eau et la teneur en chlorures. La relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau du béton est déjà justifiée dans de nombreux travaux dans la littérature [Wedding et al., 1979; Sriravindrarajah et al., 1982; Millard, 1991; S. Feliu et al., 1996; Lataste, 2002; Breysse et al., 2005; Østvik et al., 2006; Naar, 2006; Hornbostel et al., 2013]. Elle est décrite, par exemple, par la loi d'Archie qui regroupe la résistivité électrique, la porosité et le degré de saturation. Cette grandeur physique est un indicateur fiable pour détecter et localiser les zones favorables à la corrosion [Morris et al., 1996; Gowers et al., 1999; Carino, 1999; Polder et al., 2000]. Pourtant la variation de la teneur en eau à l'intérieur du béton d'enrobage est encore peu étudiée alors qu'il n'existe quasiment pas de structure ayant une teneur en eau homogène. Nous nous intéressons alors à étudier le gradient de teneur en eau dans cette zone particulière des structures, afin d'améliorer le diagnostic de la corrosion des armatures.

Objectif de la thèse

Ce travail vise à quantifier le gradient de teneur en eau dans le béton d'enrobage et à évaluer les paramètres électrochimiques de l'acier par mesure de la résistivité électrique sur la surface des structures. Les principaux objectifs de la thèse sont :

- Proposer une nouvelle procédure de mesure de résistivité en surface fortement liée à l'évolution de la résistivité en profondeur du matériau ausculté.

- Développer une méthodologie d'exploitation de ces mêmes mesures de résistivité en surface permettant d'obtenir de façon qualitative l'évolution de la résistivité sur une profondeur donnée.
- Remonter au gradient réel de résistivité en profondeur à partir de l'exploitation des mesures expérimentales par inversion numérique.
- Exploiter ce gradient de résistivité afin de retrouver de façon quantitative le gradient teneur en eau en profondeur par une procédure de recalage en laboratoire sur un faible nombre d'échantillons de béton.

Plan de la thèse

Ce document comprend quatre chapitres. Le premier chapitre est une étude bibliographique. Il fournit une vue générale sur les techniques de CND, les pathologies du béton armé et la corrosion de l'acier, en mettant en évidence le rôle de l'eau dans l'ensemble de ces phénomènes. Nous présentons également la méthode de mesure de la résistivité, les paramètres influençant et la relation entre cette grandeur physique et la teneur en eau du béton.

Le chapitre 2 décrit une nouvelle procédure de mesure pour la recherche du gradient de teneur en eau par la mesure de résistivité avec un dispositif quadripolaire linéaire. Des simulations numériques sont réalisées afin d'étudier l'influence des armatures et des effets de bord sur la mesure. Une méthodologie est proposée à la fin du chapitre

Le chapitre 3 présente l'ensemble des travaux expérimentaux effectués durant la thèse : les procédures expérimentales, les mesures réalisées et les résultats obtenus. Certains résultats sont utilisés comme données d'entrée pour la procédure d'inversion présentée dans le chapitre 4 qui décrit l'ensemble des analyses numériques pour remonter d'une part au gradient de résistivité et de teneur en eau en profondeur du béton armé et d'autre part aux paramètres électrochimiques de l'acier.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

S'il est vrai que la mesure de la teneur en eau peut être réalisée par des méthodes simples (la gravimétrie) ou plus sophistiquées (la gammadensimétrie par exemple) sur des prélèvements, leur nombre pour obtenir une mesure représentative peut rapidement s'avérer rédhibitoire. Comme pour d'autres propriétés du béton, il y a donc un intérêt à développer des méthodes de contrôle non destructif pour la mesure de la teneur en eau. Parmi les techniques les plus utilisées, la mesure de la résistivité électrique est indiquée pour être efficace et pertinente par de nombreux travaux. L'intérêt de la résistivité par sondes à points, outre son aspect totalement non destructif, réside dans la simplicité de sa mise en œuvre.

Dans un premier temps nous présenterons le contrôle non destructif dans le domaine de génie civil. Ensuite ses avantages et inconvénients par rapport aux méthodes destructives seront présentés. La corrosion de l'acier est abordée dans un second temps par la description rapide du phénomène de corrosion et des pathologies qui en résultent. On insiste sur le rôle prépondérant de la teneur en eau, paramètre clé pour le développement de la corrosion de l'acier dans le béton armé. Nous présentons dans la troisième partie de ce chapitre la mesure de résistivité électrique et son intérêt pour la recherche du gradient de teneur en eau et de la corrosion.

1.2. Le contrôle non destructif (CND)

Le contrôle non destructif (CND) regroupe l'ensemble des techniques et procédures menées sur des structures ou des ouvrages pour ausculter leur état sans provoquer d'altérations ni influencer leur utilisation. Généralement, le CND est basé sur la réponse du matériau à un impact émis par une source extérieure. Cette réponse, généralement une grandeur physique, est reliée à des caractéristiques du matériau. Une étape d'inversion, souvent complexe, est nécessaire afin de retrouver les caractéristiques initiales du matériau.

Il existe plusieurs possibilités pour l'exploitation des techniques non destructives :

- Travail en combinaison avec d'autre(s) technique(s) non destructive(s) : les mesures non destructives sur une même structure ou un même ouvrage sont souvent combinées pour obtenir un résultat plus fiable.
- Travail en combinaison avec des techniques destructives : les résultats des mesures obtenues avec des méthodes destructives généralement considérées comme des références permettent de recalibrer ceux obtenus avec la méthode CND.

La procédure d'examen d'un ouvrage par le CND est généralement divisée en grandes étapes :

- Examen de la structure à grande échelle par des méthodes rapides et simples (en particulier un examen visuel).
- Détection et localisation des éventuelles zones particulières où il est nécessaire d'effectuer un diagnostic plus approfondi.
- Traitement de l'ensemble des données par combinaison des résultats issus de différentes méthodes d'auscultation.
- Inversion numérique, analytique ou statistique pour déduire des mesures les paramètres du matériau.

1.2.1. Avantages et inconvénients des techniques destructives

La méthode usuelle pour évaluer des structures en béton armé est d'en prélever des échantillons afin de les caractériser en laboratoire. Les techniques destructives ont de nombreuses limites dans l'évaluation et l'auscultation des bétons et des ouvrages :

- Le prélèvement des échantillons peut altérer localement les propriétés du matériau et donc affaiblir la capacité portante de l'ouvrage ou dans certains cas son étanchéité.
- Les échantillons ne représentent pas les structures auscultées : les informations sont locales. Elles ne sont valides qu'à l'échelle de l'échantillon et ne peuvent pas représenter la totalité de la structure d'où la nécessité de retirer plusieurs échantillons ce qui va accentuer les phénomènes décrits précédemment. De plus, sans information préalable, le prélèvement peut être réalisé au hasard, probablement dans des zones pas nécessairement représentatives de l'ensemble de la structure. Les grandeurs issues des essais sur échantillon ne peuvent pas être généralisées sans hypothèses supplémentaires.
- Désordre possible du matériau suite au prélèvement de l'échantillon : les échantillons sont souvent prélevés de la structure auscultée pour des analyses (mécaniques, physiques ou chimiques) plus approfondies en laboratoire. Mais le prélèvement va probablement modifier l'état de contraintes du matériau et fort probablement sa teneur en eau, le prélèvement se faisant par carottage le plus souvent sous eau. En outre, les essais en laboratoire n'étant effectués, dans la plupart des cas, ni immédiatement ni à proximité de la structure étudiée, il est

difficile de garantir que l'échantillon reste intact ou du moins dans le même état hydrique que celui qu'il avait en place.

- Les mesures en laboratoire sont généralement longues et coûteuses. Les techniques destructives requièrent en général du temps de préparation et/ou de conditionnement des échantillons. Plusieurs étapes sont nécessaires du prélèvement jusqu'aux essais en laboratoire. Pour diagnostiquer un ouvrage avec une précision suffisante, il faut réaliser une quantité significative de prélèvements. Les frais liés à des essais destructifs (frais de prélèvement, de transport, de stockage et des essais dans laboratoire) sont souvent plus élevés que ceux d'une campagne d'auscultation non destructive [Naar, 2006].
- Dans certains cas il est impossible de prélever les échantillons pour des raisons d'accessibilité ou de sécurité de l'ouvrage (cas des ouvrages de confinement par exemple).

Malgré tout, les techniques destructives présentent des avantages :

- Représentativité : le prélèvement d'échantillons dans les structures auscultées permet également de faire des diagnostics complémentaires, donc plus complets, du matériau. En outre les caractérisations en laboratoire avec les techniques classiques sont bien maîtrisées et pour beaucoup d'entre elles normalisées.
- Possibilité de multiplier des essais : les échantillons prélevés dans les structures peuvent être stockés pendant une longue période pour effectuer plusieurs essais à différents états du matériau ou pour répéter les mesures.
- Exploitation directe des résultats : les essais expérimentaux sur les échantillons prélevés donnent directement les caractéristiques étudiées du matériau contrairement aux contrôles non destructifs, pour lesquels il est difficile de trouver une corrélation empirique entre les mesures non destructives et les paramètres du matériau via une procédure d'inversion.

1.2.2. Avantages et inconvénients des techniques de CND

Pour évaluer les structures de génie civil, les techniques non destructives montrent bien leur intérêt. Elles sont bien adaptées aux conditions de mesures sur site :

- Le CND examine les structures sans provoquer d'altérations ou modifier leur fonctionnement.
- D'un point de vue économique les techniques de CND sont généralement rapides à mettre en œuvre avec un coût raisonnable. Elles peuvent être appliquées sur les ouvrages de grandes dimensions.

- Le problème de transport et de stockage est plus simple et moins coûteux que les techniques destructives, car il n'y a pas d'échantillon à prélever et à conserver. Le transport ne concerne que les matériels de mesure.
- Possibilité d'accéder aux endroits sensibles : les mesures peuvent être robotisées et effectuées à distance. Il est donc possible d'ausculter les endroits sensibles ou dangereux ou encore d'atteindre des zones inaccessibles.

Malgré ces avantages, les méthodes non destructives présentent les inconvénients suivants :

- Les résultats dépendent des conditions de mesure : pour les mesures sur site, les mesures non destructives peuvent être influencées par différentes sources d'erreur (bruits, intempéries, changement des conditions climatiques au cours de la mesure, etc.). Les résultats dépendent donc fortement des conditions de mesures.
- L'exploitation indirecte des résultats : c'est le plus gros inconvénient des techniques non destructives. Les mesures non destructives ne permettent d'obtenir que des grandeurs physiques reliées aux paramètres recherchés du matériau. Il faut inverser ces résultats pour les retrouver. Cette démarche complexe dépend de plusieurs paramètres d'entrée et requiert souvent un haut niveau de connaissance pour interpréter correctement les résultats. En plus cette démarche nécessite de s'appuyer sur des essais de laboratoire pour la calibration.
- Pour évaluer un paramètre du matériau il est souvent nécessaire de combiner plusieurs techniques non destructives pour obtenir un résultat fiable.

Cependant, malgré leurs inconvénients, les techniques de CND restent toujours plus avantageuses que les techniques classiques basées sur le prélèvement d'échantillons.

1.2.3. Application des techniques de CND

Les techniques non destructives peuvent être utilisées pour:

- La détection : la réponse de différents matériaux à une sollicitation extérieure est différente. Ainsi le CND est souvent utilisé pour détecter tous les défauts ou anomalies dans une structure susceptibles d'altérer le bon fonctionnement de l'élément (par exemple : détecter des fissures par émission acoustique) ou pour déceler la présence d'un objet au sein d'une structure.
- La localisation : pour localiser des objets ou des défauts dans la structure par traitement des signaux (localisation des aciers de renforcement dans les structures en béton armé par technique radar par exemple). Les techniques de

CND ont pour objectif de construire un relevé des zones particulières, parmi différentes zones auscultées, en analysant des contrastes de mesures ou de propriétés s'il est possible d'inverser la mesure.

- La caractérisation des propriétés du matériau : telles que la teneur en eau, teneur en alcalin, la porosité, la cinétique de la corrosion ou les propriétés mécaniques du matériau. Le CND est utilisé pour détecter et caractériser la variation des propriétés du matériau entre deux structures ou au sein d'une structure.

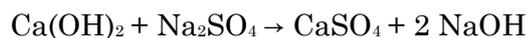
1.3. La corrosion et la durabilité du béton armé

La corrosion de l'acier est une des principales pathologies des ouvrages en béton armé. La corrosion conduit à la réduction de section des armatures et à la perte d'adhérence acier-béton. Une étude expérimentale sur des poutres en béton armé soumises à un environnement agressif pendant 14 ans montre que la corrosion entraîne une diminution de la capacité portante de près de 20 % et à une perte de 70% de la ductilité due en partie à la perte de ductilité des aciers tendus[Baroghel-Bouny et al., 2008].

La corrosion des armatures commence par la dépassivation de l'acier via l'abaissement du pH du milieu environnant, c'est le cas de la carbonatation, ou par pénétration d'agents agressifs, les ions chlorures en particulier. Dans les deux cas, la présence d'eau est nécessaire.

1.3.1. Le processus de corrosion de l'acier

Les principaux anhydres dans le clinker sont C_2S , C_3S , C_3A et C_4AF . Ils réagissent avec l'eau lors du malaxage du béton. L'hydratation des silicates C_2S , C_3S produit de la portlandite $Ca(OH)_2$ sous forme de cristaux légèrement solubles. La portlandite réagit avec les sulfates alcalins, présents en quantité mineure dans le ciment, pour donner les hydroxydes correspondants :



La présence en grande quantité des ions OH^- (des bases alcalines et de la portlandite) entraîne un pH élevé dans la phase liquide du béton (autour de 13). Dans ce milieu très basique de la phase liquide se forme une couche protectrice autour de l'acier. On parle alors de passivation des armatures. Dans les conditions normales les armatures dans le béton armé sont donc protégées thermodynamiquement par le béton d'enrobage et ne devraient normalement pas se corroder. Pourtant ce milieu protecteur n'est pas toujours

maintenu. Il peut disparaître suite à deux phénomènes qui sont la carbonatation et la pénétration des ions chlorures. On parle alors de dépassivation des aciers.

La corrosion a lieu en général en deux phases, selon le modèle de Tuutti (**Figure 1. 1**) :

- Période d'amorçage (zone I) ou période d'initiation : pendant cette période le milieu protecteur de l'acier est perturbé progressivement et les facteurs favorables à la corrosion se développent dans le béton. L'acier est dépassivé à la fin de cette période et la corrosion débute.
- La période de propagation (zone II): pendant cette période se forment les produits issus de la corrosion de l'armature. Ces produits (principalement les oxydes et hydroxydes de fer) ont un volume supérieur à celui de l'acier sain, entraînant par conséquent des contraintes qui peuvent provoquer une fissuration parallèle aux aciers qui diminue l'adhérence acier/béton, ainsi que l'éclatement du béton d'enrobage [Baron et al., 1992]. Dans la **Figure 1. 1**, le point D marque la destruction de l'enrobage, à partir de laquelle la dégradation de l'acier s'accélère.

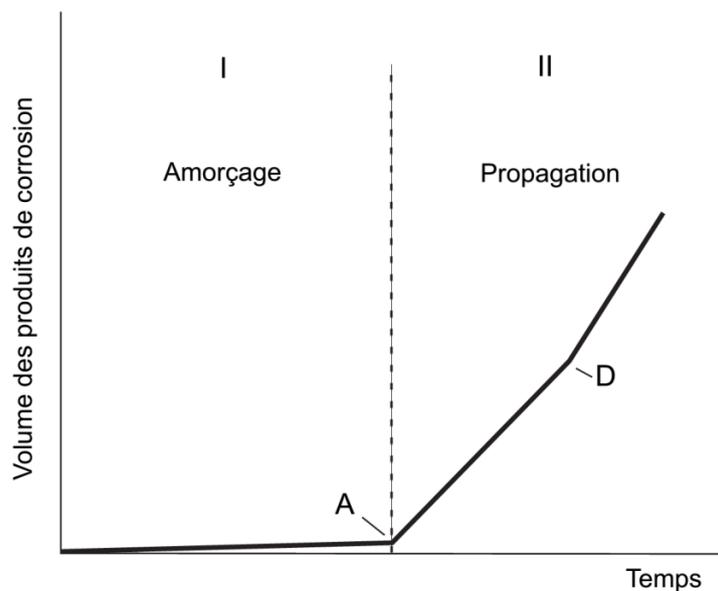


Figure 1. 1 : Dégradation des armatures en fonction du temps [Tuutti, 1982]

1.3.2. Causes de la corrosion de l'acier

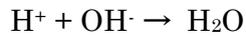
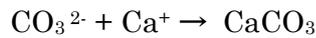
L'acier dans le béton ne peut se corroder que s'il est dépassivé. Cette dépassivation est essentiellement due à deux phénomènes que sont : la carbonatation du béton d'enrobage ou l'attaques par les ions chlorures.

1.3.2.1 La carbonatation

La carbonatation du béton est un phénomène naturel. Le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air pénètre dans le béton à travers son réseau poreux ou ses fissures. En présence d'eau (dans les pores), il provoque une réaction chimique dite de carbonatation avec la pâte de ciment hydratée. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, notamment la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en carbonate de calcium ou calcite CaCO_3 .



(1. 2)



Comme le volume molaire des produits de la carbonatation est supérieur à celui des hydrates initiaux, la formation de la calcite réduit la porosité du béton, ce qui est plutôt bénéfique.

Toutefois, la consommation de la portlandite et la formation des ions HCO_3^- et CO_3^{2-} suite à ce phénomène abaissent la concentration ionique des ions OH^- (formation d'eau selon les équations (1. 2)) et donc le pH de la solution interstitielle du béton. Lorsque le front de carbonatation (l'épaisseur du béton carbonaté dont le pH atteint une valeur autour de 9) parvient au niveau de l'acier, celui-ci est dépassivé et le processus de corrosion peut démarrer.

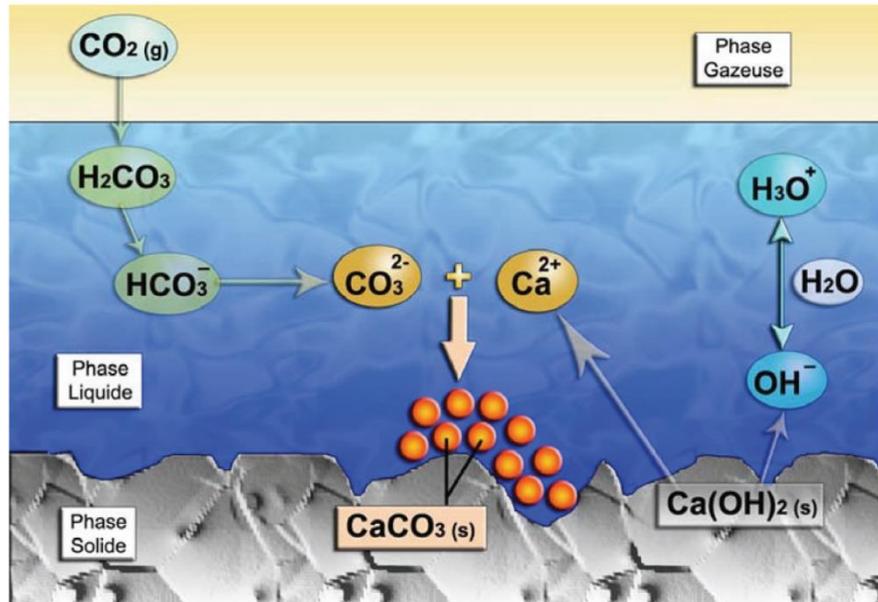


Figure 1. 2 : Mécanisme de la carbonatation de la portlandite [Thiery et al, 2007 cité dans Baroghel-Bouny et al., 2008]

La vitesse de propagation du front de carbonatation dépend des caractéristiques intrinsèques du béton (porosité, teneur en eau et en portlandite, etc.) mais aussi des conditions du milieu environnant (le taux de CO_2 dans l'air, l'humidité relative, la température, etc.)

1.3.2.2 La pénétration des ions chlorure

Les ions chlorures peuvent pénétrer dans le béton par absorption capillaire et se déplacer avec la phase liquide par convection lorsque la structure en béton est soumise à des cycles d'humidification/séchage. Les chlorures pénètrent alors par diffusion dans les zones saturées (ou dans les zones partiellement saturées aux endroits où le degré de connectivité de la phase liquide le permet). La vitesse de pénétration des ions chlorure dépend donc des caractéristiques du matériau et des cycles d'humidification/séchage qu'il subit.

On peut distinguer deux types de chlorures différents dans le béton[Baroghel-Bouny et al., 2008]:

- Les chlorures libres qui se trouvent sous forme ionique dans la solution interstitielle. Ils sont extractibles à l'eau et sont de ce fait appelés également « chlorures solubles dans l'eau » ;

- Les chlorures totaux, qui incluent, outre les précédents, ceux fortement adsorbés sur les C-S-H et ceux chimiquement liés dans la matrice cimentaire sous forme de chloroaluminates de calcium.

On note que seuls les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépassivation et de corrosion des armatures. Cela montre que la présence de l'eau est indispensable pour la pénétration des chlorures et pour la dépassivation des aciers.

La corrosion en présence des ions chlorure est locale. Il s'agit de la formation de piqûres de corrosion.

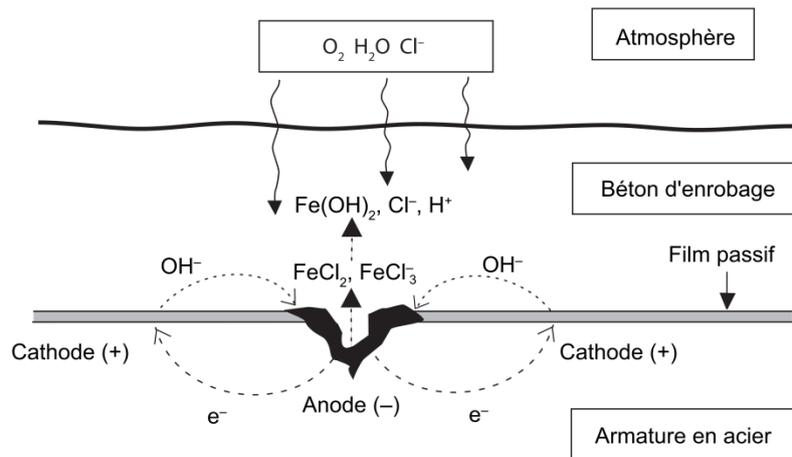
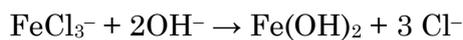


Figure 1. 3 : Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures
[Duval, 1992]

La présence des ions chlorure conduit à la dissolution locale de la couche passive et à la migration à travers cette couche. En effet, les ions Cl^- réagissent avec les ions Fe^{2+} pour former du chlorure de fer.

Celui-ci consomme les ions hydroxyle, migre et s'oxyde plus loin en formant de la rouille :



On constate donc que les ions Cl^- sont libérés et recyclés, ce qui explique que la rouille ne contient pas de chlorures, même si des chlorures ferreux sont formés lors des étapes intermédiaires de la réaction. Ainsi, cette corrosion est susceptible de se poursuivre au même endroit. La corrosion de l'armature en présence de chlorures est dangereuse car elle entraîne une réduction locale de la section d'armature.

La consommation des ions OH^- par des chlorures de fer (1. 3) baisse encore le pH du milieu environnant, favorisant l'accélération de la corrosion.

1.3.2.3 Le rôle majeur de l'eau dans la durabilité du béton et des ouvrages

La dégradation du béton armé est interprétée par la variation de ses paramètres, notamment la porosité et les caractères de sa solution interstitielle. La carbonatation contribue à la réduction de la porosité du béton et du pH de la phase liquide, la pénétration des ions chlorures dépassive les aciers, etc. Pour ces deux phénomènes inducteurs de la corrosion des armatures d'acier, la teneur en eau du matériau et la concentration ionique en OH^- jouent un rôle très important. Ces phénomènes ne pourraient pas se réaliser en absence ou insuffisance d'eau.

Dans le béton armé, la corrosion elle-même nécessite de l'eau pour se développer. L'eau est donc un paramètre clé pour la durabilité du béton armé et des ouvrages. Connaître la teneur en eau du matériau permet donc d'identifier les zones potentiellement à risque pour la corrosion. En particulier, le risque de corrosion des armatures d'acier peut être estimé par l'étude de la zone du béton d'enrobage [Millard, 1991]. L'évaluation de la teneur en eau et de son gradient contribue donc à un meilleur diagnostic des ouvrages.

Parmi les techniques de CND, la mesure de résistivité électrique apparaît, dans la littérature, comme un moyen pertinent pour la caractérisation de la teneur en eau. C'est ce qui va être discuté dans le paragraphe suivant.

1.4. La résistivité électrique

1.4.1. Définition

La résistivité électrique est une caractéristique spécifique d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique. Autrement dit, c'est la résistance d'un cube unitaire d'un m de côté face au passage du courant. Contrairement à la résistance, la résistivité est une grandeur constante du matériau. Elle s'exprime souvent en ohm.mètre [$\Omega\cdot\text{m}$] dans le système international mais on trouve aussi dans la littérature des valeurs en $\Omega\cdot\text{cm}$ ou $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$.

Son inverse, la conductivité électrique (σ), est la capacité du matériau à laisser passer le courant électrique. Elle est donnée en siemens par mètre ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$).

La résistivité s'exprime par l'équation suivante

$$\rho = \frac{R.S}{L} \quad (1.4)$$

Où ρ : résistivité électrique [$\Omega.m$]

R : résistance électrique [Ω]

L : longueur de l'échantillon [m]

S : section plane de l'échantillon [m^2]

La valeur de la résistance R s'obtient en faisant le rapport de la différence de potentiel entre les deux surfaces opposées à l'intensité du courant qui traverse le matériau (loi d'Ohm).

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (1.5)$$

Avec : ΔV : différence de potentiel électrique [V]

I : l'intensité du courant [A]

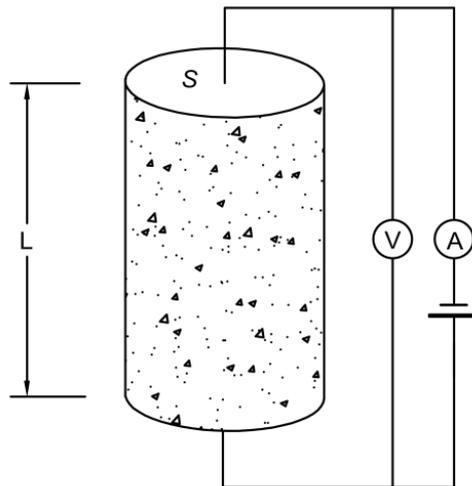


Figure 1. 4 : Illustration du principe de la mesure de résistivité

La gamme de résistivité électrique du béton est très large, en fonction de sa composition et des conditions environnantes (**Tableau 1. 1**).

Tableau 1. 1 : Gamme de résistivité électrique de différents bétons [Polder et al., 2000]

Environnement	Résistivité électrique ^(*) [$\Omega.m$]	
	Ciment Portland Ordinaire (CEM I)	Ciment contenant le laitier de haut fourneau (>65%) ou cendre volante (>25%) ou fumée de silice (>5%)
Très humide, submergé, salle d'arrosage	50 – 200	300 – 1000
A l'extérieur, conditions naturelles	100 – 400	500 – 2000
A l'extérieur, protégé contre la carbonatation [20°C/80%RH]	200 – 500	1000 – 4000
Carbonaté	≥ 1000	2000 – 6000 et plus
A l'intérieur [20°C/50%RH]	≥ 3000	4000 – 10000 et plus
(*) : Mesure sur les structures existantes (âgées de plus de 10 ans)		

1.4.2. Conduction du courant électrique dans les structures en béton armé

La propagation du courant électrique dans le matériau peut suivre trois modes de conduction distincts qui sont la conduction électrolytique, électronique, et diélectrique [Whittington et al., 1981]. Le dernier mode de conduction a lieu dans les matériaux très peu conducteurs, voire isolants ayant un très faible nombre voire pas de charges électriques libres. Dans notre étude, on ne s'intéresse qu'aux deux premiers modes concernant le passage du courant dans le béton armé qui sont régis par la loi d'Ohm (1. 5).

- **La conduction électrolytique**

Ce mode correspond au déplacement des charges électriques portées par les ions qui circulent dans l'électrolyte sous l'effet du potentiel. Généralement le squelette granulaire du béton est un très mauvais conducteur. La conduction du courant électrique se manifeste essentiellement à travers les réseaux poreux dans la pâte de ciment par l'intermédiaire de la solution interstitielle [Telford et al., 1990].

La résistivité électrolytique du matériau peut être formulée par la loi d'Archie [Archie, 1942] :

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \Phi^{-m} \cdot S_r^{-n} \quad (1.6)$$

Avec ρ : la résistivité électrolytique du matériau [$\Omega \cdot m$].

ρ_w : la résistivité de la solution interstitielle [$\Omega \cdot m$].

Φ : la porosité du matériau.

S_r : le degré de saturation.

a , m et n : des constantes telles que : $0,5 \leq a \leq 2,5$; $1,3 \leq m \leq 2,5$ et $n \approx 2$ [Naar, 2006].

Dans le cas du béton, la conduction qui se fait par l'intermédiaire de la solution présente dans les pores est dominante [Lataste, 2002]. Comme le courant passe par le réseau poreux de la matrice cimentaire, la résistivité électrique prend en compte la porosité et la connectivité des pores, comme rapporté par [Andrade et al., 1996], mais surtout par l'électrolyte de la phase aqueuse, c'est-à-dire la teneur en eau et la concentration ionique de la solution interstitielle.

- **La conduction électronique**

Il s'agit de la conduction du courant électrique dans les matériaux contenant des électrons libres comme les métaux. Dans le cas du béton armé ce phénomène est présent dans les armatures d'acier ou éventuellement dans les fibres métalliques.

1.4.3. Résistivité apparente

La résistivité électrique mesurée sur une surface est appelée la résistivité apparente (ρ_a), qui ne correspond pas à la résistivité réelle du matériau. Cette valeur dépend de l'ensemble des éléments présents dans le milieu que traverse le courant électrique, mais aussi du dispositif de mesure (dimensions et géométrie). La résistivité apparente est donnée par la relation suivante :

$$\rho_a = k \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1.7)$$

Où ρ_a : résistivité apparente du matériau [$\Omega \cdot m$]

k : facteur géométrique, qui varie en fonction du type de dispositif et de la configuration utilisée [m]

ΔV : différence de potentiel mesurée [V]

I : intensité du courant électrique injecté [A]

Lorsqu'un courant est injecté sur la surface d'une structure le courant circule librement dans le milieu. S'il est homogène, semi-infini et isotrope, la majorité du courant traverse la zone entre la surface et l'épaisseur équivalente à l'écartement des sources [Lataste, 2002]. La résistivité mesurée est donc surtout influencée par l'homogénéité du matériau dans cette zone, mais il faut bien comprendre que le cas du milieu homogène semi-infini est un cas idéal qui ne correspond pas aux structures réelles étudiées.

La présence des objets conducteurs dans un matériau résistant (cas du béton armé) risque de provoquer des erreurs dans la mesure de résistivité. Ils perturbent significativement la circulation du courant électrique entre les sources de courant. Selon [Telford et al., 1990] les lignes de courant subissent un changement de direction brutale en passant d'un milieu à un autre n'ayant pas la même résistivité électrique. Comme le courant électrique circule de façon préférentielle dans les milieux les plus conducteurs, la résistivité apparente mesurée est donc plus faible que la résistivité obtenue dans le cas du milieu homogène infini.

1.4.4. Les techniques existantes pour la mesure de résistivité

1.4.4.1. Mesure par transparence

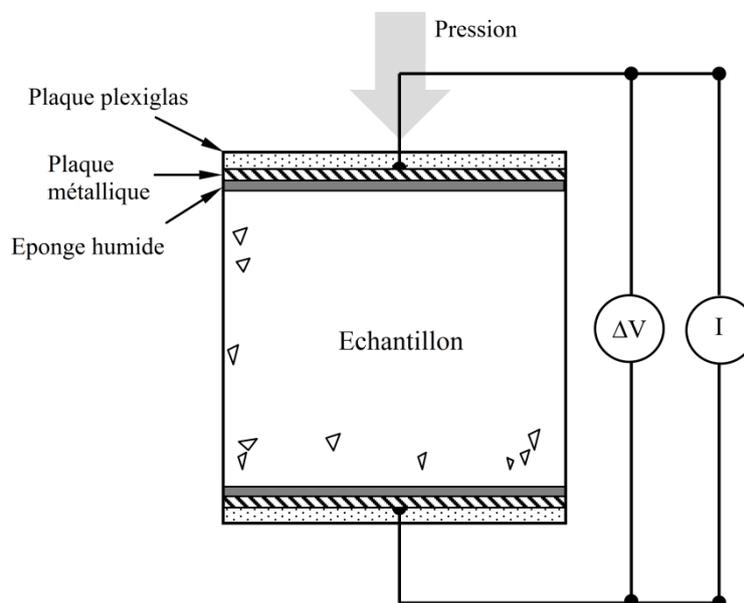


Figure 1. 5 : Schéma de mesure de résistivité par transparence en laboratoire
[McCarter et al., 2015]

Pour la mesure en transparence, un courant électrique est imposé entre deux extrémités d'une éprouvette grâce à des électrodes métalliques puis la différence de potentiel et

l'intensité de courant entre ces deux électrodes sont mesurées. La difficulté principale est d'assurer le bon contact entre les électrodes et l'éprouvette. Pour ce faire, on utilise généralement des éponges humides et on applique une certaine pression aux électrodes. Ces conditions ne sont pas toujours assurées pendant les mesures in situ, cette disposition n'est pas donc très adaptée sur ouvrages à cause de nombreuses contraintes techniques.

Du Plooy [Du Plooy, 2013] a développé un dispositif de mesure composé d'un multi-anneaux pour les mesures de résistivité en laboratoire (**Figure 1. 6**). Ce matériel doté de cinq électrodes sous forme d'anneaux, uniformément écartés sur la hauteur totale de l'échantillon, permet de mesurer la différence de potentiel entre deux électrodes quelconques. La longueur de l'échantillon testé est donc modifiable, permettant d'étudier l'homogénéité du béton.

Cette configuration de mesure est intéressante parce que les mesures avec quatre électrodes sont plus stables et plus fiables que celles avec deux électrodes, comme rapporté par [Gowers et al., 1999], à cause d'une plus faible sensibilité à la résistance de contact et à la polarisation d'électrodes.

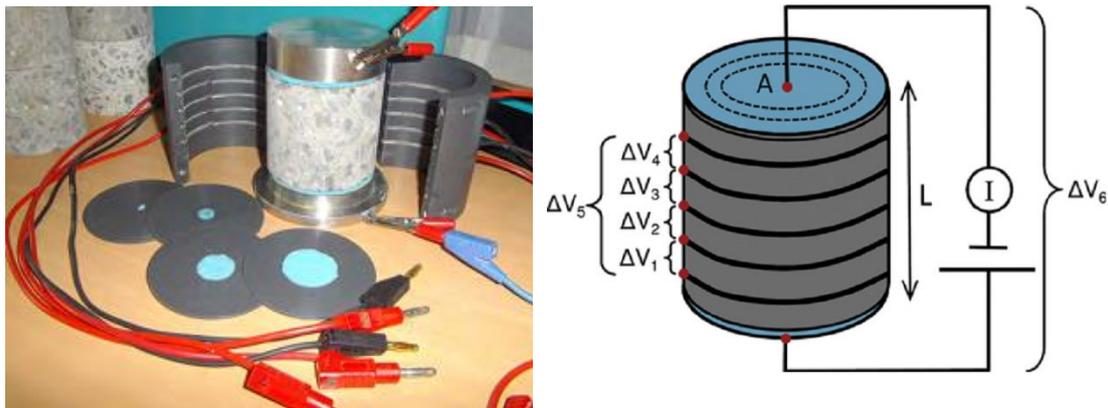


Figure 1. 6 : Le dispositif multi-anneaux développé dans la thèse de [Du Plooy, 2013].

1.4.4.2. Mesure sur site

- Mesure de la résistivité du béton d'enrobage

Il s'agit d'une méthode de mesure de la résistivité du béton d'enrobage, c'est à dire du béton situé entre les armatures métalliques et la surface libre, décrit dans les travaux de recherche de [S. Feliu et al., 1996] qui poursuivent ceux de [Newman, 1966]. Dans cette méthode, l'auteur a calculé la chute ohmique à partir de la résistance R entre un disque, de diamètre d , considéré comme une électrode de travail (WE), situé sur la surface du matériau et une contre électrode (CE) de taille largement plus grande, située à l'infini.

Dans la recherche de Feliu et al., la contre électrode est la barre d'acier. La résistance mesurée est donc la somme de la résistance du béton et de la résistance de polarisation de l'acier (résistance de transfert de charges entre l'acier et la solution interstitielle). La résistance électrique mesurée entre WE et CE est une fonction de la résistivité comme indiqué par la relation (1. 8):

$$R = \frac{\rho}{2d} \quad (1. 8)$$

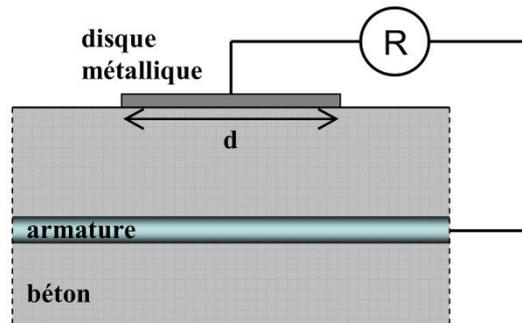


Figure 1. 7 : Principe de la mesure de la résistivité du béton d'enrobage [Naar, 2006]

Cette méthode est actuellement couplée avec les mesures de vitesse de corrosion afin d'évaluer la résistance du béton d'enrobage. Comme l'acier est polarisable la résistance mesurée dépend fortement de l'état (passif ou actif) de l'acier.

La technique présente cependant des inconvénients ; tout d'abord la nécessité de connecter le dispositif de mesure (le disque) aux armatures et ensuite la sensibilité de la méthode à l'épaisseur de béton d'enrobage ainsi qu'à l'état électrochimique de l'acier.

- Mesure de la résistivité par sondes noyées

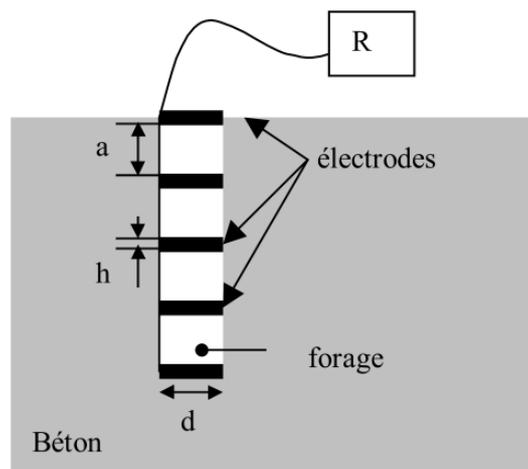


Figure 1. 8 : Principe simplifié de la mesure de résistivité par sondes noyées

Les sondes sont des électrodes métalliques noyées dans le matériau à différents niveaux pour caractériser les propriétés du béton à plusieurs profondeurs (**Figure 1. 8**). Il est donc nécessaire de réaliser un forage dans le béton pour y introduire le dispositif multi-anneaux. La mesure de la résistance électrique est effectuée entre deux anneaux à différentes profondeurs. Cette méthode est décrite par [Bäßler et al., 2000], le même principe est employé dans la thèse de [Du Plooy, 2013].

La résistivité est déterminée par l'équation **(1. 9)** :

$$\rho = \frac{h}{\ln\left(\frac{a - \frac{d}{2}}{\frac{d}{2}}\right)} \cdot \frac{\Delta V}{I} = k \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1. 9)$$

Avec :

ΔV : différence de potentiel [V]

I : intensité du courant électrique [A]

h : longueur des électrodes [m],

a : distance entre les électrodes considérées [m]

d : diamètre des électrodes [m]

k : facteur géométrique de la sonde noyée [m]

Cette technique peut être utilisée pour évaluer l'humidité ou la teneur en ions dans le sens perpendiculaire à la surface, qui sont des paramètres favorisant la corrosion des armatures d'acier.

Ce dispositif est pertinent pour les ouvrages neufs dans lesquels le dispositif est mis en place avant le coulage du béton. Dans les ouvrages existants il n'y a pas d'application connue à ce jour.

- Mesure de la résistivité en surface

Plusieurs configurations sont appliquées pour mesurer la résistivité d'un matériau à partir de la surface. L'une d'entre elles consiste à utiliser deux électrodes (celle d'injection et celle de mesure) et un générateur, qui forment avec le matériau un seul circuit sur lequel l'intensité et la différence de potentiel aux bornes du générateur sont mesurées (**Figure 1. 9a**). A partir de ces deux grandeurs et grâce à la loi d'Ohm, on peut déduire la résistance du circuit.

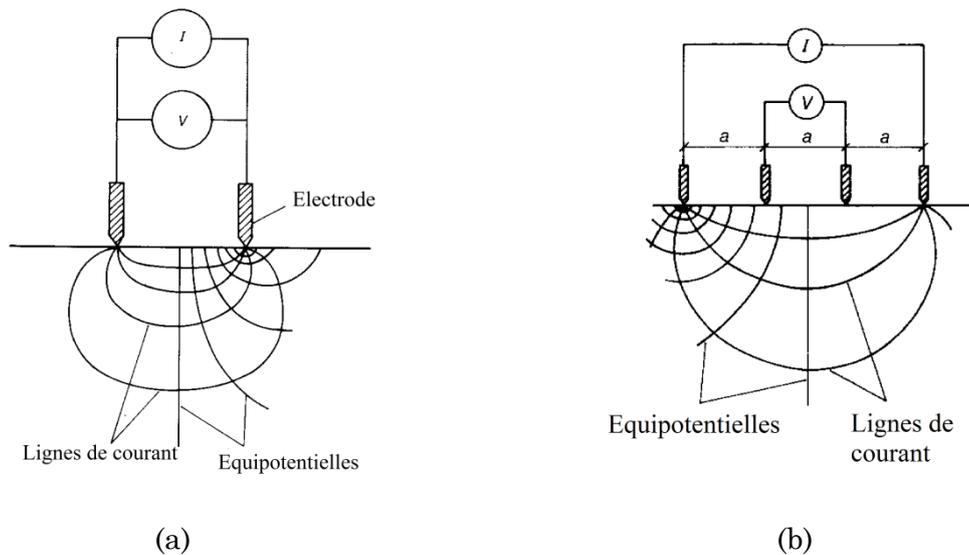


Figure 1. 9 : Mesure de résistivité avec dispositif bipolaire (a) et quadripolaire de type Wenner (b)

Selon certains auteurs [Millard, 1991; Breyse et al., 2005], l'utilisation d'un dispositif à deux électrodes est inconcevable pour les raisons suivantes :

- L'expression de la résistance du matériau entre une électrode d'injection et un point donné dépend de l'environnement immédiat de l'électrode. Ce n'est donc pas le matériau qui est ausculté mais les conditions locales de l'implantation de l'électrode.
- La géométrie des lignes de courant dans le matériau n'est pas maîtrisée, il y a donc une certaine difficulté à déduire la résistivité à partir de la mesure de résistance.
- La résistance mesurée avec le dispositif deux électrodes est sensible à la taille de l'électrode, même pour les matériaux homogènes. Sur la **Figure 1. 10**, on note bien que les résultats de mesure et de modélisation avec le quadripôle sont identiques, signifiant que dans ce cas les mesures avec le dispositif quadripolaire ne sont pas influencées par le contact électrode-structure. Les résultats restent constants en fonction du rapport Φ/a , alors que les mesures avec le bi-pôle dépendent fortement de ce rapport. La différence entre les résultats de la modélisation et des mesures avec le bi-pôle est due au contact électrode-structure [Millard, 1991]. Ils ont également indiqué que 90% de la résistivité électrique mesurée est représentative d'une zone d'environ dix fois le rayon de l'électrode. Une électrode ayant un rayon faible donnerait un résultat plus élevé qu'une autre plus large.

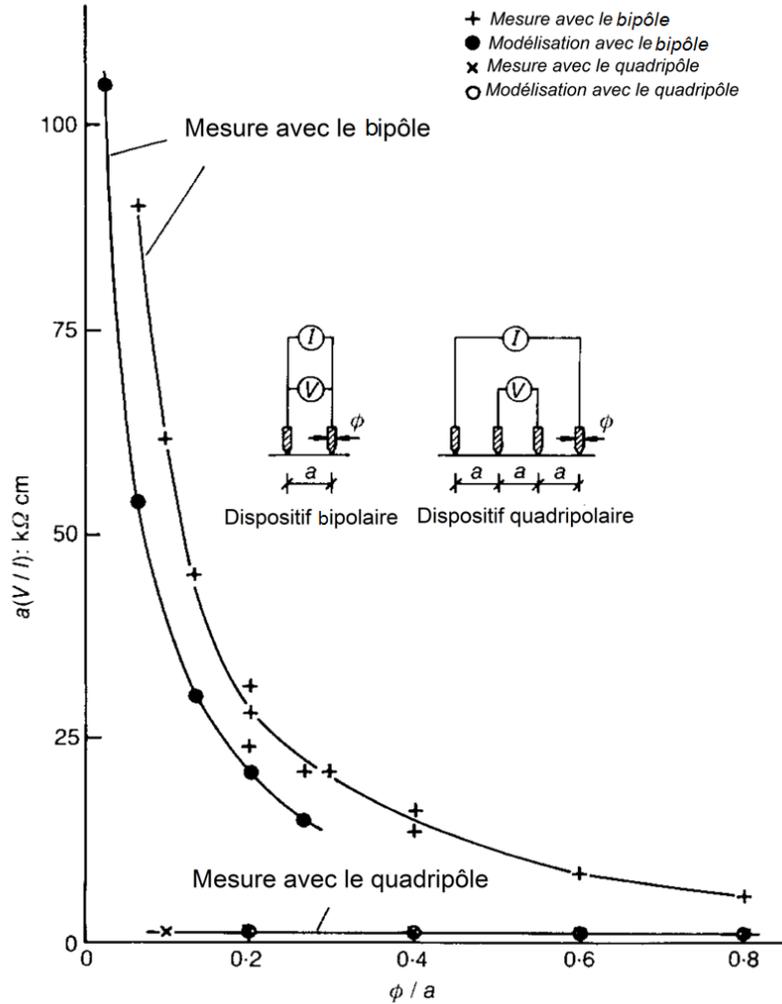


Figure 1. 10 : Influence de la taille de l'électrode sur la résistivité mesurée avec le dispositif à deux et à quatre électrodes [Millard, 1991]

Pour ces diverses raisons les mesures de résistivité sur le matériau utilisent classiquement quatre électrodes en séparant les circuits d'injection et de potentiel (la **Figure 1. 9b** illustre la mesure avec le dispositif quadripolaire en configuration Wenner). Le principe de mesure de la résistivité électrique est simple, il consiste à injecter un courant électrique issu d'une source artificielle (C1 et C2) et de mesurer la différence de potentiel P_i au voisinage des lignes de courant créées par cette injection ponctuelle, ou le long d'un linéaire (au moyen d'électrodes de courant C_i). On mesure donc les gradients de potentiel, et leurs variations dues à des discontinuités électriques dans la zone auscultée.

1.4.5. Paramètres influençant la résistivité du béton

[Gowers et al., 1999] définissent six principales sources d'erreur lors de l'évaluation de la résistivité : la géométrie, la non homogénéité du béton, le contact en surface, les couches de résistivité différente, l'armature d'acier et la variation de l'environnement de mesure.

1.4.5.1. Paramètres concernant les propriétés du béton

a. Granulats, ciment et additions

- Granulats

Les granulats sont quasiment isolants et ainsi leur résistivité électrique est beaucoup plus grande que celle de la pâte. Ils participent très peu à la conduction électrique du courant dans le béton [Forde et al., 1982]. Toutefois, l'influence des granulats dans un béton est visible et peut être étudiée de différentes manières, en fonction de leur volume total, de leur proportion volumique, de leur nature, ou de leur granulométrie.

Wedding et al. [Wedding et al., 1979] ont montré qu'il existe une corrélation entre la résistivité électrique du béton et le rapport Granulat/Ciment : plus le volume de granulats est important, plus la résistivité apparente est élevée. En terme de répartition granulométrique, [Morris et al., 1996] a indiqué que la variabilité des mesures augmente lorsque le diamètre du plus gros granulat augmente (**Figure 1. 11**). Cette figure montre le pourcentage cumulé des résultats en fonction du rapport résistivité mesurée/ résistivité moyenne pour différents granulats. On observe une variation des mesures plus importante sur l'échantillon utilisant les gros granulats tandis que la variation des mesures sur deux autres échantillons ayant la même taille maximale du granulat est similaire.

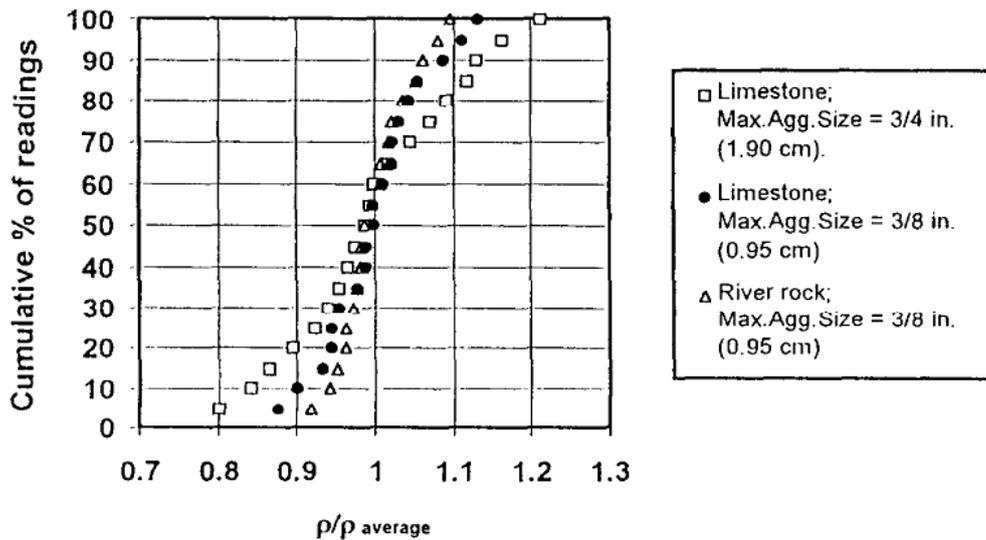


Figure 1.11 : Influence de taille et du type de granulat sur la variabilité de la résistivité [Morris et al., 1996].

L'influence de la taille des granulats est très limitée si l'écartement minimal entre électrodes a (dans la configuration Wenner) vérifie la condition suivante $a > 2,5D$ avec D le diamètre du plus gros granulat. De manière classique, on travaille avec un écartement minimal entre électrodes de 5 cm. [Breysse et al., 2005]

La nature des granulats influence également la mesure de résistivité. Les travaux de [Morris et al., 1996] montrent que la variabilité de la mesure diminue avec l'augmentation du contraste de résistivité granulat/pâte, bien que l'influence du type de granulat sur la variabilité des mesures soit faible.

- Ciment et additions

En fonction du type de ciment, la concentration des ions silicate, aluminate, hydroxyde... dans la solution interstitielle peut être différente. Ce phénomène influence la circulation des charges électriques libres qui assurent la conduction électrolytique dans le béton. Les rapports de résistivité électrique peuvent varier de 1 à 100 pour différents bétons fabriqués avec différents ciments dans les mêmes conditions de conservation et de mesure [Hammond et al., 1955; Neville, 2000].

Hammond et al. [Hammond et al., 1955] ont trouvé un rapport de 20 entre un béton coulé avec le ciment portland ordinaire et un ciment à haute teneur en aluminates. [Medeiros-Junior et al., 2016] ont conclu que les ciments contenant du laitier de haut fourneau et de la pouzzolane ont une résistivité plus élevée qu'un ciment ordinaire. [Naar, 2006] a reporté que la présence de fumée de silice augmente considérablement la résistivité, jusqu'à 10 fois par rapport à un béton sans fumée de silice. [Cabrera et al.,

1994] ont montré dans leurs études que le remplacement de 30% de ciment par des cendres volantes augmente de 20% la résistivité électrique du béton.

L'ajout de ces composants dans le ciment a pour effet de réduire la porosité du béton (la taille, la connectivité, le volume) ainsi que la perméabilité [Medeiros-Junior et al., 2016]. Les particules des additions peuvent entrer dans les pores inter-granulaires et rendre le béton plus compact car leur taille est généralement plus petite que celle du ciment Portland. Les hydrates formés suite aux réactions pouzzolaniques secondaires diminuent également la porosité. La résistivité augmente aussi plus significativement pour les ciments composés contenant des additions pouzzolaniques que pour un ciment portland ordinaire.

- Adjuvants et additifs

L'ajout d'adjuvants et d'additifs dans le béton a pour but de modifier différentes propriétés du matériau, afin d'atteindre certains objectifs. Par exemple, si on souhaite avoir un béton à prise plus lente, les retardateurs sont utilisés ou dans le cas contraire, on utilise des accélérateurs de prise. Pour faciliter la mise en œuvre du béton et améliorer sa durabilité, les plastifiants et les superplastifiants sont employés pour leur capacité à réduire la quantité d'eau dans la formulation de béton tout en maintenant une consistance plastique. La présence de ces éléments peut modifier la nature chimique du béton, ainsi que sa microstructure, et donc affecter sa résistivité électrique [Lakshminarayanan et al., 1992; Cabrera et al., 1994].

L'utilisation de fibres (métalliques, de carbone, de verre, ou synthétiques) peut également modifier les caractéristiques du béton, ce qui perturbe ses propriétés électriques [Soutsos et al., 2001; Wen et al., 2001]. Lataste et al. [Lataste et al., 2008] ont utilisé la résistivité électrique pour caractériser la distribution des fibres métalliques dans le béton armé et ont conclu que la technique est capable de fournir des indications sur l'orientation locale des fibres métalliques.

b. Le rapport E/C

La résistivité électrique et le rapport E/C sont inversement liés [Keyvani, 2013]. Le rapport E/C joue un rôle important dans la formation de la microstructure du liant et de la concentration ionique de la solution interstitielle. Comme expliqué au paragraphe 1.4.2, le courant électrique est porté par les ions libres dans la solution électrolytique présente dans le réseau poreux. Plus le béton contient de pores et plus ceux-ci sont ouverts et connectés, plus le courant circule facilement dans le béton et par conséquent plus la résistivité apparente est faible. Lorsque l'humidité relative et les conditions environnementales sont stables, la résistivité électrique du béton augmente pour un béton ayant un rapport E/C plus faible [Polder et al., 2000]. Ces mêmes auteurs ont également proposé d'utiliser la mesure de résistivité électrique pour étudier la variation locale du rapport E/C. Cette remarque a été également confirmée par [Lataste, 2002]

grâce à des mesures réalisées en laboratoire sur des échantillons en béton de différentes natures (béton ordinaire et béton haute performance), saturés d'eau (**Figure 1. 12**).

Les effets du rapport E/C sur le béton sont également étudiés par différents auteurs [Hammond et al., 1955; Wedding et al., 1979; Whittington et al., 1981].

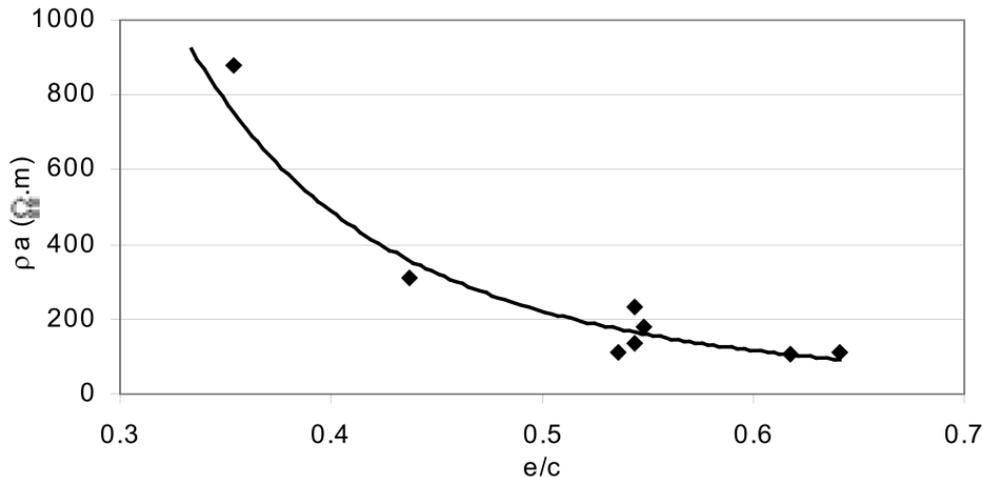


Figure 1. 12 : Influence du rapport E/C sur ρ_a [Lataste, 2002]

c. La carbonatation

Comme présenté dans la section 1.3.2.1 la carbonatation conduit à une diminution de la porosité du béton et une diminution du pH de la solution interstitielle. Le réseau poreux est le chemin principal de la conduction électrolytique du courant. Par conséquent, ce phénomène provoque l'augmentation de la résistivité apparente du béton.

La carbonatation entraîne l'augmentation de la résistance de contact en surface, la mesure de résistivité est donc plus difficile à réaliser. Certains travaux ont proposé d'humidifier la surface de mesure mais cela risque de modifier l'état hydrique de la structure auscultée.

L'influence de la couche résistive de la surface de mesure sur la résistivité du béton a été étudiée [Millard et al., 1992]. Les mesures ont été effectuées avec un dispositif quadripolaire de type Wenner. Il est observé que l'influence de la couche de béton carbonatée varie en fonction de la relation entre son épaisseur et l'écartement entre électrodes. Si l'épaisseur carbonatée est faible par rapport à l'écartement d'électrodes, l'influence de cette couche est moins visible. Elle est plus significative si l'épaisseur est égale à l'écartement du dispositif.

Outre la carbonatation, d'autres altérations du béton telles que la pénétration des ions chlorures, la réaction alcalis-granulats ou les attaques sulfatiques ont une forte influence sur la résistivité du béton.

L'ensemble des facteurs décrits ci-dessus (rapport E/C, type de ciment, adjuvants et additifs, carbonatation, etc.), influence la résistivité électrique par l'intermédiaire de la porosité, à savoir par son volume, sa taille, sa connectivité,... mais aussi par la phase aqueuse du béton. Comme la conduction du courant dans le béton s'effectue principalement à travers le réseau poreux de la matrice cimentaire la porosité et ses paramètres ont une grande influence sur la résistivité du béton. Différents auteurs ont étudié la relation entre la résistivité électrique et la porosité du béton. [Lakshminarayanan et al., 1992] montrent que la résistivité électrique est un indicateur indirect de la distribution des pores dans le béton, ainsi que sa perméabilité. De manière générale la résistivité électrique augmente avec la diminution de la porosité. L'influence de la phase liquide du béton sera discutée dans la section 1.4.5.3 de ce chapitre.

d. Influence d'une couche conductrice près de la surface de mesure

La présence d'une couche conductrice en surface de mesure influence le résultat en diminuant la résistivité apparente obtenue. Millard a rapporté qu'une couche résistive en surface influence moins la mesure de résistivité si son épaisseur est suffisamment faible par rapport à l'écartement des électrodes [Millard, 1991]. Au contraire une couche conductrice engendre des erreurs significatives même si son épaisseur est faible en comparaison de l'écartement des électrodes.

1.4.5.2. Paramètres liés aux conditions de mesure

a. Courant d'injection

Pour les mesures de résistivité électrique du béton, le courant alternatif est couramment recommandé. Lorsqu'un courant continu est injecté sur la surface des structures les charges électriques du béton se mobilisent vers l'interface électrode-béton. Cette mobilisation crée une double couche qui polarise les électrodes. L'emploi du courant alternatif évite la polarisation d'électrodes et la formation de cette double couche. Il est donc préférable dans la mesure de la résistivité électrique du béton d'utiliser du courant alternatif. La fréquence du courant couramment utilisé se trouve entre 1 et 1000 Hz [Lataste, 2002; McCarter et al., 2015]. L'appareil utilisé dans certains travaux tels que [Morris et al., 1996] et [Sengul et al., 2008] a une fréquence de 13Hz (signaux trapézoïdal) et dans la thèse de Lataste [Lataste, 2002] il est reporté qu'il existe toutefois des appareils utilisant de très faibles fréquences (1-2 Hz) avec une correction de la polarisation d'électrodes.

L'intensité du courant ne doit théoriquement pas influencer la mesure de résistivité mais pour des raisons pratiques, le choix de l'intensité du courant est une préoccupation pour la réalisation des mesures. Si la résistance de contact R est grande, il faut travailler avec un courant de faible intensité pour diminuer la différence de potentiel ΔU , selon la formule classique d'Ohm. Les travaux de Erwins, (reportés dans [Lataste, 2002]), basés

sur l'étude de l'incertitude des mesures de résistivité en fonction de l'intensité I , montrent que l'erreur augmente avec l'augmentation de I . Il est également déconseillé d'utiliser le courant ayant une intensité inférieure à $200\mu\text{A}$ [Millard et al., 1989].

b. Température

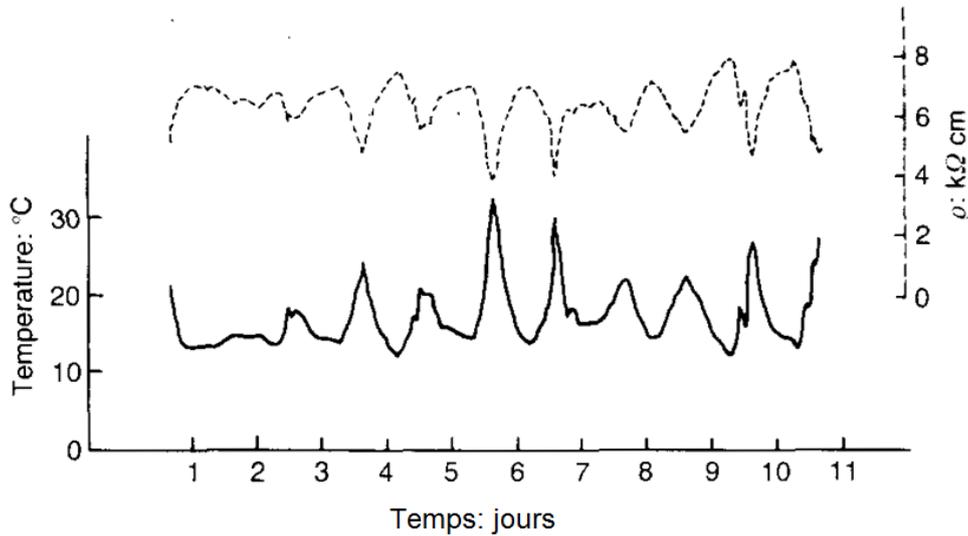


Figure 1.13 : Variation de la résistivité électrique avec la température [Millard, 1991].

La température ambiante influence la résistivité mesurée. En général plus la température est haute plus la résistivité est faible (**Figure 1.13**). Cet effet est dû à l'influence de la température sur la mobilité des ions et sur la thermodynamique des réactions ion-ion et ion-solide dans la matrice cimentaire et dans la solution interstitielle [Polder et al., 2000]. Il est recommandé d'éviter de réaliser les mesures dans les conditions extrêmes : à très haute ou très basse température [Polder, 2001].

L'effet de la température est lié à l'humidité, qui a aussi une forte influence sur la résistivité du béton. Il est reporté dans [Polder, 2001] que l'effet de la température varie suivant l'état hydrique du béton. La résistivité du béton diminue de 3 % pour une augmentation de la température d' 1 K dans le cas du béton saturé et de 5%/K pour un béton sec. Cela peut être expliqué par le fait qu'à une humidité relative plus faible la solution interstitielle est plus concentrée et se trouve dans les pores plus petits. La surface de contact du liquide aux pores est donc plus élevée et par conséquent l'interaction entre le solide et les ions est plus forte.

c. Ecartement des électrodes

Plusieurs études ont montré que la profondeur investiguée par la technique de résistivité électrique croît avec l'augmentation de l'écartement entre électrodes [Telford et al., 1990; Lataste, 2002]. La **Figure 1.14** représente l'évolution de la densité de courant passant

dans le matériau en fonction de la profondeur z d'un point P considéré et l'écartement d'électrodes L . Dans cette recherche, J_x représente la densité de courant passant par le point P, et J_0 correspond à la densité de courant pour $z = 0$. On peut remarquer sur la courbe de « L constant » que la répartition du courant électrique dans le milieu semi infini est graduelle ; en effet la densité de courant en surface est plus importante qu'en profondeur (courbe décroît lorsque z augmente). On constate également que 70% du courant passe dans la zone entre la surface et la profondeur équivalente à l'écartement des sources (L) et que seulement 30% va plus profondément. L'accroissement de la profondeur d'investigation est donc relié à l'accroissement de l'écartement du dispositif.

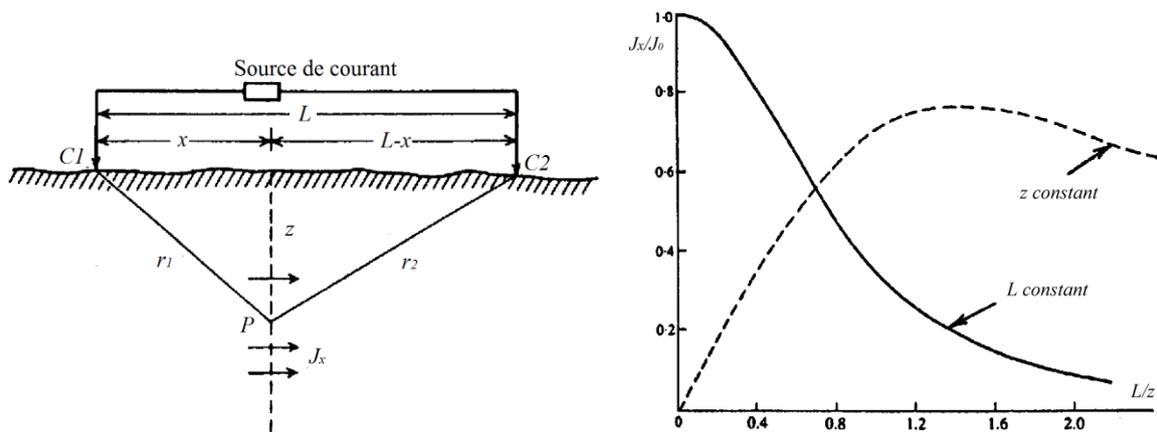


Figure 1. 14 : Densité de courant en fonction de la profondeur z et de l'écartement L des électrodes (J_0 correspond à J_x à $z = 0$) pour deux points d'injection sur la surface, selon [Telford et al., 1990].

La **Figure 1. 15** montre la fraction du courant circulant dans la direction x (J_x/J) en fonction de l'épaisseur z . On peut observer que la moitié de courant se répartit dans une épaisseur équivalente à la moitié de l'écartement d'électrodes ($J_x/J = 0,5$ quand $L/z = 2$).

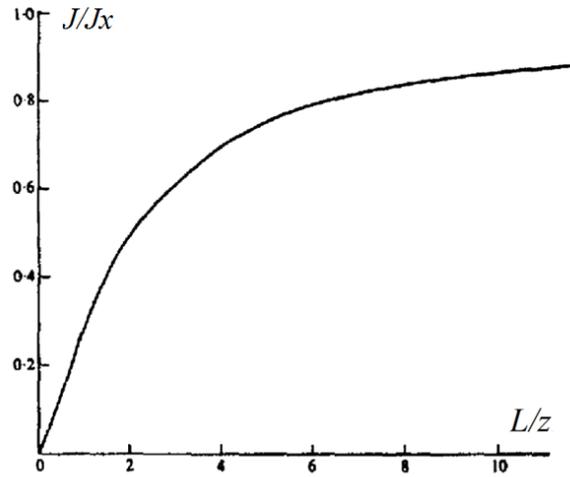


Figure 1. 15 : Fraction du courant circulant sous une épaisseur z pour un écartement d'électrodes L [Telford et al., 1990].

Du Plooy [Du Plooy, 2013] a observé la variation des résultats en fonction du nombre de mesures effectuées pour différents écartements d'électrodes. Dans cet essai le dispositif est soulevé et reposé à chaque nouvelle mesure. Le coefficient de variation obtenu est illustré par la **Figure 1. 16**. On trouve que le coefficient de variation augmente avec la réduction de l'écartement des électrodes pour le dispositif de type Wenner. Plus les électrodes s'écartent l'une de l'autre, plus le coefficient est faible. Cela signifie que le choix d'un écartement suffisamment grand est très important pour obtenir un résultat fiable et représentatif.

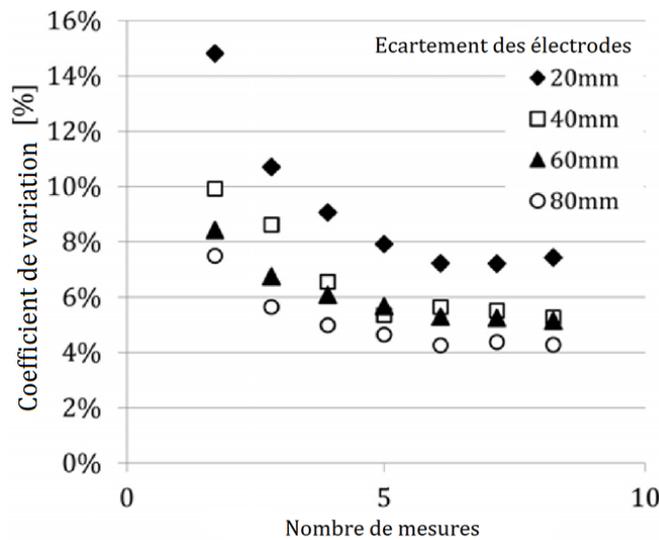


Figure 1. 16 : Coefficient de variation en fonction du nombre de mesures pour différents écartements d'électrodes [Du Plooy, 2013]

d. Résistance de contact

Il s'agit de la résistance d'une couche superficielle (d'une épaisseur de quelques centimètres) en surface de la structure auscultée. Ce béton de surface est généralement poreux et exposé directement à l'atmosphère ambiante qui risque de modifier la résistivité apparente. En effet, le passage du courant de l'électrode au matériau doit être favorisé par l'application d'un matériau conducteur sur la surface de contact électrode-béton. La solution simple la plus courante consiste à humidifier la surface de mesure. Toutefois, un film d'eau présent en surface peut engendrer des erreurs significatives [Gowers et al., 1993]. En mettant en place un protocole d'humidification du parement ausculté, Lataste [Lataste, 2002] a fait l'hypothèse que le biais est lié directement à l'évolution de l'humidité dans le matériau, et non à la présence d'un fin film humide à la surface du parement. En humidifiant la surface, l'eau progresse dans le béton par diffusion et influence la résistivité apparente mesurée jusqu'au séchage de la surface (Figure 1. 17).

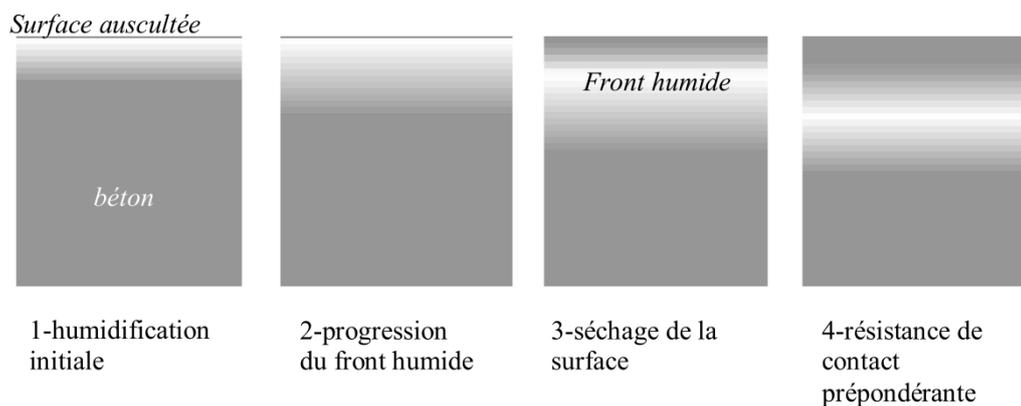


Figure 1. 17 : Schéma de propagation du front humide dans le matériau, selon l'hypothèse proposée dans [Lataste, 2002]

Les solutions alternatives sont l'emploi d'éponges humidifiées (à l'eau ou avec un liquide conducteur) à l'extrémité des électrodes, d'eaux gélifiées, de bentonite,... afin de modifier le moins possible l'état hydrique du matériau.

e. Effet de bord et influence des armatures

Les mesures de résistivité réalisées près du bord de la structure sont fortement perturbées [Bungey et al., 2006]. La présence de l'acier est également une source d'erreur pour la mesure de résistivité électrique [Millard, 1991; Polder, 2001]. Ces effets seront présentés plus en détail dans le Chapitre 2.

1.4.5.3. Résistivité électrique et teneur en eau

Différents auteurs ont montré que la teneur en eau ou l'humidité relative du béton ont une forte influence sur la résistivité électrique [Wedding et al., 1979; Sriravindrarah et al., 1982; Millard, 1991; S. Feliu et al., 1996; Breysse et al., 2005; Østvik et al., 2006; Hornbostel et al., 2013]. La résistivité présente une relation directe avec la porosité, la teneur en eau et la concentration ionique.

La résistivité du béton est fortement conditionnée par sa phase liquide. Plus la porosité du béton est forte, plus sa phase liquide peut être importante et par conséquent sa résistivité faible. [Koleva et al., 2008] a confirmé que la teneur en eau est le facteur majeur qui détermine sa valeur de résistivité électrique. Cependant, la résistivité est caractérisée par la mobilité des ions présents dans la solution interstitielle (tels que Na^+ , K^+ , OH^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+}). Ainsi, la valeur de la résistivité du béton est influencée par la concentration des ions dans le système poreux. Différents auteurs tels que [Polder, 1995; Gowers et al., 1999] ont montré que la diffusion des ions chlorures a une relation avec la résistivité électrique du béton, et que les ions chlorures sont susceptibles de réduire la résistivité du béton humide ce qui entraîne la corrosion des armatures. Selon eux, le taux de corrosion est inversement proportionnel à la résistivité du béton. Pourtant, cette remarque n'est pas toujours vraie : par exemple, un béton ayant une valeur élevée de résistivité est malgré tout susceptible de présenter un risque de corrosion.

Pour étudier l'influence de l'humidité relative et de la concentration des ions chlorures sur la corrosion, des chercheurs [Enevoldsen et al., 1994] ont réalisé une campagne de mesure de résistivité sur des bétons et des mortiers contenant différentes concentrations de Cl^- dans la solution interstitielle. La baisse de la résistivité électrique suite à l'accroissement de l'humidité relative est aussi observée et ils montrent que les ions Cl^- font chuter la résistivité électrique. Cela peut être expliqué par la mobilité plus forte des ions Cl^- dans la solution électrolytique, qui favorise la circulation du courant. Plus tard, les études de [Andrade et al., 1994] ont proposé que le coefficient de diffusion des ions chlorures soit calculé à partir des mesures de résistivité.

Les travaux de [Saleem et al., 1996] sur des bétons avec différents niveaux de contamination par Cl^- et SO_4^{2-} ont montré que la teneur en eau et la concentration en ions chlorures et sulfates influencent fortement la résistivité électrique du béton. Les échantillons sont fabriqués et mis à différents taux de contamination de sulfates et de chlorures. La teneur en eau est déterminée par pesée des échantillons humides et des échantillons secs.

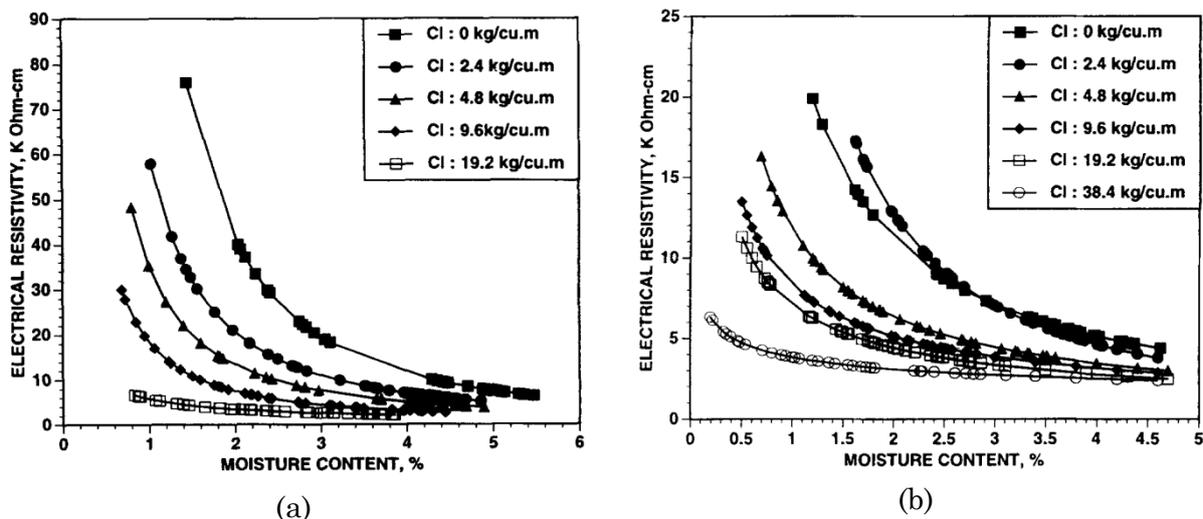


Figure 1.18 : Relation entre la teneur en eau et la résistivité électrique dans les bétons (a) contaminés par des chlorures et (b) contaminés par des sulfates et différents taux de chlorures [Saleem et al., 1996].

Ces résultats montrent que la résistivité du béton baisse avec l'accroissement de la teneur en eau et la contamination des sulfates et des chlorures. La résistivité est encore plus abaissée pour les bétons qui contiennent les deux ions. De plus, ils concluent aussi qu'à haute concentration ionique, la teneur en eau n'a que très peu d'influence sur la résistivité électrique.

Les travaux de Polder [Polder, 2001] ont amené à développer une recommandation technique de RILEM TC 154-EMC pour les mesures de résistivité in situ. Ils ont indiqué que pour un béton relativement homogène, la cartographie de résistivité peut montrer les endroits sec et humide. Pour une structure en béton ayant une gamme de résistivité entre 100 et 500 $\Omega.m$, les valeurs extrêmes peuvent être interprétées comme indicateur de la teneur en eau du béton (pour relever des zones relativement humides ou sèches).

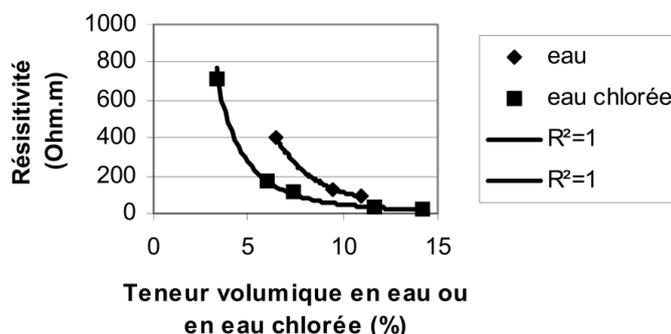


Figure 1.19 : Relations entre la teneur en eau ou en eau chlorée et la résistivité électrique [Balayssac et al., 2006]

Dans le but de caractériser la teneur en eau du béton d'enrobage par l'utilisation combinée de différentes techniques de CND, Balayssac et al. [Balayssac et al., 2006] ont

rapporté que le couplage de la mesure radar et de la résistivité est capable de déterminer la teneur en eau volumique et de détecter la présence de chlorures dans cette eau (**Figure 1. 19**).

Cette combinaison a été employée dans les travaux de Laurens et al. [Laurens et al., 2005]. Les mesures de résistivité électrique avec la configuration Wenner ont été réalisées pour fournir des informations complémentaires sur l'état d'humidité du béton. La résistivité du béton a été mesurée à différents degrés de saturation et avec une répartition homogène de l'humidité. La **Figure 1. 20** montre la bonne corrélation entre la résistivité électrique et le degré de saturation du béton. On observe une augmentation de résistivité lors de la diminution du degré de saturation, en concordance avec la loi d'Archie.

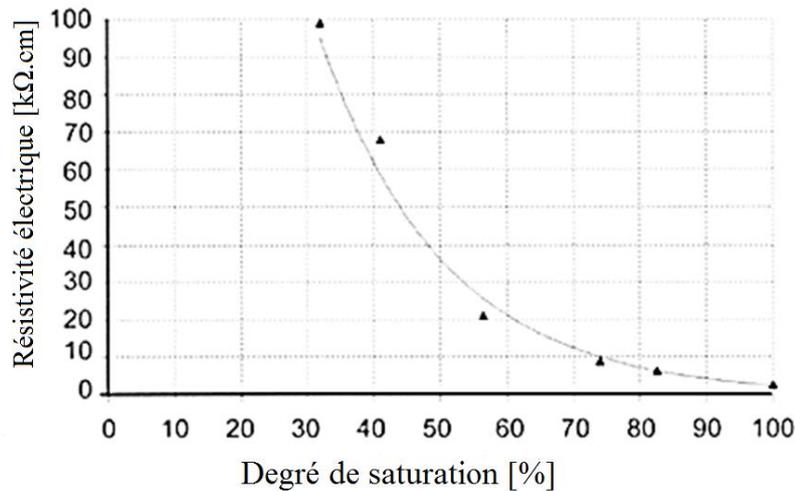


Figure 1. 20 : Relation entre teneur en eau du béton et résistivité électrique [Laurens et al., 2005]

La **Figure 1. 21** montre un autre exemple de la variation de la résistivité électrique en fonction du degré de saturation [Østvik et al., 2006]. La différence de résultat entre différents travaux est importante, ce qui montre que la résistivité apparente mesurée dépend fortement de la technique de mesure utilisée. On observe que la résistivité et le degré de saturation sont inversement liés. L'influence du rapport E/C est également confirmée ici, la résistivité étant d'autant plus forte que le rapport E/C est faible.

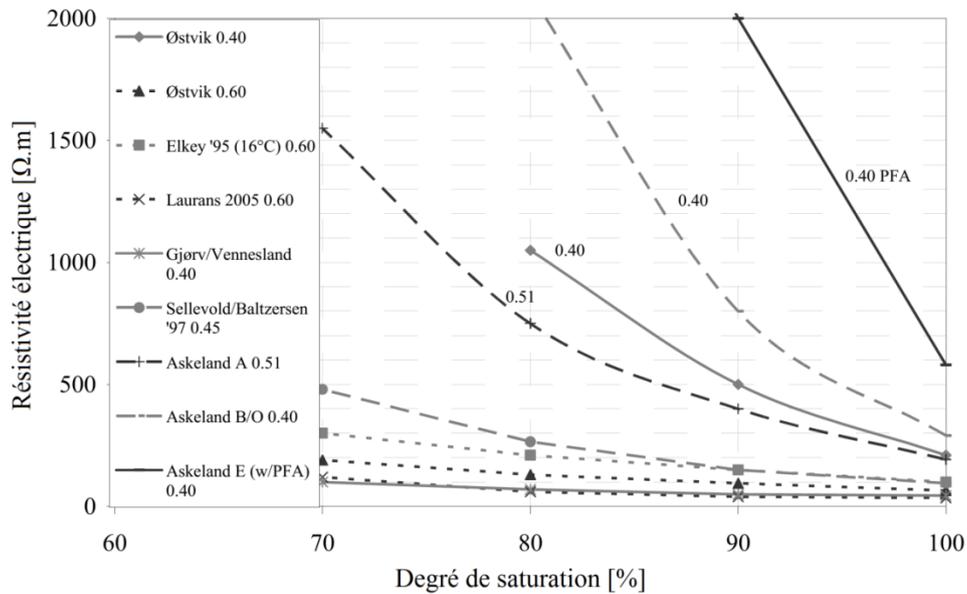


Figure 1.21 : Relation entre teneur en eau et la résistivité électrique dans la littérature [Østvik et al., 2006]

1.4.5.4. Résistivité et corrosion des armatures

Différents travaux dans la littérature ont confirmé la relation entre résistivité et corrosion. En général il est avancé qu'une faible résistivité indique un fort risque de corrosion. [Morris et al., 2002] ont avancé que la résistivité électrique est un paramètre pour évaluer le risque de corrosion de l'acier, indépendamment de la formulation du béton et des conditions environnementales qu'il subit. Polder et al. [Polder et al., 2000] ont proposé d'utiliser une cartographie de résistivité pour localiser les zones plus perméables dans la structure, où le risque de la pénétration des ions chlorures est plus élevé.

Carino [Carino, 1999] a présenté une synthèse des techniques non destructives pour examiner la corrosion de l'acier dans les structures en béton armé, y compris la résistivité électrique. Celle-ci a même été considérée comme un des moyens de contrôle du taux de corrosion. Ainsi l'utilisation combinée des mesures de potentiel de corrosion et de résistivité électrique permet d'examiner à la fois le risque et la vitesse de corrosion.

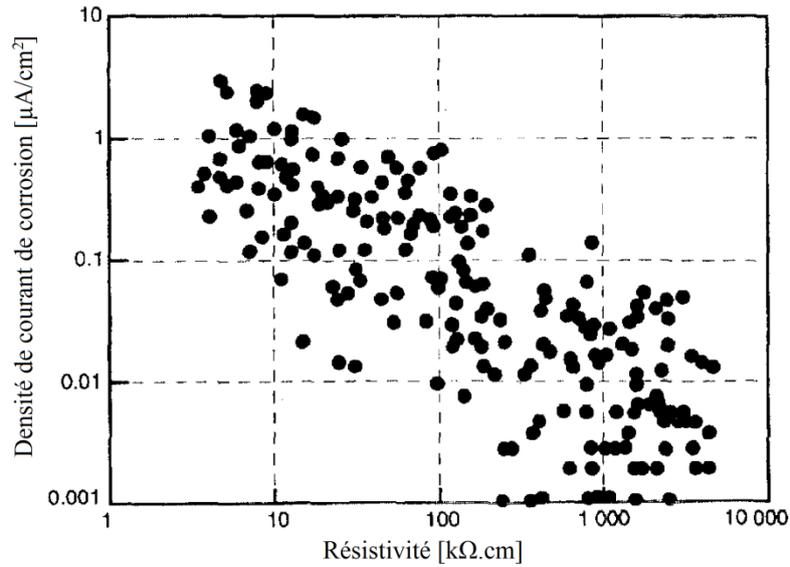


Figure 1. 22 : Relation inverse entre le courant de corrosion et la résistivité électrique [Carino, 1999]

Morris et al [Morris et al., 2002] ont évalué le risque de corrosion de l'acier avec les mesures de résistivité électrique sur les échantillons immergés dans une solution saline. Ils ont observé que l'acier est dans un état de corrosion actif quand la résistivité du béton est inférieure à 100 $\Omega.m$ et dans un état passif quand la résistivité est supérieure à 300 $\Omega.m$.

Si la résistivité électrique du béton peut en effet être utilisée comme un paramètre d'évaluation du risque de corrosion de l'acier il n'en demeure pas moins que le seuil de résistivité pour évaluer l'état de corrosion de l'acier n'est pas bien déterminé. Le **Tableau 1. 2** montre quelques résultats proposés par différents auteurs dans la littérature.

Tableau 1. 2 : Interprétations de résistivité électrique du béton pour le risque de corrosion des aciers

Risque de corrosion	Seuils de résistivité ($\Omega.m$)		
	[Bungey et al., 2006] ^(*)	[S. Feliu et al., 1996; Polder et al., 2000]	[Langford et al., 1987]
Très bas	>200	1000-2000	>1000 (pas de risque)
Bas à modéré	100-200	100-1000	500-1000
Haut	50-100		100-500
Très haut	<50	<100	<100 ^(**)

() : Pour béton non saturé, acier dépassivé*
*(**) : La résistivité n'est plus le paramètre contrôlant*

Baroghel-Bouny et al. ont mesuré la résistivité du béton sur des éprouvettes et ont proposé des valeurs limites pour évaluer la durabilité du béton vis-à-vis de la corrosion [Baroghel-Bouny et al., 2004]. Ces éprouvettes ont été conservées dans l'eau pendant 3 mois après le coulage du béton et caractérisées à l'état saturé.

Tableau 1. 3 : Résistivité comme un indicateur de durabilité selon [Baroghel-Bouny et al., 2004]

Durabilité potentielle	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
ρ [$\Omega.m$]	< 50	50 - 100	100 - 250	250 – 1000	> 1000

1.4.6. Exploitation possible des mesures de résistivité

- Caractérisation du béton

La teneur en eau et la concentration ionique sont les deux facteurs ayant des effets directs sur la conductivité électrolytique. Dans l'hypothèse où tous les autres paramètres sont stables ou connus (le volume des pores, sa tortuosité, l'interconnectivité, etc.), on peut évaluer, au moyen de la mesure de la résistivité électrique, les variations de la teneur en eau, de son gradient et de la concentration ionique. D'autres propriétés du béton sont également caractérisées en utilisant la porosité, tels que la répartition des fibres métalliques (dans un béton fibré) ou le degré d'hydratation.

- Repérage de l'homogénéité du béton

Grâce aux mesures de résistivité électrique on peut repérer sur la structure des zones humides et sèches. Par exemple, une structure en béton ordinaire, considérée comme homogène, a des valeurs de résistivité entre 100 et 500 $\Omega.m$, ces valeurs extrêmes

peuvent être considérées comme indiquant les zones relativement humides et relativement sèches. Les zones de 50 Ω .m sont certainement plus sensibles à la pénétration de chlorures du milieu environnant que les zones avec 200 Ω .m.

- Localisation des zones ayant un risque élevé de corrosion

Les zones de corrosion active des aciers correspondent dans le béton à des zones où le degré d'humidité relative est élevé (condition favorable à la corrosion) et où les courants ioniques (créés par la réaction de corrosion ou liés à la présence de chlorures favorisant la corrosion) induisent de fortes concentrations ioniques. Le béton au voisinage des armatures présente donc des résistivités apparentes faibles lorsqu'il y a corrosion active.

- Caractérisation de la fissuration

Cette application repose essentiellement sur la sensibilité de la méthode à la porosité ou à la présence de « voie privilégiée de circulation des fluides » que sont les fissures. Les travaux de [Sirieix et al., 2002] ont montré l'intérêt de la technique pour la caractérisation de la fissuration. L'exploitation des résistivités électriques et des anisotropies électriques déduites permet de distinguer différents types de fissures, mais aussi d'obtenir une information sur leur profondeur.

A une autre échelle, la technique de la mesure à impulsions électriques permet la localisation des fissures dans les couches d'étanchéité des ouvrages en béton (réservoir, tablier...).

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a réalisé une revue de la littérature sur le besoin de l'auscultation des ouvrages dans le génie civil, sur l'intérêt de l'utilisation des techniques CND, en focalisant sur la corrosion des armatures. Nous avons également montré que la teneur en eau joue un rôle majeur dans le développement de cette pathologie aussi bien dans la phase d'initiation que dans celle de sa propagation. En soulignant la relation entre la teneur en eau et la résistivité électrique, nous avons justifié notre choix de la mesure de résistivité pour étudier ce paramètre. L'ensemble des facteurs influençant la mesure de résistivité a été présenté. Pourtant, dans la plupart des cas d'études trouvés dans la littérature, l'utilisation de la résistivité électrique est associée à un milieu homogène et semi-infini ce qui est très rare voire inexistant dans les ouvrages en béton armé. Le manque de résultats sur le gradient de teneur en eau nous a conduit à réaliser une étude sur des structures en béton armé ayant ce type de gradient par utilisation de la mesure de résistivité électrique que nous présenterons dans le chapitre suivant. Le chapitre 2 présentera, en outre, une revue bibliographique spécifique à la recherche du gradient de teneur en eau par mesure de résistivité.

CHAPITRE 2

PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE POUR LA RECHERCHE DU GRADIENT DE LA TENEUR EN EAU DANS LES STRUCTURES EN BETON ARME

Résumé du chapitre 2

Dans un premier temps une base théorique de la résistivité électrique est présentée suivie par la méthodologie employée pour la recherche du gradient de résistivité et de la teneur en eau. Le dispositif quadripolaire a été utilisé dans ce travail, avec deux électrodes extérieures injectant le courant (appelées « électrodes de courant ») et deux électrodes intérieures (appelées « électrodes de potentiel ») permettant la mesure de la différence de potentiel. Dans notre travail, les électrodes d'injection et une des électrodes de potentiel sont immobiles alors que l'électrode de potentiel restante se déplace le long du profil de mesure. Nous obtenons ainsi une courbe de potentiel de tous les points entre les sources de courant. Cette courbe sera exploitée selon la configuration dite « symétrique » permettant de tracer une courbe de résistivité en fonction de l'écartement électrode de courant-électrode de potentiel qui est relié à la profondeur d'investigation. Cette configuration dite « symétrique » nous permet d'exploiter de façon plus aboutie la courbe de potentiel afin d'étudier le gradient de résistivité lié, dans notre cas, au gradient de teneur en eau.

Une étude bibliographique sur l'influence de l'acier et les effets de bord sur les mesures de résistivité est présentée. Différents travaux ont montré que la présence des aciers et la position du dispositif à proximité des bords des éléments auscultés perturbent les mesures. Il est recommandé que les mesures soient faites le plus loin possible des armatures d'acier et des bords. Certains auteurs conseillent d'injecter le courant perpendiculairement aux barres d'acier ou de faire les mesures en diagonale au sein des mailles d'acier. Pourtant il manque encore dans la littérature une méthodologie pour les mesures sur les structures en béton armé dans un milieu qui ne soit pas semi-infini et qui permette d'atténuer les effets de bord.

Dans la dernière partie une étude numérique sur l'influence de la géométrie des corps d'épreuve et des armatures d'acier est réalisée. Elle confirme que la résistivité obtenue à partir de mesures réalisées près des bords des structures est fortement augmentée par rapport à la résistivité réelle du matériau ausculté. En revanche, la présence d'acier a plutôt tendance à faire baisser la résistivité mesurée même dans le cas où la mesure est effectuée près des bords. Ainsi les mesures au-dessus de l'acier pourraient être une solution pertinente pour éliminer les effets de bord dans les mesures de résistivité à condition de développer une méthodologie permettant de prendre en compte l'acier pour retrouver la résistivité réelle du matériau ausculté. C'est ce que nous allons tenter de développer dans ce travail.

2.1. Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie de recherche adoptée dans cette étude. Dans un premier temps on rappellera brièvement le principe de la technique quadripolaire pour la mesure de résistivité électrique. Ensuite la nouvelle procédure de mesure proposée sera discutée, suivie par la méthode d'exploitation des mesures.

Des mesures complémentaires sur des échantillons cylindriques sont réalisées pour obtenir la loi empirique reliant teneur en eau et résistivité électrique du béton examiné. Cette loi sera utilisée par la suite en simulation numérique. L'ensemble de ces mesures a pour premier objectif de retrouver la résistivité réelle du béton ausculté ainsi que les paramètres électrochimiques des aciers présents dans la structure examinée, et dans un second temps de déterminer la teneur en eau du béton et plus particulièrement du béton d'enrobage.

2.2. Mesures de résistivité en surface avec le dispositif quadripolaire

2.2.1. Bases théoriques

Considérons un courant continu (ou un courant alternatif de basse fréquence de l'ordre du Hz) dans un milieu homogène. Si δA est un élément de surface et J la densité de courant en Ampère par mètre carré [A/m^2], alors le courant qui traverse δA est $J \cdot \delta A$. La densité de courant J et le champ électrique E sont reliés par la loi d'Ohm :

$$J = \sigma \cdot E \quad (2.1)$$

E s'exprime en Volt par mètre [V/m]

σ est la conductivité électrique du milieu [S/m]

Le champ électrique est le gradient du potentiel électrique

$$E = -\nabla V \quad (2.2)$$

Donc on a :

$$J = -\sigma \nabla V \quad (2.3)$$

En outre, dans le matériau conducteur la charge ne s'accumule pas, la quantité de courant entrant par une surface est égale à la quantité de courant sortant ($Q=0$) donc :

$$\nabla J = -\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (2.4)$$

Où Q [C] est la charge électrique et t [s] est le temps.

En combinant $J = -\sigma \nabla V$ (2.3) et (2.4) on trouve alors

$$\nabla J = -\nabla(\sigma \nabla V) = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla J = \nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0$$

Dans le milieu homogène σ est constant, donc l'équation (2.5) devient $\nabla^2 V = 0$

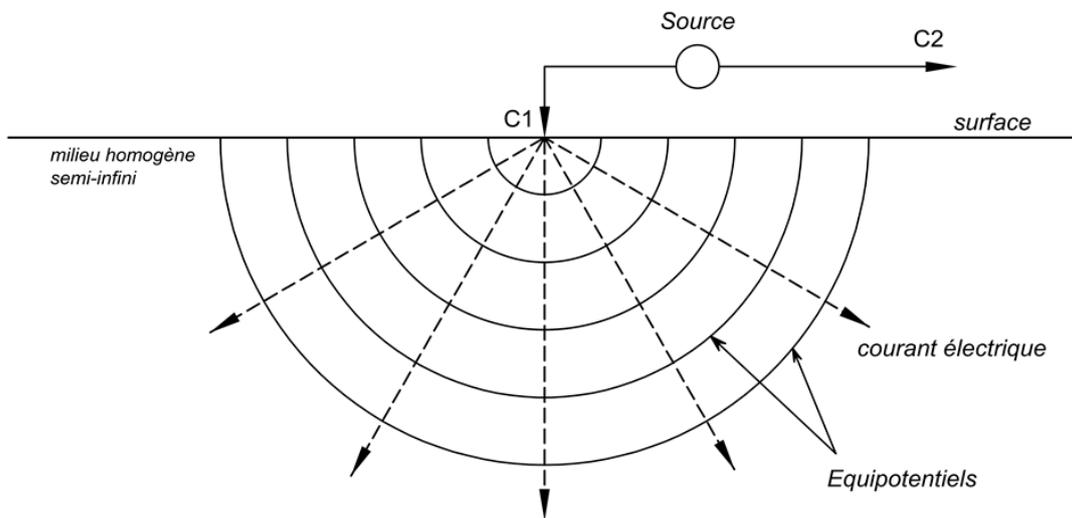


Figure 2.1 : Source électrique sur la surface d'un milieu homogène [Telford et al.. 1990]

Considérons maintenant une source électrique qui génère un courant I sur la surface d'un milieu homogène semi-infini. Si l'air a une conductivité nulle le potentiel d'un point quelconque dans le matériau ne dépend que de r qui est la distance du point considéré à la source. Dans les coordonnées sphériques l'équation de Laplace devient :

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0 \quad (2.6)$$

Ou bien :

$$\frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV}{dr} = 0 \quad (2.7)$$

Cette équation donne :

$$V = -\frac{A}{r} + B \quad (2.8)$$

Où A et B sont constants. Sachant que $V=0$ quand r tend vers l'infini, donc $B = 0$. Comme le courant circule dans toutes les directions depuis la source, l'intégralité du courant traversant la surface demi-sphère est :

$$I = 2\pi r^2 J = -2\pi r^2 \cdot \sigma \frac{dV}{dr} = -2\pi \sigma \cdot A \quad (2.9)$$

Donc

$$A = -\frac{I}{2\pi \cdot \sigma} = -\frac{I \cdot \rho}{2\pi} \quad (2.10)$$

Au final en combinant (2.8) et (2.10) on trouve le potentiel d'un point se situant à r de la source du courant I , c'est-à-dire :

$$V = \frac{I \cdot \rho}{2\pi r} \quad (2.11)$$

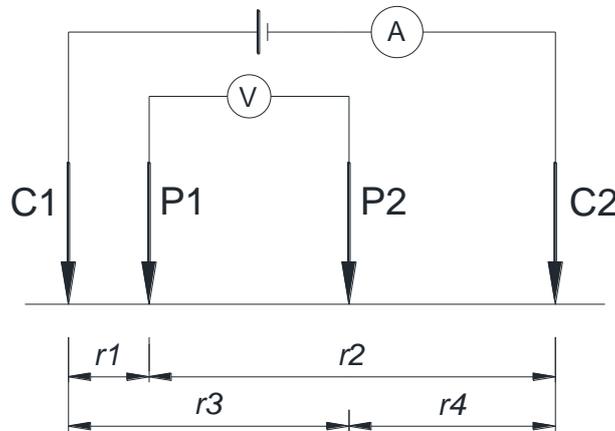


Figure 2. 2 : Mesure par le dispositif quadripolaire

Dans le cas de deux électrodes en surface, le potentiel d'un point quelconque est affecté par les deux électrodes de courant. Pour un point P1 le potentiel engendré par C1 est :

$$V_1 = -\frac{A_1}{r_1} \quad (2.12)$$

Où :

$$A_1 = -\frac{I \cdot \rho}{2\pi} \quad (2.13)$$

Comme les courant à C1 et C2 sont égaux et de direction opposée, le potentiel au point P1 engendré par C2 est :

$$V_2 = -\frac{A_2}{r_2} \quad (2.14)$$

Avec :

$$A_2 = -A_1 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \quad (2.15)$$

On a donc :

$$V_1 + V_2 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.16)$$

De la même manière on a le potentiel à l'électrode P2 :

$$V_3 + V_4 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (2.17)$$

La différence de potentiel entre P1 et P2 est :

$$\Delta V = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (2.18)$$

Ainsi la résistivité est calculée comme suit :

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)} \quad (2.19)$$

Cette formule est construite pour déterminer la résistivité d'un matériau sur une structure homogène et semi-infinie avec un dispositif quadripolaire linéaire (**Figure 2. 2**).

La **Figure 2. 3** montre la courbe de potentiel des points de mesure par le dispositif quadripolaire sur la surface d'une structure homogène semi-infinie [Telford et al.. 1990].

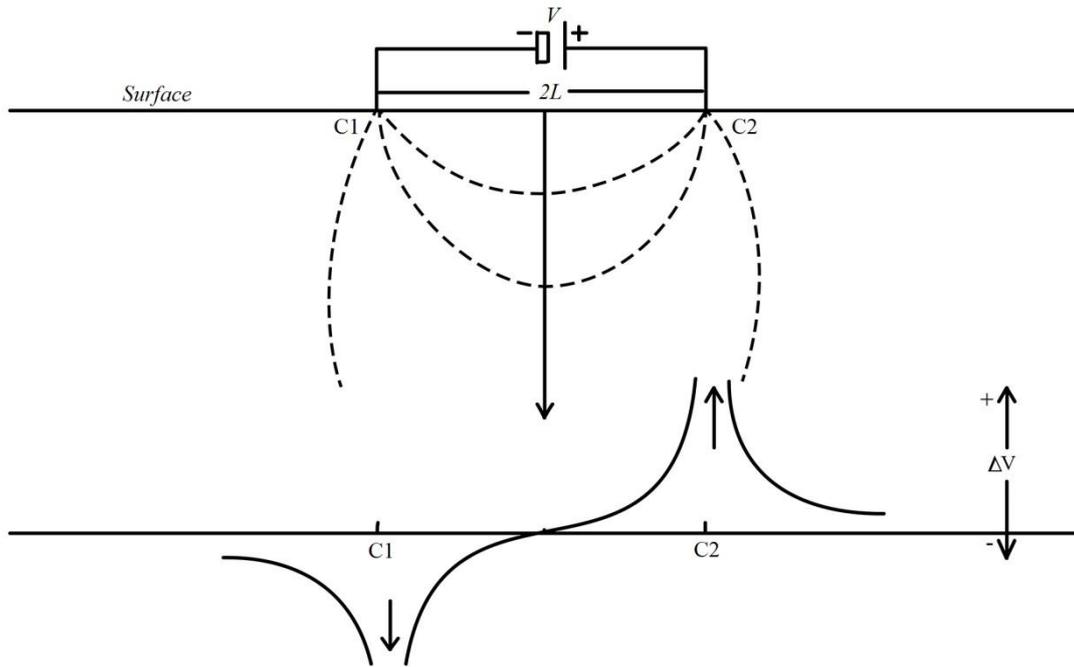


Figure 2. 3: Variation de potentiel sur la surface pour deux points d'injection en surface

On observe sur la **Figure 2. 3** que la courbe de potentiel est symétrique par rapport au centre des points et que le potentiel des points proches de la source électrique ($C1$ et $C2$) tend vers l'infini.

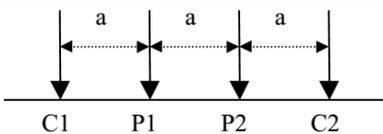
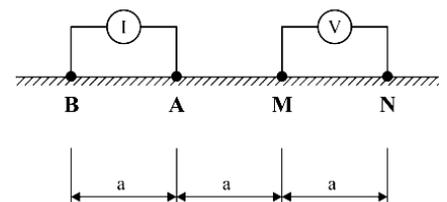
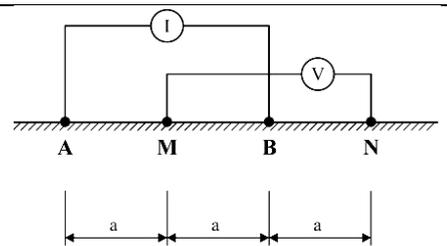
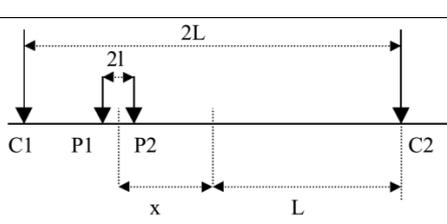
Cette courbe représente la réponse d'un milieu à un courant électrique externe. La mesure des variations de potentiel à la surface du matériau permet donc son auscultation en fonction de la profondeur.

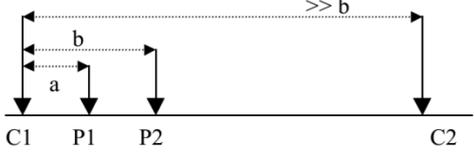
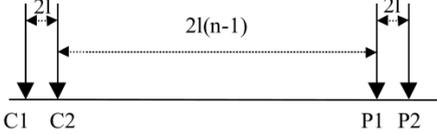
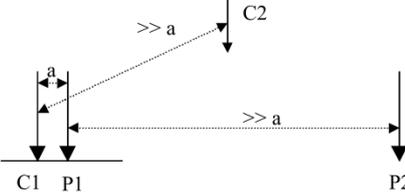
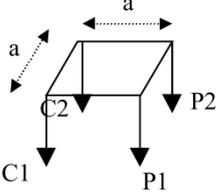
2.2.2. Différentes configurations de mesure avec le dispositif quadripolaire

Différentes configurations sont utilisées pour la mesure de la résistivité apparente sur la surface. Chacune possède ses facteurs géométriques et ses dimensions pour la disposition des électrodes d'injection et de potentiel. La valeur de la résistivité apparente dépend généralement de la configuration utilisée.

On présente ci-dessous les principaux dispositifs utilisés, ainsi que leurs caractéristiques (synthèse réalisée par [Lataste, 2002; Reichling et al., 2014]).

Tableau 2. 1 : Différents configurations pour la mesure de résistivité électrique avec le dispositif quadripolaire [Lataste, 2002; Reichling et al., 2014]

Configuration	Facteur géométrique (k)
 <p>Wenner alpha</p>	$2\pi a$
 <p>Wenner beta</p>	$6\pi a$
 <p>Wenner gamma</p>	$3\pi a$
 <p>Schlumberger</p>	$\frac{\pi L^2}{2l}$

 <p>Pôle – dipôle ou tripôle</p>	$\frac{2\pi ab}{b - a}$
 <p>Dipôle – Dipôle ou double dipôle</p>	$-2\pi n^3 l$
 <p>Pôle – pôle ou dipôle</p>	$2\pi a$
 <p>Dispositif carré</p>	$\frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}}$

2.2.3. Caractérisation du gradient de teneur en eau dans le béton par résistivité

Dans la littérature très peu de travaux concernent l'investigation du gradient de teneur en eau par la méthode de résistivité.

Fares et al. mesurent la résistivité de corps d'épreuves en béton séchés complètement en étuve et dont une des faces est placée au contact d'une nappe d'eau libre [Fares et al., 2015]. La mesure de résistivité est réalisée à plusieurs échéances à partir du début de l'absorption, mais seulement sur la face humide (en contact avec l'eau) car l'autre face est trop sèche pour permettre le passage du courant. La configuration Wenner a été utilisée, avec différents écartements d'électrodes (2 ; 4 ; 6 et 8 cm).

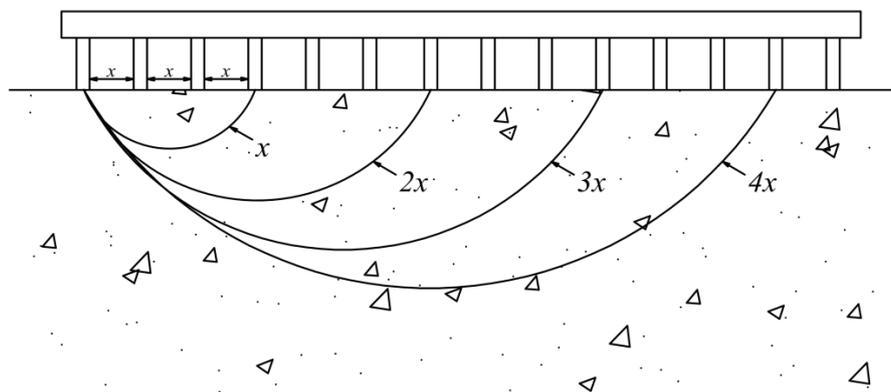


Figure 2. 4 : Mesures de résistivité sur la surface par dispositif multi-électrodes [Fares et al., 2015].

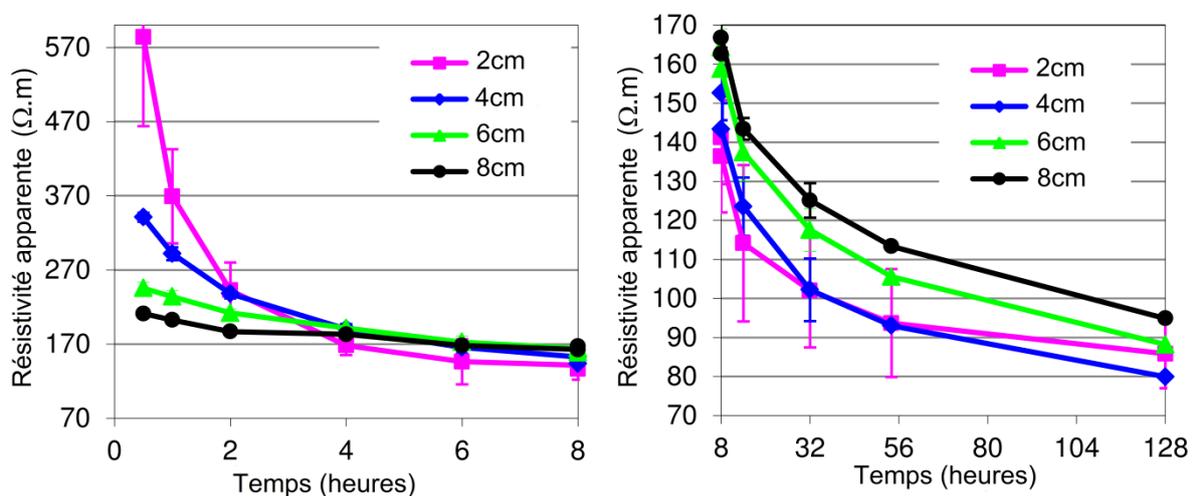


Figure 2. 5 : Résistivité apparente en fonction du temps de l'immersion dans l'eau de la dalle en béton [Fares et al., 2015]

On observe une diminution de la résistivité apparente en fonction du temps signifiant que l'absorption capillaire et la diffusion de l'eau sont en cours de progression dans la dalle de béton. A partir de 8h on observe également que les courbes sont bien classées : plus l'écartement entre électrodes est grand, plus la résistivité apparente est élevée. On trouve alors qu'un faible écartement correspond au matériau en surface et qu'un grand écartement correspond au matériau en profondeur. Ces résultats tendent à montrer que la résistivité est un bon moyen pour étudier le gradient de résistivité dans le béton.

Des dalles ayant un même profil de teneur en eau ont été utilisées dans la campagne de mesure de Villain et al [Villain et al., 2015]. C'est un travail collaboratif entre 4 laboratoires au cours duquel le même processus d'absorption d'eau, similaire à celui proposé par Farès et al., a été mis en œuvre sur 4 dalles de béton différentes. Trois

dispositifs de mesure ont été utilisés : dispositif quadripolaire linéaire avec la configuration Wenner d'un écartement 4 cm pour GEM et LMDC, dispositif quadripolaire carré d'un écartement 5 cm pour I2M, et dispositif multi-électrodes composé de 14 à 16 électrodes pour IFSTTAR et I2M. En général, on remarque que la résistivité diminue avec la pénétration de l'eau dans le béton. La différence entre les résultats de chaque laboratoire vient du fait que les conditions initiales des dalles n'étaient pas rigoureusement identiques et que les dispositifs utilisés dans la campagne étaient différents entre les laboratoires participants. Après environ 8h on observe que les résultats obtenus se trouvent dans la même gamme de résistivité et que leur évolution est similaire dans le temps. Les auteurs ont rapporté aussi qu'après 16 heures d'immersion dans l'eau la résistivité mesurée est stabilisée, ce qui signifie que le front d'eau est au-delà de la profondeur investiguée par la mesure (estimée entre 2 et 4 cm correspondants à la moitié ou la totalité de l'écartement). Cette remarque souligne encore l'inconvénient du choix d'un écartement faible pour la mesure de résistivité.

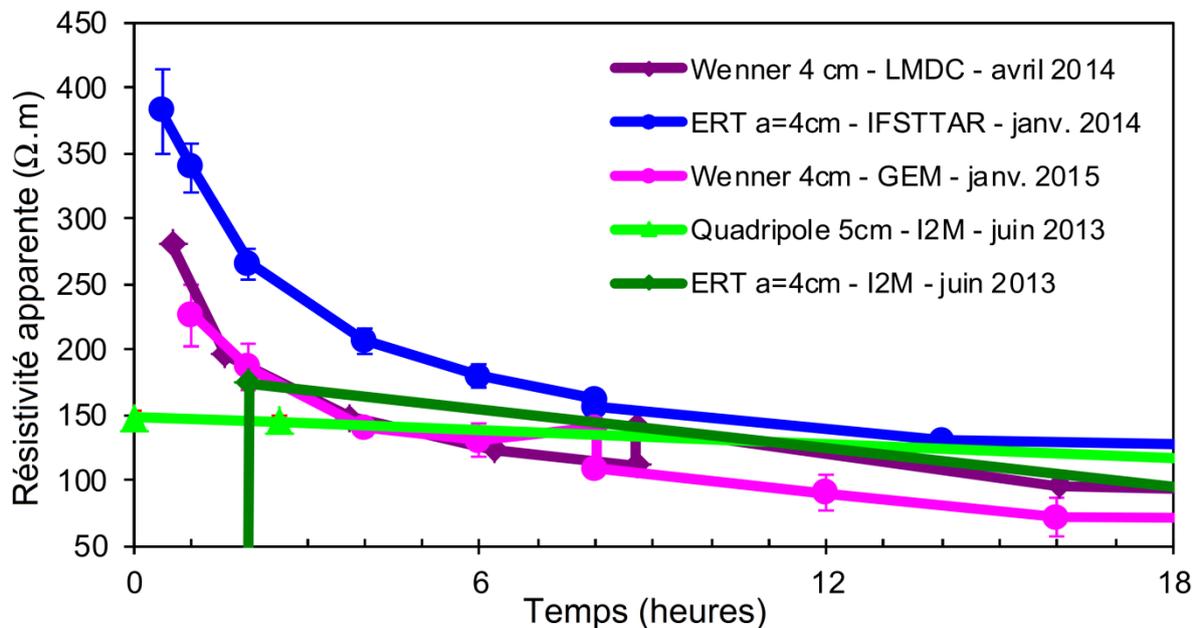


Figure 2. 6 : Evolution de la résistivité apparente en fonction du temps pour 4 méthodes de mesure [Villain et al., 2015].

Les mêmes remarques ont été faites par Du Plooy et al. [Du Plooy, 2013] sur les corps d'épreuve submergés 2 cm dans de l'eau chlorée à différentes concentrations (0 ; 15 et 30 g/l NaCl).

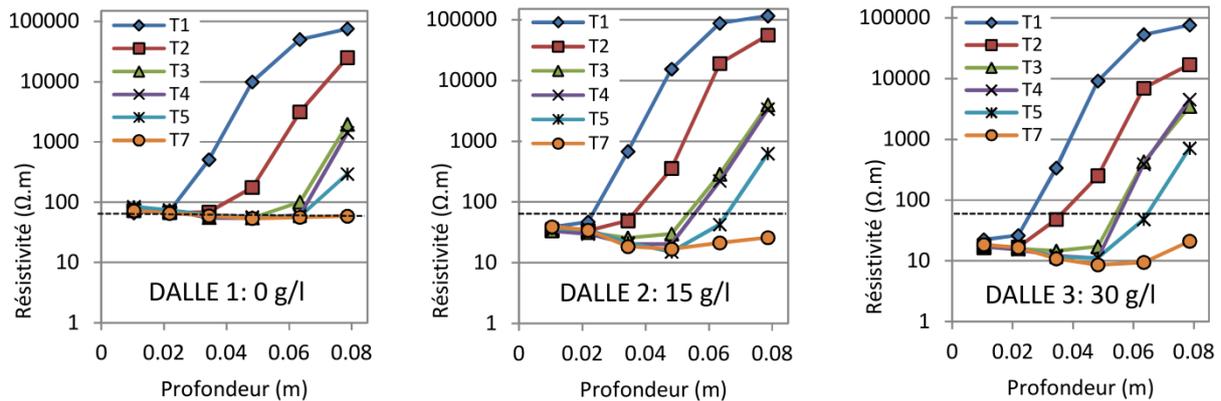


Figure 2. 7 : Résistivité apparente sur dalles submergées dans de l'eau contenant du NaCl [Du Plooy, 2013]. (T1-T7 représente le temps d'immersion dans l'eau avec T1 étant 0,1 jour et T7 étant 23,2 jours)

D'autres techniques de CND ont également été utilisées dans ce travail, telles que la mesure de capacité, le radar ou les ondes de surface ultrasonores.

Il est important de noter que dans l'ensemble des travaux présentés dans cette section, les mesures de résistivité sont réalisées sur des échantillons de bétons secs en contact avec de l'eau, ils traitent donc de la détection d'un front d'eau et non d'un gradient de teneur en eau.

2.3. Influence de l'acier sur la mesure de résistivité électrique

Différents auteurs ont remarqué l'influence de l'acier sur la mesure de résistivité électrique dans une structure en béton armé [Millard, 1991; Polder, 2001; Breysse et al., 2005; Bungey et al., 2006; Reichling et al., 2014]. Gowers et al [Gowers et al., 1999] ont cité six principales sources de biais lors des mesures de résistivité dont l'armature d'acier. [Polder et al., 2000; Sengul et al., 2008] ont rapporté que les barres d'acier influencent la mesure de résistivité aussi recommandent-ils d'éloigner le dispositif des armatures d'acier afin de minimiser leur influence.

L'influence des armatures a été examinée numériquement par [Salehi et al., 2014] en utilisant le dispositif Wenner. Les auteurs ont considéré différents paramètres tels que l'enrobage, l'écartement des électrodes, l'écartement des barres d'acier et leur diamètre avec différentes positions du dispositif Wenner. Ces positions sont choisies selon les recommandations trouvées dans la bibliographie pour éviter l'influence des mailles

d'acier dans la structure auscultée. Les résultats confirment que l'utilisation d'un petit écartement entre électrodes réduit les erreurs de mesure lorsque les mesures se font au-dessus des aciers. Ils ont conclu que pour un maillage dense (de 5 cm), quelle que soit la configuration utilisée, les mesures sont plus influencées par les armatures que par la position des électrodes Wenner.

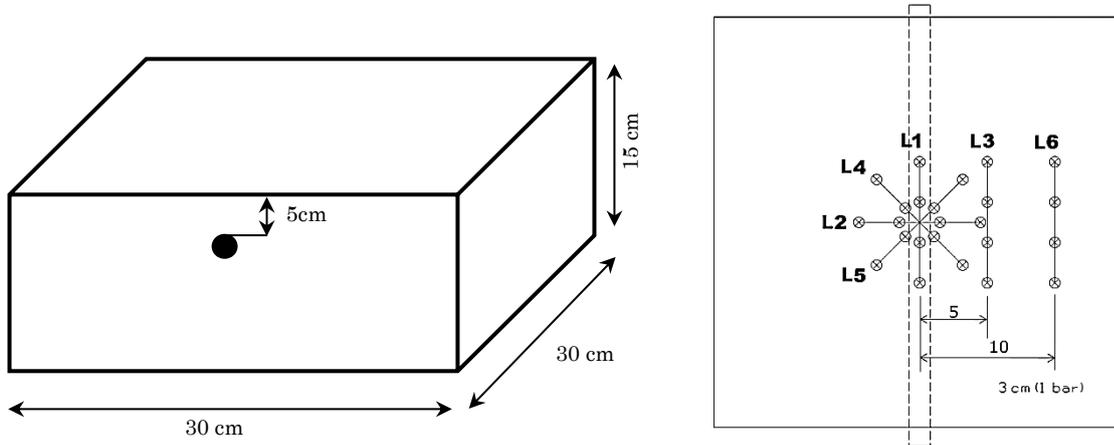


Figure 2. 8 : Position de mesures de résistivité utilisées [Presuel-Moreno et al., 2013].

Dans leurs travaux Presuel-Moreno et al. [Presuel-Moreno et al., 2013] étudient l'effet des armatures d'acier sur la mesure de résistivité électrique. D'une part les essais de type Wenner sont effectués expérimentalement sur un bloc de béton armé composé d'une barre d'acier, d'autre part les mesures sont réalisées numériquement sur différentes positions comme le montre la **Figure 2. 8**. La résistivité du béton est homogène dans le bloc. Ils remarquent que plus la mesure est faite près de l'acier, plus le résultat est affecté par l'acier. Cette influence peut être limitée en plaçant le dispositif en diagonale ou perpendiculairement par rapport à l'acier (positions L2, L4 ou L5).

La présence des armatures entraîne localement une baisse de la résistivité apparente [Bungey et al., 2006]. L'enrobage et la densité de ferrailage sont des paramètres influents. Ce point est confirmé par les études de Lataste [Lataste, 2002] qui a conclu que plus le volume d'armature est important dans le volume investigué par la mesure, plus la résistivité apparente est faible.

La **Figure 2. 9** présente différentes positions du dispositif vis-à-vis des aciers afin de minimiser leurs influences sur la mesure [Breysse et al., 2005]. La localisation des aciers préalablement à la mesure électrique est donc recommandée. La position perpendiculaire à l'acier est également recommandée par Millard [Millard, 1991]. Dans cette configuration le flux de courant est perpendiculaire à l'acier et il est ainsi moins influencé par la barre d'acier.

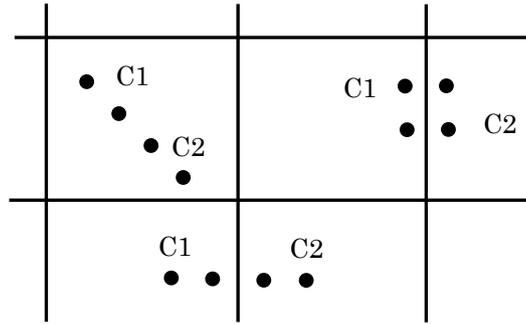


Figure 2. 9 : Positions de mesure de résistivité recommandées [Breysse et al., 2005]

Les travaux de Polder et al. [Polder, 2001] donnent des suggestions pour les mesures de résistivité sur site. Des erreurs sont trouvées pour les mesures au-dessus d'aciers ayant un enrobage de 10 ou 20 mm d'épaisseur. Pour limiter ces biais ils recommandent d'effectuer les mesures au plus loin des armatures, par exemple en diagonale à l'intérieur des mailles d'acier.

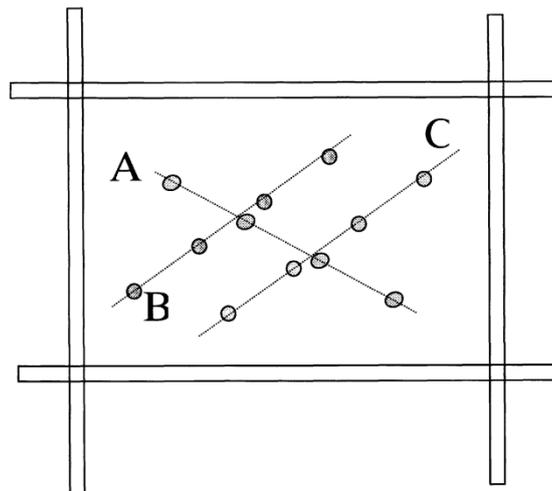


Figure 2. 10 : Positions de mesures recommandées par [Polder, 2001]

Ces positions de mesures dépendent fortement du maillage. Un maillage petit, par exemple de 10 cm x 10 cm, entraîne une réduction de l'écartement des électrodes et également une réduction de la profondeur investiguée [Telford et al., 1990]. Par exemple pour une maille de 15 cm x 15 cm, il faut un écartement des électrodes de moins de 20 cm selon la recommandation. Par ailleurs Millard [Millard et al., 1990] a conclu que plus les électrodes sont écartées plus la mesure de résistivité est fiable, car la pénétration du courant est plus importante. D'après ses conclusions, un écartement faible n'est donc pas judicieux pour l'investigation des structures en béton armé.

Garzon et al. [Garzon et al., 2014] ont travaillé numériquement et expérimentalement sur des éprouvettes en béton armé, et ont recommandé d'appliquer des facteurs de

correction afin d'éliminer l'influence des aciers. Ils ont rapporté que la polarisation de l'acier a lieu à l'interface acier – béton qui réagit comme une résistance-capacitance (modèle de Randles). Il faut préciser que les facteurs de correction proposés ne sont validés que pour le béton utilisé dans leurs travaux de recherche.

Cette étude bibliographique permet de conclure que l'orientation des électrodes et la configuration des dispositifs influencent le résultat de mesure. L'acier étant un chemin préférentiel pour le courant, la résistivité obtenue est plus faible au voisinage des armatures que la résistivité réelle du béton ausculté. Les auteurs ont conclu aussi que le nombre de barres et l'épaisseur d'enrobage influencent la résistivité apparente du béton mesurée en configuration Wenner.

D'autres auteurs ont montré que des paramètres tels que l'épaisseur d'enrobage ou des aciers influencent les mesures de résistivité du béton [Millard, 1991; Carino, 1999]. Carino a indiqué qu'une faible épaisseur d'enrobage provoque une erreur importante et a suggéré de réaliser les mesures au milieu de deux barres d'acier.

D'après la littérature, il semble que le diamètre des barres ne soit pas un paramètre significatif sur la mesure de résistivité. Millard [Millard, 1991] a avancé que pour un écartement des électrodes Wenner de 50mm, des barres de diamètre 16mm à 40mm causent quasiment les mêmes erreurs sur la mesure, si l'enrobage est inférieur à 75mm. [Salehi et al., 2014] ont confirmé par des études numériques que la localisation du dispositif de mesure par rapport à la position de l'acier est plus significatif que le diamètre des barres.

Bilan

La position du dispositif parallèlement et près des armatures influence fortement les résultats de mesure à cause de la forte conductivité électrique de l'acier. Plus le dispositif se situe proche des aciers, plus la résistivité mesurée est affectée. Différents auteurs ont recommandé de s'éloigner de l'acier ou de positionner le dispositif perpendiculairement aux barres ou en diagonale par rapport aux mailles d'acier. En prenant en compte toutes ces recommandations, on comprend que les mesures sur les structures en béton armé nécessitent un écartement des électrodes relativement faible pour que le dispositif en diagonale soit à l'intérieur de la maille d'acier. Les résultats obtenues sont donc moins précis et le volume investigué est réduit dans ce cas [Millard, 1991].

2.4. Effets de bord sur la mesure de résistivité en surface

Lorsque les mesures sont effectuées aux limites des structures auscultées, elles sont influencées par les effets de bord. Ces effets provoquent une surestimation de la

résistivité réelle [Lataste, 2002; Bungey et al., 2006]. Selon les travaux précédemment réalisés, l'influence des bords est généralement associée à la théorie des images. Selon cette théorie, chaque interface entre deux matériaux de résistivité différente est considérée comme un miroir semi-transparent, qui transmet une partie de la lumière, et reflète le reste [Telford et al., 1990; Gemert et al., 1996]. Il montre aussi que la résistivité apparente n'est pas égale à la résistivité réelle du matériau. Il existe une différence significative entre les deux lorsque les mesures sont réalisées près des bords.

Millard et al. [Millard, 1991; Millard et al., 1990] ont mesuré la résistivité avec le dispositif quadripolaire de type Wenner sur des corps d'épreuve ayant une faible épaisseur ou à proximité des bords et ont mis en évidence des écarts importants. Ils ont recommandé que la largeur et l'épaisseur du corps d'épreuve soient au moins quatre fois plus élevés que l'écartement des électrodes et que la distance du dispositif de mesure au bord soit au moins deux fois celle de l'écartement des électrodes. Gowers et al. [Gowers et al., 1999] ont confirmé que l'influence des effets de bord est plus importante lorsque la structure auscultée est de faibles dimensions (en épaisseur ou en plan).

Dans sa thèse [Lataste, 2002] a utilisé un dispositif quadripolaire carré pour faire des mesures de résistivité sur la face latérale d'une poutre en béton armé avec deux types d'injection : parallèle et perpendiculaire au bord. Il indique que pour une injection du courant parallèle au bord, la résistivité mesurée est toujours surestimée par rapport à la résistivité apparente vraie du matériau obtenue à la mi-hauteur de la poutre (considérée comme référence). En revanche une injection perpendiculaire au bord semble réduire cette perturbation.

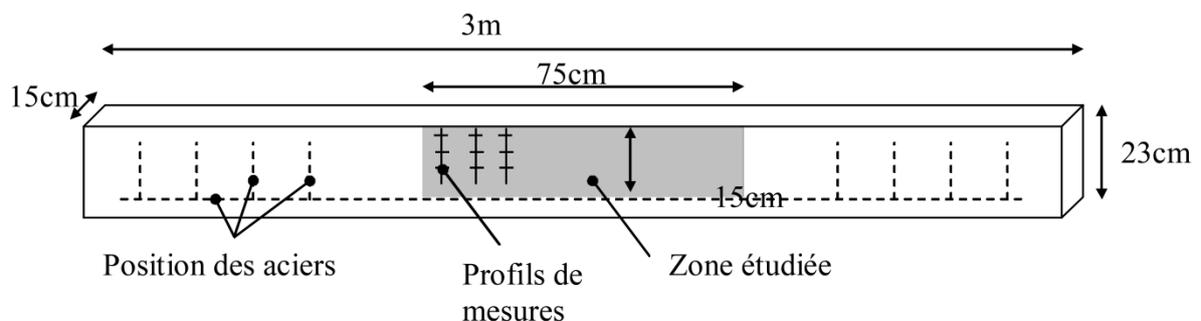
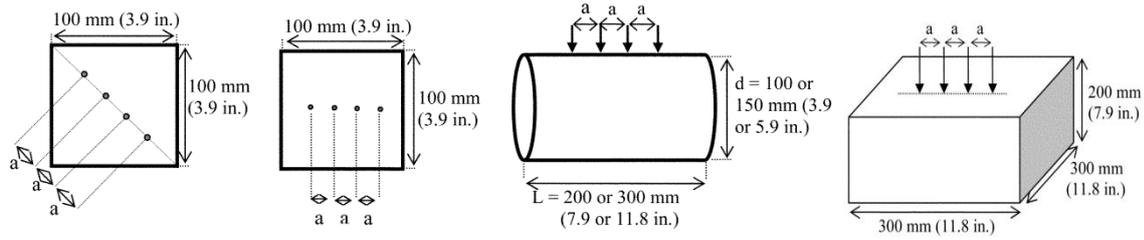


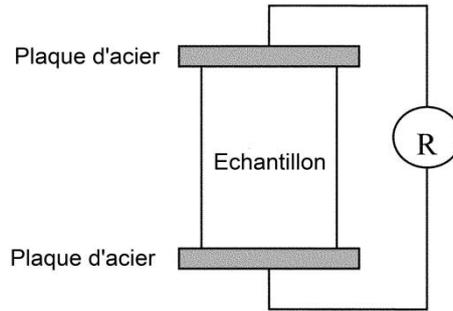
Figure 2. 11 : Etude des effets de bord [Lataste, 2002]

Les travaux de [Sengul et al., 2008] ont montré que la géométrie des échantillons inspectés influence fortement le résultat obtenu. Ils ont réalisé une campagne de mesure sur différents types d'échantillons cylindriques de différentes tailles avec un dispositif de type Wenner (**Figure 2. 12a**). Des mesures en transmission utilisées comme référence ont également été réalisées (**Figure 2. 12b**). L'influence de la taille des échantillons sur les résultats de mesure est présentée sur la **Figure 2. 12c**. Les auteurs constatent que la résistivité augmente avec la diminution de la taille des échantillons ce qui peut

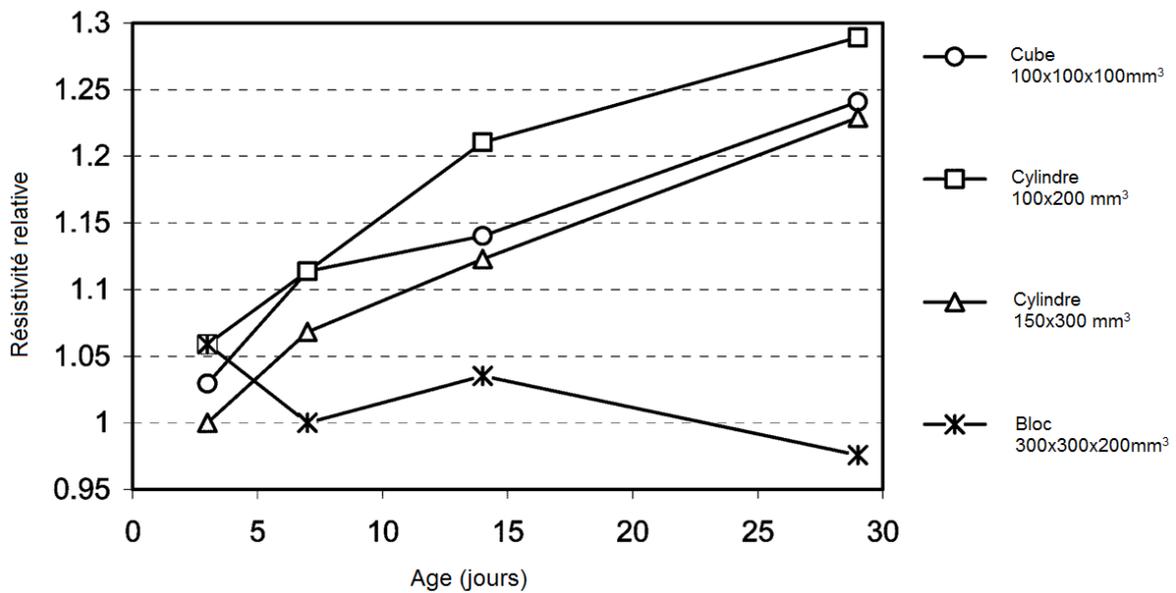
s'expliquer par un confinement du courant électrique. Cela démontre bien que les effets de bord sont plus présents sur les petits échantillons où la circulation du courant est limitée à cause du faible volume ausculté. La **Figure 2. 13** montre l'influence de la localisation des électrodes sur les résultats de mesure sur le bloc de béton avec la méthode Wenner. On peut observer que la résistivité augmente avec la diminution de la distance du dispositif au bord parce que le courant est plus restreint lorsque les points d'injection sont proches du bord.



(a)



(b)



(c)

Figure 2. 12: Travaux de [Sengul et al., 2008] (a) influence de la taille d'échantillons sur la mesure Wenner (b) Mesure en transmission prise comme référence (c) Effet de la géométrie des échantillons sur la mesure Wenner avec l'écartement de 20mm

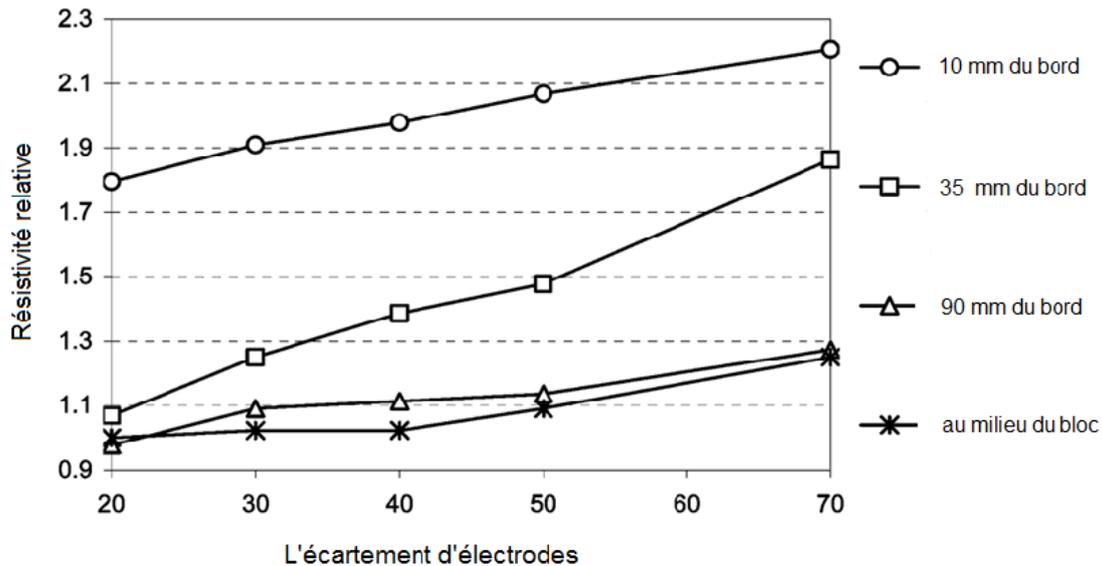


Figure 2. 13 : Influence de la position de mesure sur la mesure Wenner sur bloc [Sengul et al., 2008]

Les corrections et recommandations sont proposées dans la littérature par différents auteurs. Pour les mesures sur une structure en maçonnerie, Gemert et al [Gemert et al., 1996] ont proposé d'utiliser une carte de différence relative construite par la comparaison des résistivités issues d'une modélisation numérique et celles obtenues in situ sur une structure précise. Cette carte permet de corriger les erreurs des effets de bord en la combinant avec les mesures sur site.

Dans le cadre des études de Millard et al. [Millard et al., 1990] avec le dispositif quadripolaire de type Wenner, on apprend que pour un dispositif orienté parallèlement au bord, il faut une distance minimale de deux fois l'écartement entre électrodes pour avoir moins de 10% d'erreur sur la mesure. Dans une autre étude [Millard, 1991], Millard rapporte que pour des échantillons ayant une largeur et une épaisseur supérieures à quatre fois l'écartement des électrodes les erreurs seraient inférieures à 10%.

Gowers et Millards [Gowers et al., 1999] ont recommandé que les mesures soient faites au milieu des structures avec un écartement des électrodes suffisamment petit pour éviter l'influence des bords. Lataste [Lataste, 2002] a conclu qu'un éloignement supérieur à 2,5 fois l'écart des électrodes pour un dispositif carré permet d'éviter les effets de bord.

Bilan :

Les travaux dans la littérature nous ont permis de conclure que les mesures de résistivité effectuées près du bord des structures sont fortement perturbées. Les

recommandations de différents auteurs sont de s'éloigner du bord ou de réaliser les mesures perpendiculairement au bord. Une autre solution pour éviter ces effets peut être l'emploi d'un écartement moins important des électrodes, mais dans ce cas le volume ausculté est moins important.

2.5. Proposition d'une nouvelle procédure pour la mesure de la résistivité d'un béton ayant un gradient de teneur en eau

2.5.1. Procédure de mesure proposée

Nous proposons dans ces travaux de recherche une nouvelle méthode de mesure basée sur l'usage du dispositif quadripolaire précédemment présenté. Deux électrodes de courant C1 et C2 sont fixées à 20 cm l'une de l'autre. La troisième électrode P1 est fixée à 3 cm de C1 tandis que P2 est déplacée tous les centimètres le long du profil de mesure, entre P1 et C2.

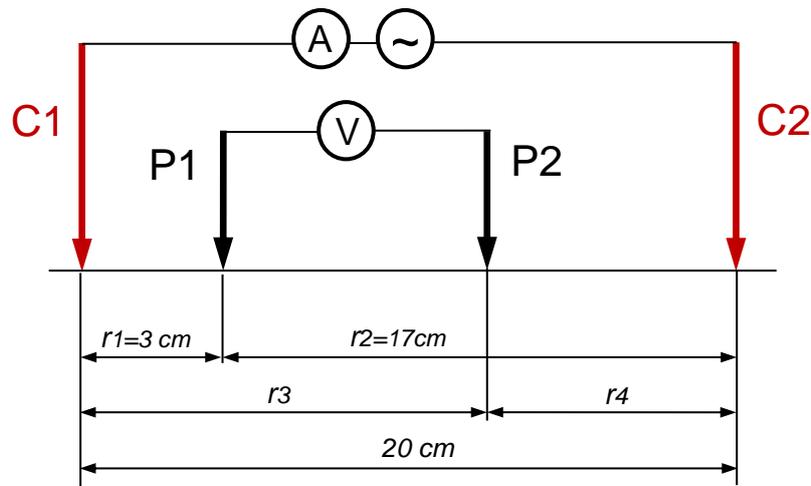


Figure 2. 14 : Schéma de la procédure de mesure proposée

Le point P1 a été placé délibérément à 3 cm de C1, ni trop proche ni trop loin de la source de courant, car si P1 est trop proche le potentiel est très élevé (cf. **Figure 2. 3**) et donc il est source d'instabilité de mesures. Si P1 est trop loin son potentiel est alors trop faible et l'écart de potentiel entre P2 et P1 n'est pas suffisant en certains points pour que la mesure soit supérieure aux bruits de mesures. Après plusieurs essais préliminaires, nous avons constaté que 3 cm est un bon compromis pour obtenir des mesures suffisamment significatives pour pouvoir être exploitées.

Par cette méthode nous obtenons des chutes de potentiels par rapport à une valeur fixe qui est le potentiel au point A où se situe P1. Ces valeurs donnent une courbe similaire à celle illustrée sur la **Figure 2. 3**. Sachant que le potentiel du point au centre de C1 et C2 est théoriquement nul, cette courbe est donc décalée par soustraction d'une valeur identique (qui est la valeur de ΔV correspondant à $r_3 = 0,1\text{m}$) pour que la courbe passe à 0 en son centre. Le **Tableau 2. 2** présente un exemple de résultat de mesure obtenu par cette procédure en donnant les vraies valeurs mesurées avant le décalage (différence de potentiel ΔV) et les valeurs obtenues (potentiel V) après le décalage identique de 205,5 mV (différence de potentiel mesurée quand $r_3 = 0,1\text{m}$). La **Figure 2. 15** illustre ces valeurs, issues du **Tableau 2. 2**, en fonction de la distance r_3 du point considéré à l'électrode C1. La courbe rouge rassemble les valeurs de mesure de différence de potentiel ΔV et la courbe bleue présente le potentiel des points de mesure calculé après la procédure de décalage.

Tableau 2. 2 : Exemple de décalage des mesures de différence de potentiel pour l'obtention d'une courbe de potentiel

r3 (m)	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
ΔV mesurée (mV)	63,4	100,7	130,0	153,4	170,9	188,2	205,5
Potentiel après le décalage (mV)	-142,0	-104,8	-75,5	-52,1	-34,5	-17,3	0,0
r3 (m)	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	
ΔV mesurée (mV)	224,9	241,1	262,6	280,8	312,4	363,3	
Potentiel après le décalage (mV)	19,4	35,6	57,1	75,3	106,9	157,8	

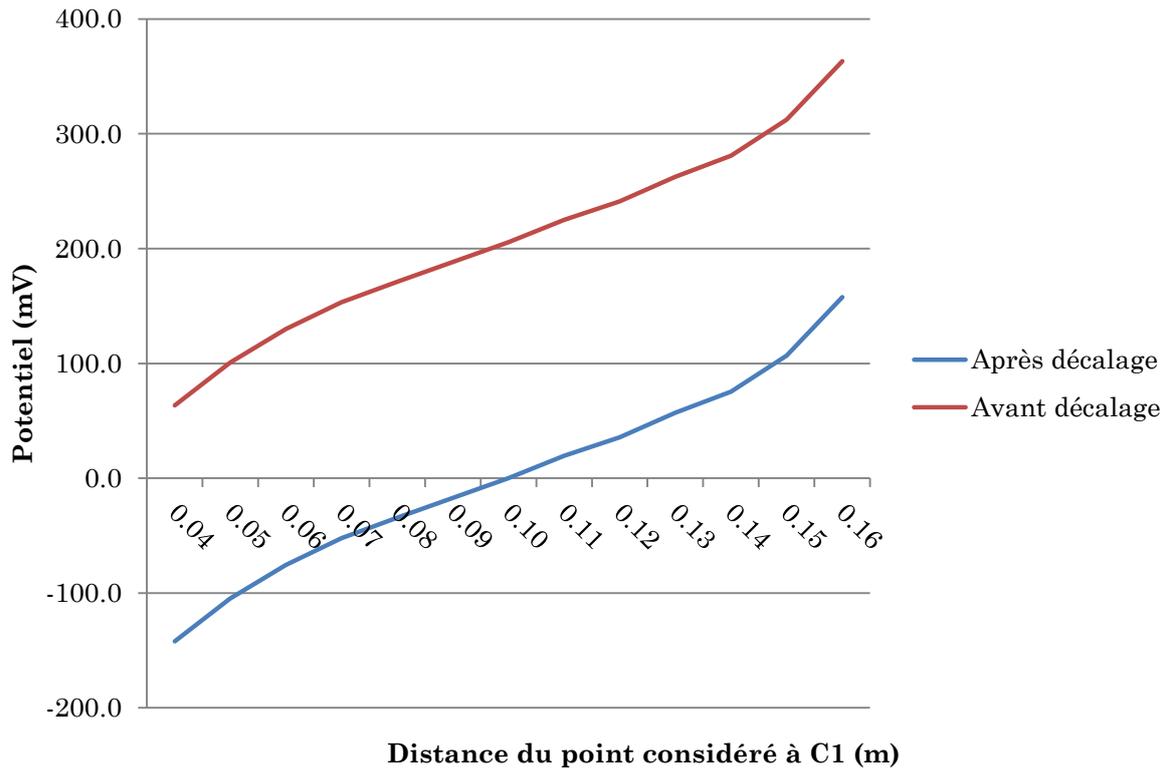


Figure 2.15 : Courbes de potentiel avant et après le décalage en fonction de la distance r_3 du point de mesure à C1

Cette méthode de mesure nous permet de balayer tous les points entre P1 et C2 et nous sert ensuite à tracer une courbe de potentiel des points en surface entre les sources de courant. Elle sera exploitée pour étudier la teneur en eau du béton en fonction de la profondeur. Un autre intérêt de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas d'appareils avec plusieurs canaux de mesure tels que ceux utilisés avec des dispositifs multi-électrodes. Un simple appareil à deux voies d'injection du courant et deux voies de potentiel est tout à fait suffisant.

2.5.2. Méthode d'exploitation de la courbe de potentiel

Nous donnons un exemple de courbe de potentiel dans la **Figure 2.16** suite à des valeurs décalées présentées dans le **Tableau 2.2**.

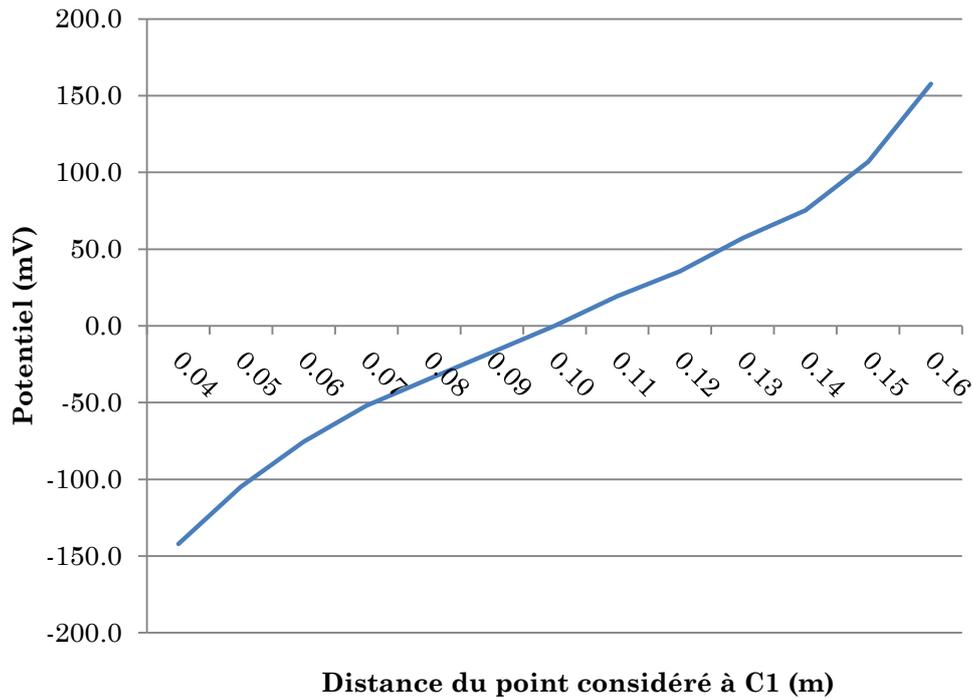
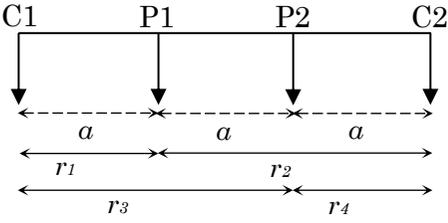
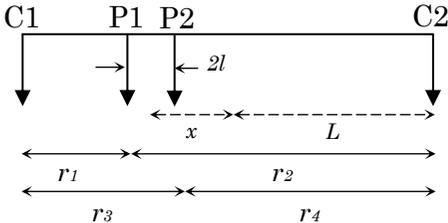
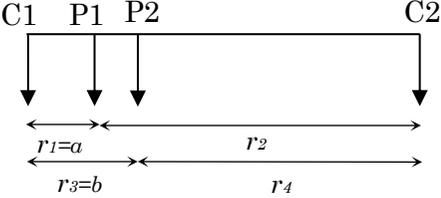


Figure 2. 16 : Exemple d'une courbe de potentiel issue des mesures expérimentales

À partir des courbes de potentiel obtenues, nous proposons une méthode de calcul de la résistivité apparente. Le potentiel de tous les points en surface étant connu, cette courbe contient toutes les informations du matériau ausculté recueillies par la procédure de mesure en surface. Pourtant, comme il est difficile d'exploiter directement cette courbe, pour la traduire en résistivité électrique elle peut être analysée par plusieurs configurations disponibles du dispositif quadripolaire. Les valeurs de différence de potentiel ΔV sont calculables en prenant les potentiels correspondants à partir de cette courbe afin de calculer la résistivité apparente. Nous donnons dans le **Tableau 2. 3** quelques exemples d'exploitation de la courbe de potentiel.

Tableau 2. 3 : Exemple d'exploitation de la courbe de potentiel pour différentes configurations dans la littérature

Configuration et disposition des électrodes	Valeur P1 retirée de la courbe (mV) et valeur de r1 correspondant	Valeur P2 retirée de la courbe (mV) et valeur de r3 correspondant	Facteur géométrique	Résistivité apparente (Ω.m)
<p>Wenner</p> <p>Avec $a = 6,67$ cm</p> 	<p>$r1 = 6,67$ cm $V1 = -59,9$ mV</p>	<p>$r3 = 13,34$ cm $V3 = 63,21$ mV</p>	<p>$2\pi a$</p>	<p>$51,82$ Ω.m</p>
<p>Schlumberger</p> <p>Avec $L=10$ cm, $l=1$ cm, $x=3$ cm</p> 	<p>$r1 = 6$ cm $V1 = -75,5$ mV</p>	<p>$r3 = 8$ cm $V3 = -34,54$ mV</p>	<p>$\frac{\pi (L^2 - x^2)^2}{2l (L^2 + x^2)}$</p>	<p>$48,88$ Ω.m</p>

<p>Pôle-dipôle</p> <p>Avec $a=4$ cm, $b=5$ cm</p> 	<p>$r_1 = 4$ cm $V_1 = -142,04$ mV</p>	<p>$r_3 = 5$ cm $V_3 = -104,8$ mV</p>	<p>$\frac{2\pi ab}{b-a}$</p>	<p>46,75 $\Omega \cdot m$</p>
--	---	--	---	--

2.5.3. Configuration symétrique

Plusieurs configurations ont été testées afin d'exploiter au mieux la courbe de potentiel. La configuration qui nous a semblé la plus pertinente est la configuration dite « symétrique ». C'est cette configuration que nous décrivons ci-dessous.

Dans cette configuration les électrodes de potentiel P1 et P2 sont supposées toujours positionnées symétriquement l'une et l'autre par rapport au centre de la ligne de mesure. Par exemple si P1 est située à r_1 de C1 alors P2 s'écarte aussi d'une même distance r_1 de C2.

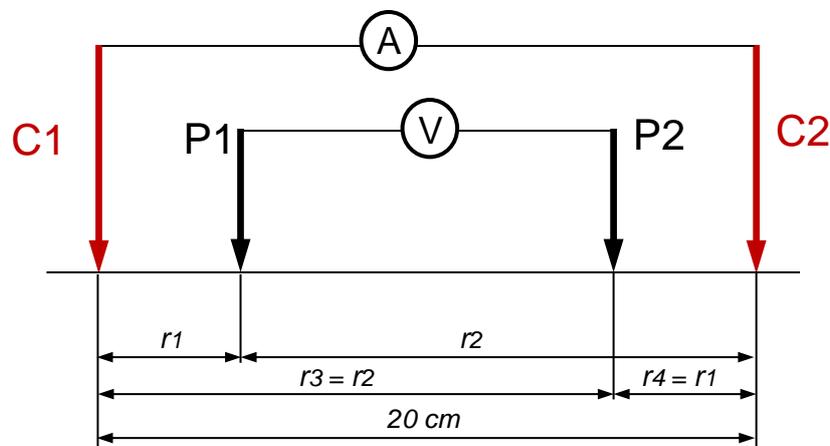


Figure 2. 17 : Configuration symétrique

La résistivité apparente est calculée par la relation :

$$\rho_{app} = \frac{\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \frac{\Delta V}{I} \quad (2. 20)$$

Avec ΔV : chute de potentiel entre P1 et P2 [V]

I : intensité du courant [A]

Reprenons l'exemple présenté dans la section précédente et supposons que P1 et P2 soient positionnées selon la configuration symétrique. Le processus de calcul se fait comme suit :

- r_1 varie de 0,04 m à 0,09 m et r_2 varie de 0,16m à 0,11m; tout en respectant la somme r_1+r_2 toujours égale à 0,2 m.

A chaque valeur de r_1 :

- Détermination du potentiel de P1 (correspond à r_1) et P2 (correspond à r_2) sur la courbe de potentiel
- Calcul de la différence de potentiel ΔV entre P1 et P2
- Calcul de la résistivité apparente ρ_{app} , sachant que $I = 1\text{mA}$
- Tracé de la courbe de résistivité apparente en fonction de r_1

Le **Tableau 2. 4** présente les résultats obtenus après exploitation de la courbe de la **Figure 2. 16**.

Tableau 2. 4 : Résistivités calculées selon la configuration symétrique avec la courbe de potentiel donnée dans la **Figure 2. 16**

r_1 [m]	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
r_2 [m]	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11
V_{P1} [mV]	-142,0	-104,8	-75,5	-52,1	-34,5	-17,3
V_{P2} [mV]	157,8	106,9	75,3	57,1	35,6	19,4
ΔV [mV]	299,84	211,70	150,80	109,27	70,17	36,70
Résistivité ρ_{app} [$\Omega.m$]	50,24	49,88	49,74	52,06	52,90	57,07

On obtient au final une courbe de résistivité en fonction de r_1 présentée sur la **Figure 2. 18**.

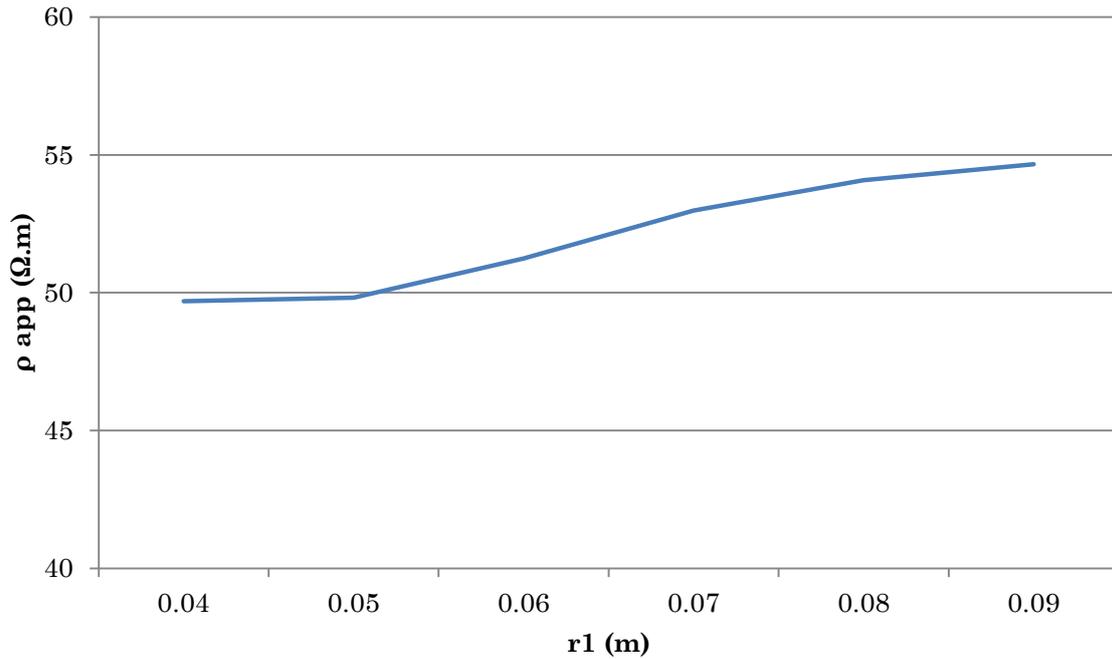


Figure 2. 18 : Exemple d'une courbe de résistivité apparente en fonction de la distance du point de mesure à une source électrique (r_1)

Pour le calcul des résistivités les valeurs de potentiel ont été extraites de la courbe de potentiel suivant la position de l'électrode de potentiel. On rappelle que les positions des électrodes de potentiel (P1 et P2) ne sont pas réelles. Il ne s'agit que d'une disposition « virtuelle » des électrodes, représentant un moyen d'exploitation de la courbe de potentiel, celle-ci étant moins parlante en comparaison d'une étude de résistivité en fonction de r_1 .

2.5.4. Simulation numérique d'une mesure de résistivité sur un matériau ayant un gradient de résistivité

Pour prévoir les résultats obtenus avec cette nouvelle procédure de mesure sur un matériau ayant un gradient de résistivité, nous avons réalisé une étude numérique sur COMSOL Multiphysics, un logiciel commercialisé basé sur la méthode des éléments finis. Nous avons créé un grand modèle de 1m x 1m x 1m à la surface duquel un courant électrique est injecté (**Figure 2. 20**). Avec ces dimensions, les effets de bord sur les mesures sont négligeables. Ce modèle présente un gradient linéaire de résistivité électrique sur son épaisseur. Deux types de gradient ont été considérés :

- Une diminution linéaire de la résistivité de la surface (200 $\Omega.m$) jusqu'au fond de l'élément (50 $\Omega.m$) : gradient dit « séchage ».

- Une augmentation linéaire de la résistivité de la surface (50 $\Omega.m$) jusqu'au fond de l'élément (200 $\Omega.m$) : gradient dit « humidification ».

La variation de résistivité sur l'axe z est illustrée dans le **Figure 2. 19**, sachant que $z=1$ correspond à la surface de mesure et $z=0$ correspond au fond de la structure.

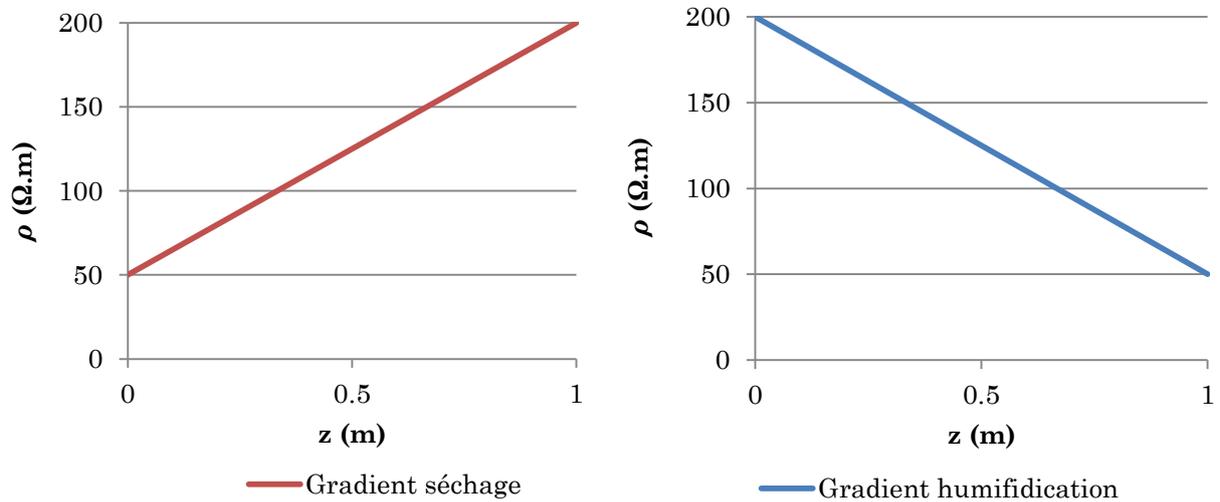


Figure 2. 19 : Illustration du gradient de résistivité sur la structure étudiée

La procédure de simulation numérique est la suivante :

- Application d'une loi linéaire de résistivité à l'élément représentant le béton
- Modélisation des deux sources de courant par deux points extérieurs du profil de calcul (un flux entrant et un flux sortant). Le courant appliqué est de 0,5mA.
- Après le calcul, détermination du potentiel de tous les points en surface se situant entre les deux points d'injection.
- Calcul de la résistivité selon la configuration symétrique avec la formule **(2. 20)**

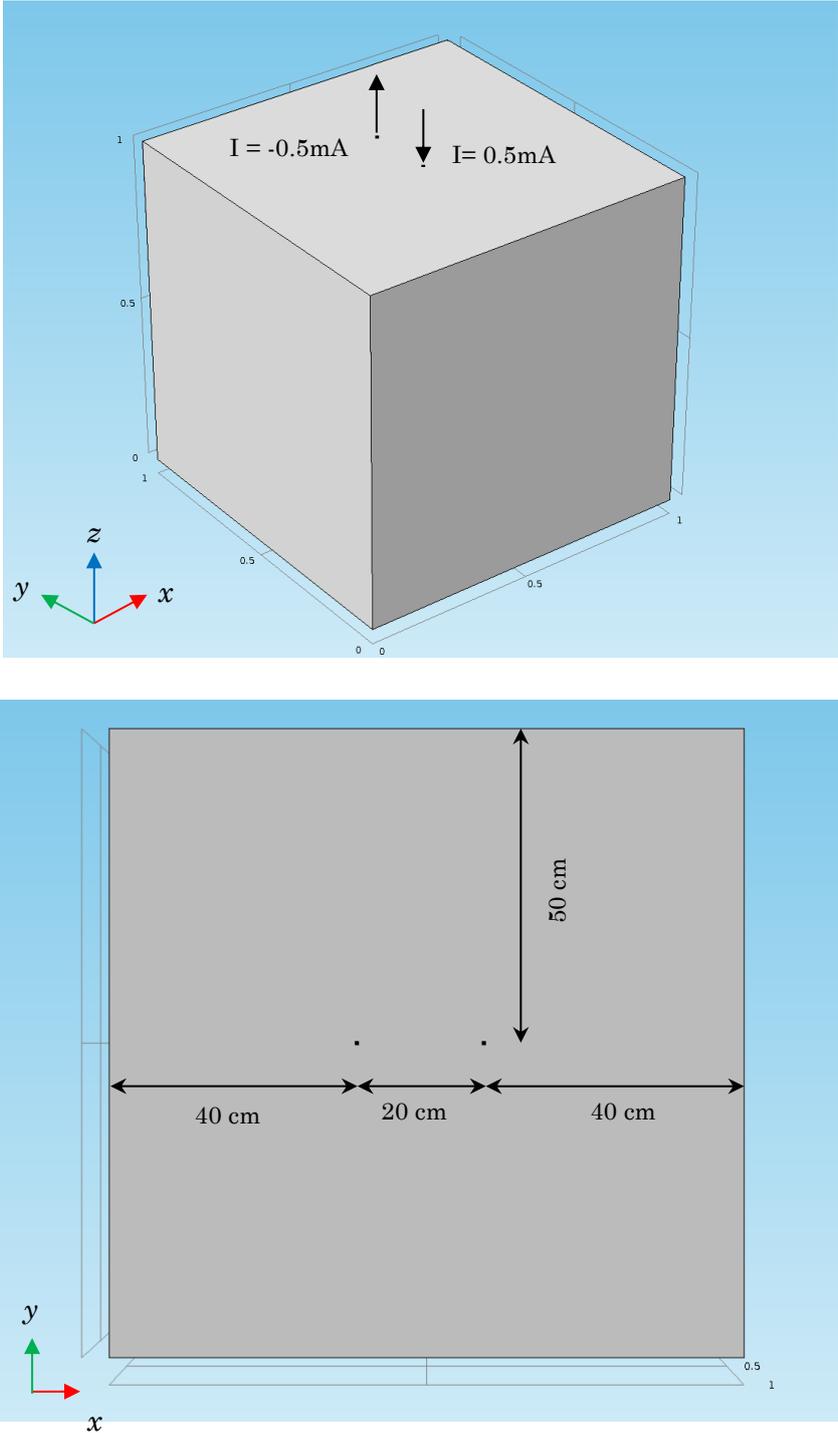


Figure 2. 20 : Modèle utilisé pour étudier l'effet du gradient de résistivité

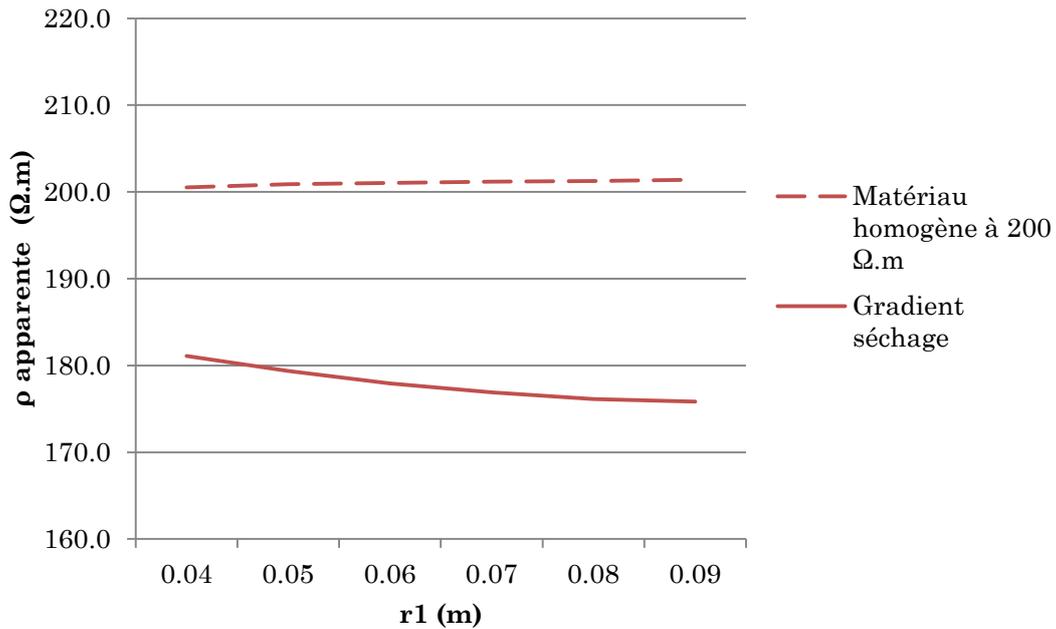


Figure 2.21 : Résultat de la simulation sur le modèle avec gradient de résistivité (type « séchage »)

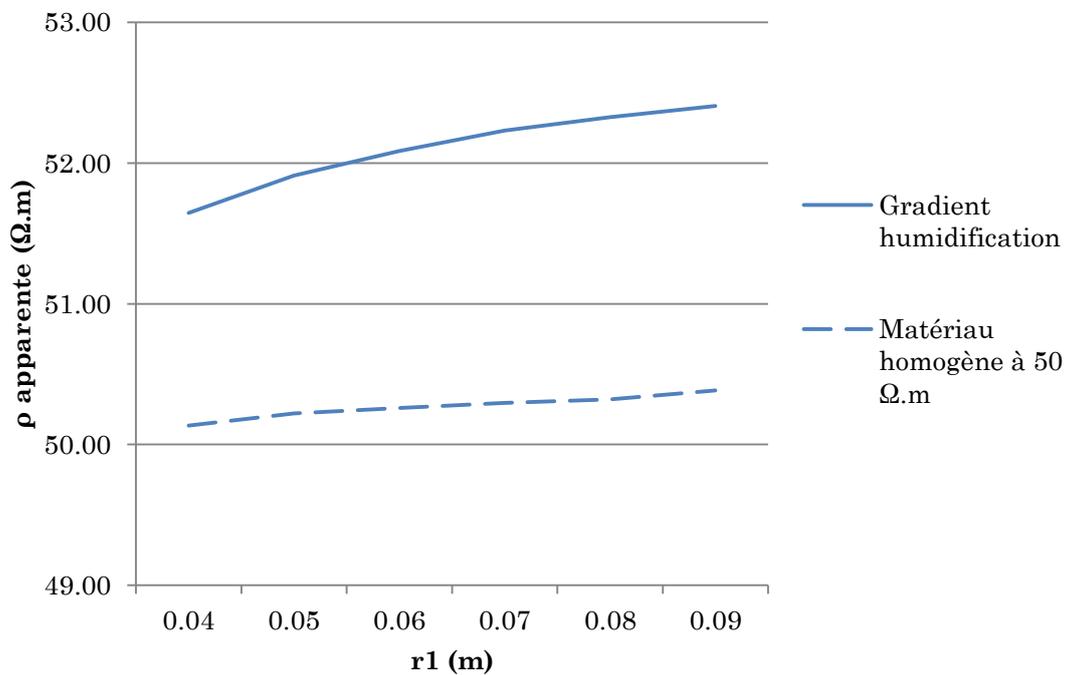


Figure 2.22 : Résultat de la simulation sur le modèle avec gradient de résistivité (type « humidification »)

Les résultats de simulation avec gradient de séchage, d'humidification et sur le matériau homogène considéré comme référence sont présentés sur les **Figure 2.21** et **Figure 2.22**.

22. Les courbes du modèle homogène (en pointillé) sont presque horizontales avec la valeur exacte de la résistivité appliquée au matériau, ce qui signifie que le milieu de calcul peut être considéré homogène et semi infini.

Pour les modèles ayant un gradient de résistivité, on ne trouve plus les résistivités réelles. Dans le cas du gradient de séchage (**Figure 2. 21**), la courbe de résistivité descend quand r_1 augmente. Sachant que dans ce cas la résistivité du matériau diminue de la surface jusqu'au fond de l'élément, il existe une corrélation entre la distance de l'électrode de potentiel P à la source du courant C et la profondeur investiguée. Concrètement, plus l'électrode de potentiel P s'éloigne de la source, plus on évalue la résistivité en profondeur. Il faut néanmoins garder à l'esprit que ces valeurs de résistivité ne sont pas la vraie résistivité du matériau car le milieu n'est pas homogène.

Dans le cas du gradient d'humidification (**Figure 2. 22**), nous observons un effet de gradient qui va dans le même sens que la conclusion précédente mais, dans ce cas précis, il faut la nuancer car l'effet est beaucoup moins significatif (la courbe a une forme légèrement croissante). En effet la courbe obtenue sur milieu à gradient d'humidification et celle sur milieu homogène sont quasiment identiques avec une valeur très proche de la valeur réelle (50 $\Omega.m$). Ceci peut être expliqué par la théorie de la mesure de résistivité électrique. Telford [Telford et al., 1990] a montré qu'au cours de l'investigation d'un milieu bi-couche avec des résistivités différentes, le courant est dévié de sa direction d'injection. Par conséquent, pour un gradient « séchage » le courant est plus concentré et circule plus vers le fond de l'élément ausculté et ainsi le volume ausculté est plus profond. Dans le cas du gradient « humidification » le courant est plus réparti et plus étalé, nous obtenons plus d'information en surface qu'en profondeur. Ainsi la courbe de résistivité est plus marquée dans le cas du gradient de séchage que de celui d'humidification.

Pourtant les résultats sont issus des simulations numériques effectuées dans le cas idéal où le milieu est parfaitement contrôlé. Cela reste éloigné de vraies conditions de mesure sur le béton armé, pour lesquels différents paramètres sont susceptibles de modifier le résultat.

2.6. Etude numérique sur la taille du milieu ausculté sur la résistivité mesurée

Dans ce paragraphe l'effet de bord est étudié grâce à 3 modèles numériques de différentes tailles : 1 cube d' $1 \times 1 \times 1 m^3$, 1 cube de $2 \times 2 \times 2 m^3$, et 1 cube de $4 \times 4 \times 4 m^3$. L'injection se fait toujours sur la surface supérieure des modèles, avec un écartement entre les 2 sources de 20 cm. La résistivité de l'élément est fixée homogène à 200 $\Omega.m$. Ces éléments sont construits en utilisant un maillage identique et extrêmement fin . Il

est observé sur la **Figure 2. 23** que plus la taille de l'élément est grande, plus les résultats obtenus sont proches de la valeur réelle (200 $\Omega.m$) mais on ne trouve jamais la résistivité réelle imposée, même si les dimensions de l'élément augmentent jusqu'à 4x4x4 m³. Etant donnée la configuration de la modélisation il est raisonnable de penser que ces perturbations sont causées par des effets de bord. Les courants électriques et le champ de potentiel sont modifiés au niveau des bords, suite à quoi la résistivité apparente est également modifiée. On peut conclure grâce à cette étude que les domaines numériques étudiés ne sont pas encore considérés comme semi-infinis, même si le milieu d'auscultation est très vaste. Le courant circule dans l'ensemble du milieu dans lequel il est injecté et il apparait impossible de considérer qu'ils se limite à un domaine fixé.

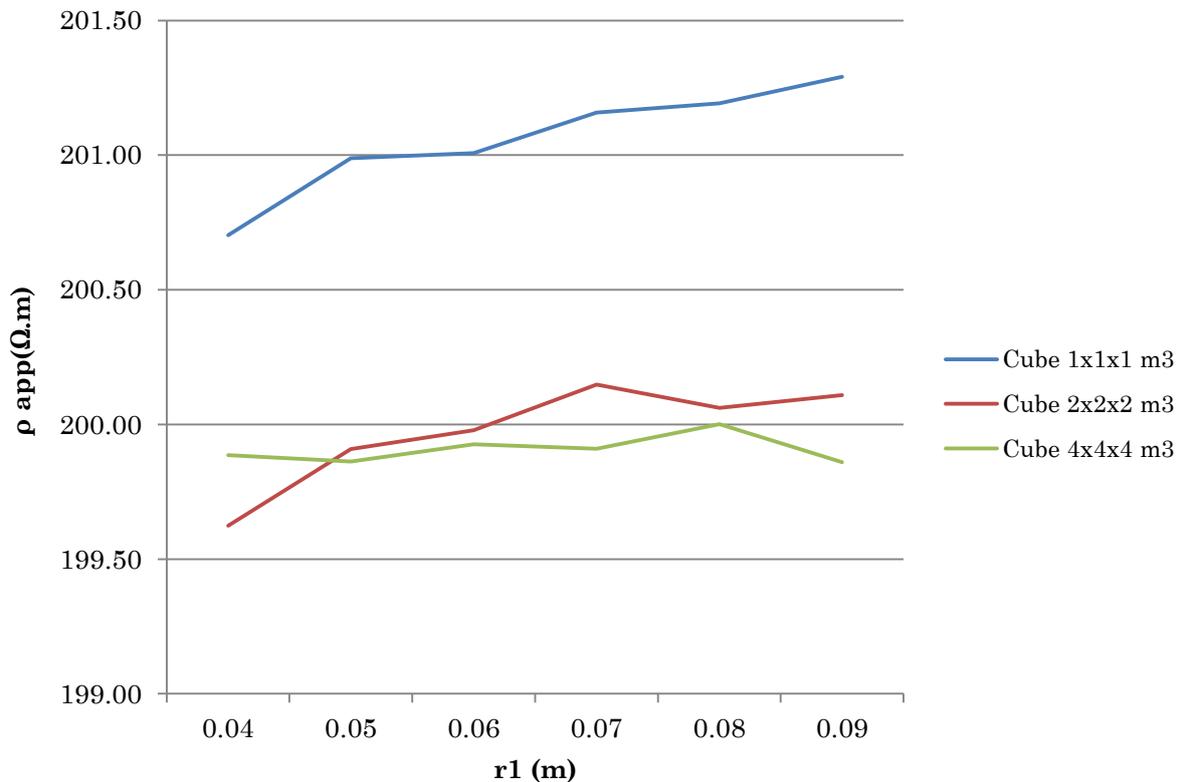


Figure 2. 23 : Résistivité apparente obtenue sur modèles numériques de différentes tailles

2.7. Analyse numérique des effets de bord et de l'acier sur la mesure de résistivité

Comme nous l'avons vu précédemment les mesures réalisées à proximité des bords sont soumises à des effets qui se traduisent par une augmentation de la résistivité. Ces effets

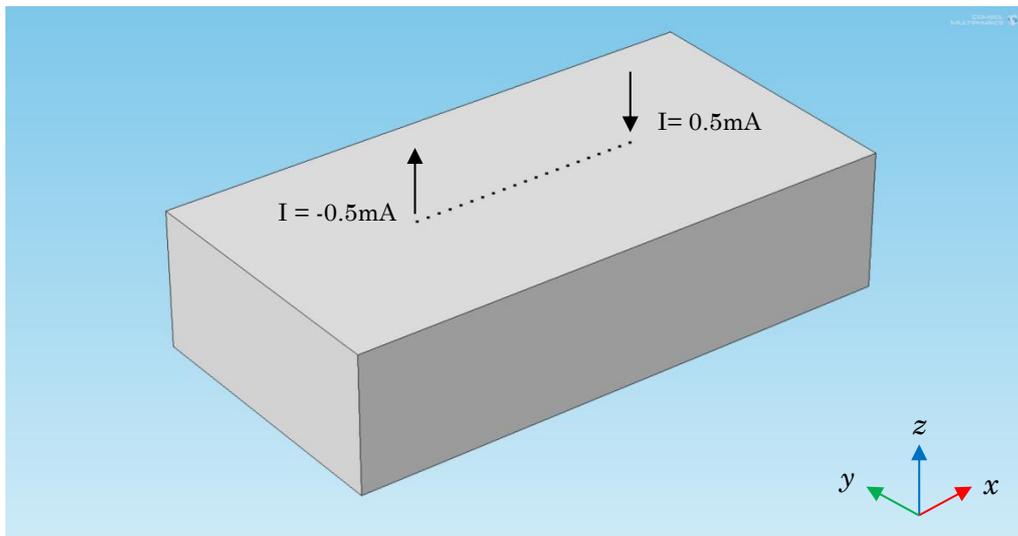
de bord sont inévitables lorsque les mesures se font sur les corps d'épreuve de faible dimension. Cette augmentation est d'autant plus importante que la mesure est faite près des bords de l'élément ausculté.

Une étude numérique afin de mieux appréhender l'influence de l'acier sur les mesures de résistivité et analyser comment ces mesures pourraient être exploitées a été menée sous COMSOL Multiphysics. Pour cela quatre modèles ont été considérés :

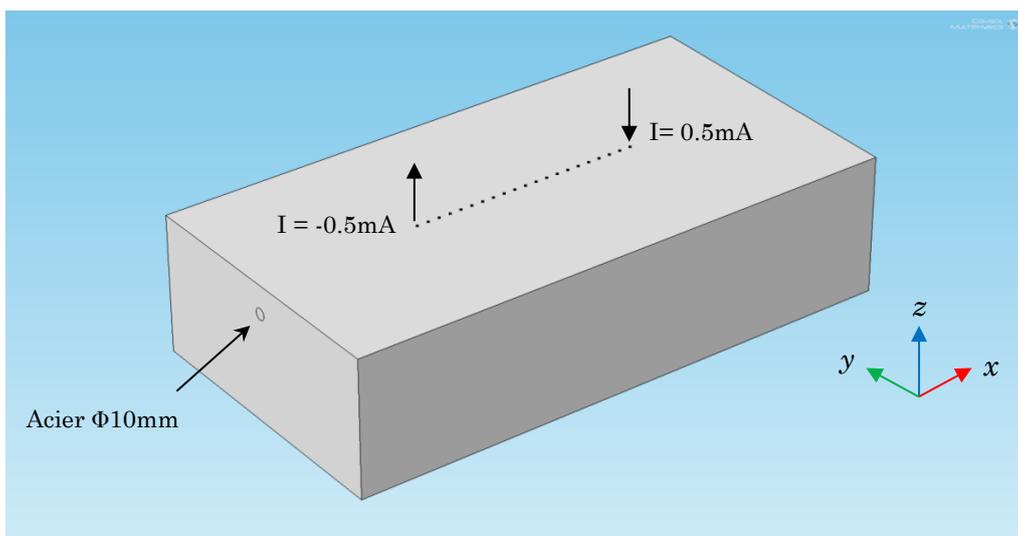
- deux grandes structures de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$, avec et sans armature
- deux petites structures de $50 \times 25 \times 12 \text{ cm}^3$, avec et sans armature

Les modèles armés simulés ont été conçus avec une seule barre d'acier. Les sources électriques se trouvent sur la surface des structures au-dessus de l'acier. L'écartement des deux sources électriques est de 20 cm. Les potentiels sont obtenus pour tous les points se situant au milieu des deux sources. Les détails géométriques de la grande dalle sont identiques au modèle présenté dans la section 2.2.3.

2.7.1 Effets de bord et des aciers

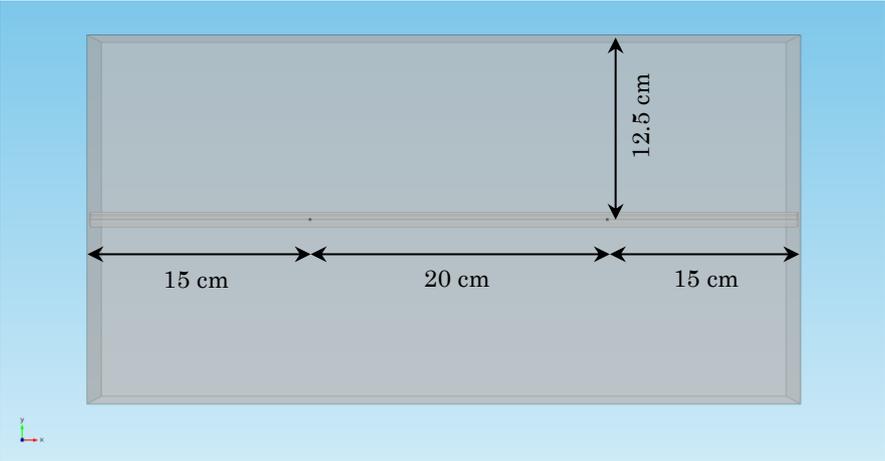


(a)

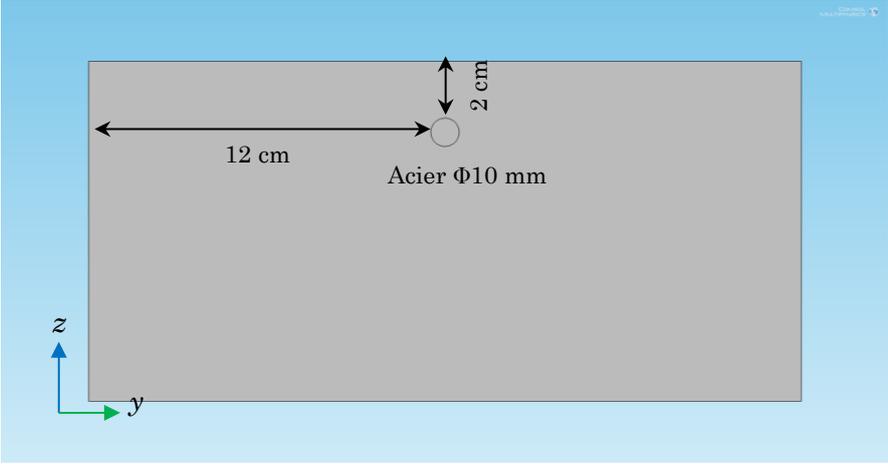


(b)

Figure 2. 24 : Modèle de la petite dalle armée (a) et de la petite dalle non armée (b)



(a)



(b)

Figure 2. 25 : Détails géométriques de la petite dalle armée (a) vue de dessus, (b) vue de côté

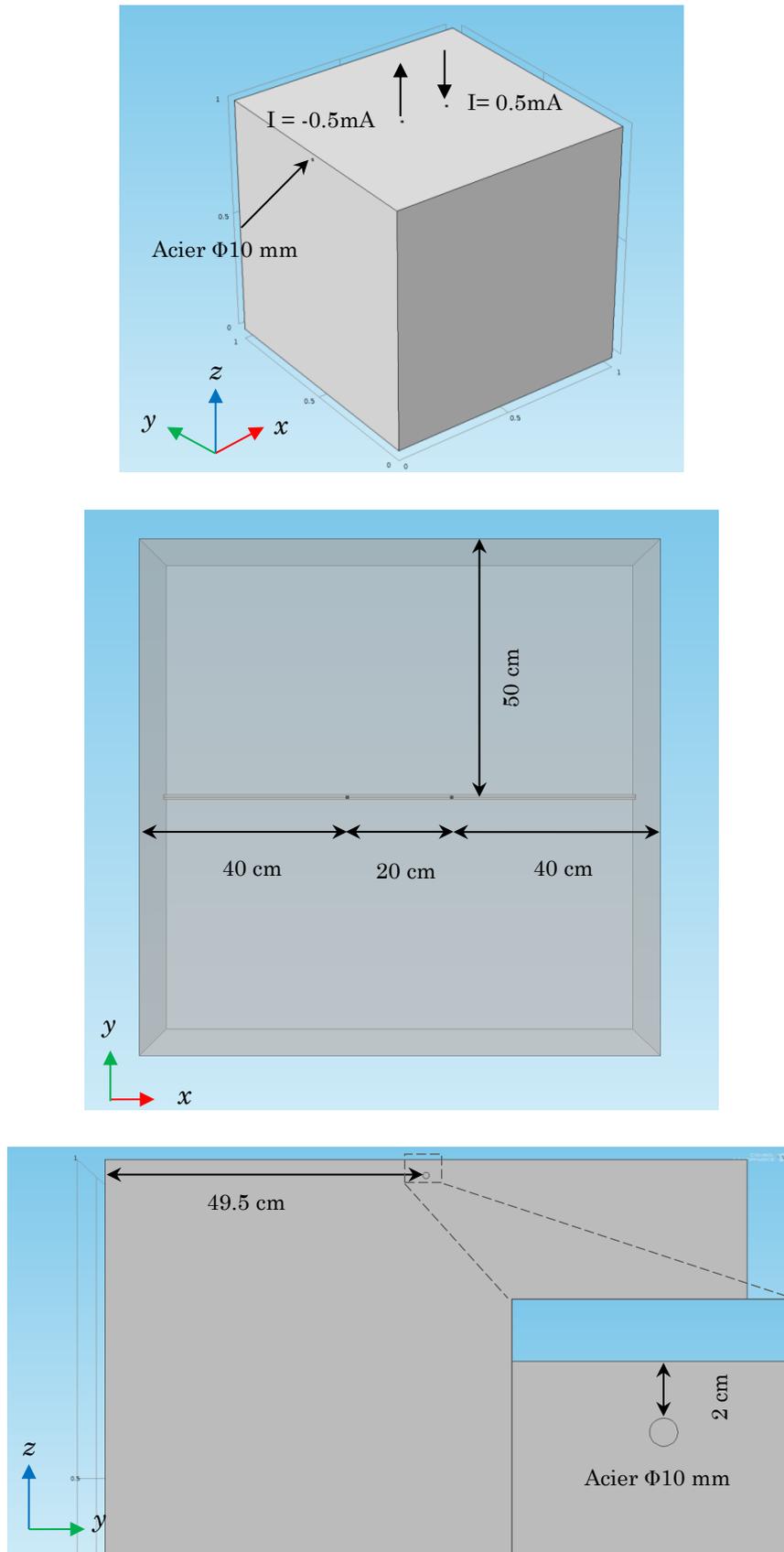


Figure 2. 26 : Détails de la grande dalle armée

Les autres informations concernant le modèle numérique sont présentées dans le **Tableau 2. 5**.

Tableau 2. 5: Détails des modèles numériques

Dimensions de la grande dalle	1x1x1 m ³
Dimensions de la petite dalle	50x25x12 cm ³
Diamètre de la barre d'acier	10 mm
Enrobage	20 mm
Résistivité homogène du béton	200 Ω.m
Conductivité de l'acier	4,032.10 ⁶ S/m
Courant injecté	0,5 mA
Ecartement entre 2 sources électriques	20 cm

La méthode d'exploitation de la courbe de potentiel est identique à celle présentée dans la section 2.5.3 pour les mesures expérimentales. Les **Figure 2. 27** et **Figure 2. 28** ci-dessous montrent les résultats issus de la simulation numérique.

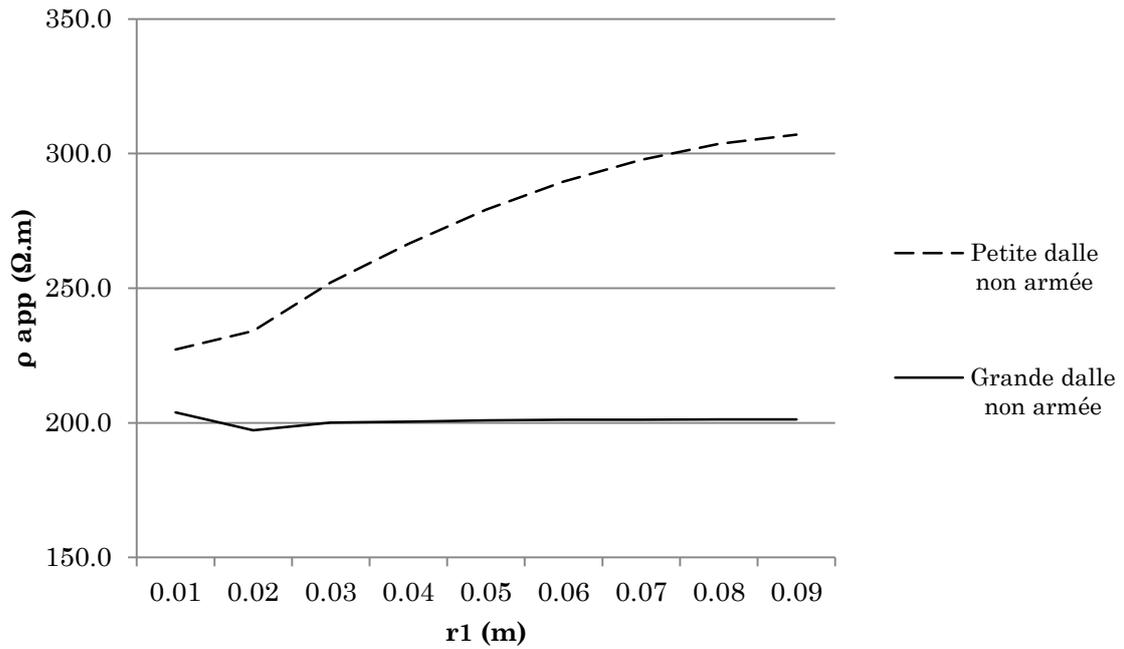


Figure 2. 27: Courbes de résistivité obtenues par la simulation numérique sur les modèles non armés

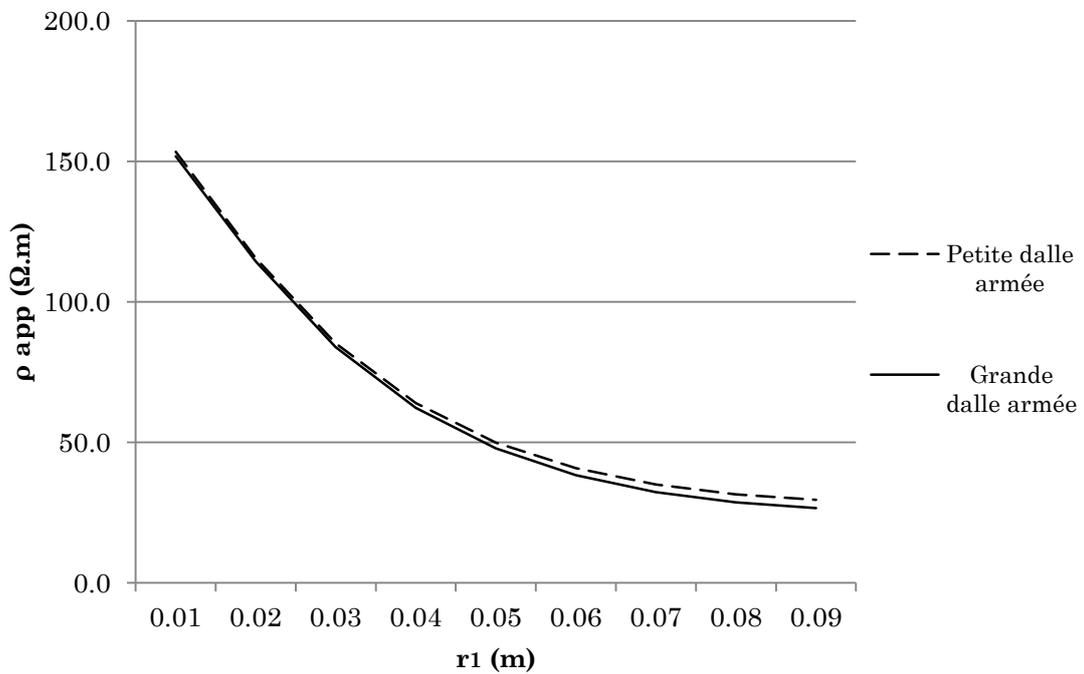


Figure 2. 28 : Courbes de résistivité obtenues par la simulation numérique sur les modèles armés

La **Figure 2. 27** montre les courbes de résistivité sur les dalles non armées (grande et petite). Pour la grande dalle le résultat montre bien la vraie valeur de résistivité du matériau et il n'y a pas de différence entre la résistivité réelle appliquée au matériau et la valeur obtenue, tandis que dans le cas de la petite dalle la courbe tend à augmenter avec une valeur de résistivité calculée toujours supérieure à la vraie valeur appliquée (augmentation de 17% pour $r_1=0,04m$ et 153,5% pour $r_1=0,09m$). Pour la grande dalle le milieu est considéré comme infini donc il n'y a pas d'effet de bord qui existe pour les mesures dans la petite dalle. Cela veut dire que les mesures effectuées sur la petite dalle non armée sont inévitablement influencées par des effets de bord et par la taille des structures. Les résultats confirment également que la résistivité obtenue est seulement la valeur apparente et non la vraie résistivité du béton pour un milieu non semi-infini.

La **Figure 2. 28** montre les résultats sur les dalles armées. La résistivité trouvée a fortement chuté par rapport à la vraie résistivité suite à la présence de l'acier. Seule une petite différence entre les deux courbes est observée entre la petite et grande dalle. Ainsi l'effet de bord a été neutralisé par la présence de l'acier. Ce matériau qui a une conductivité beaucoup plus élevée que celle du béton crée un chemin favorable pour le courant et réduit la densité de courant circulant aux bords des corps d'épreuve. Autrement dit, en profitant de l'effet de l'acier on confine le volume investigué à l'intérieur de l'enrobage. Comme les effets de bord sont inévitables, lors des travaux sur des milieux non semi-infinis, la mesure au droit des aciers semble donc être une piste intéressante pour la caractérisation du béton d'enrobage.

2.7.2 Modélisation de la configuration Wenner sur des structures en béton armé

Les modélisations dans cette section se basent sur les travaux de recherche de Salehi [Salehi, 2013]. Différentes configurations ont été testées numériquement afin d'évaluer l'influence des armatures sur la mesure de résistivité. En nous basant sur leurs travaux, nous avons effectué une étude numérique pour deux configurations qui avaient donné la meilleure précision avec le dispositif Wenner. Les études sont réalisées sur un volume d'un m^3 pour éliminer les effets de bord. Un maillage d'acier a été construit. Dans la **Figure 2. 29** les aciers du lit supérieur sont colorés en bleu, ceux du lit inférieur sont colorés en vert. La maille d'acier est carrée de côté 20, 30 ou 40 cm, l'épaisseur d'enrobage est de 2 cm. Les mesures simulées sont de type Wenner avec un écartement des électrodes de 4 cm. La résistivité de l'élément représentant le bloc de béton est constante et égale à $200 \Omega.m$, la conductivité de l'acier est fixée à $4.10^6 S/m$.

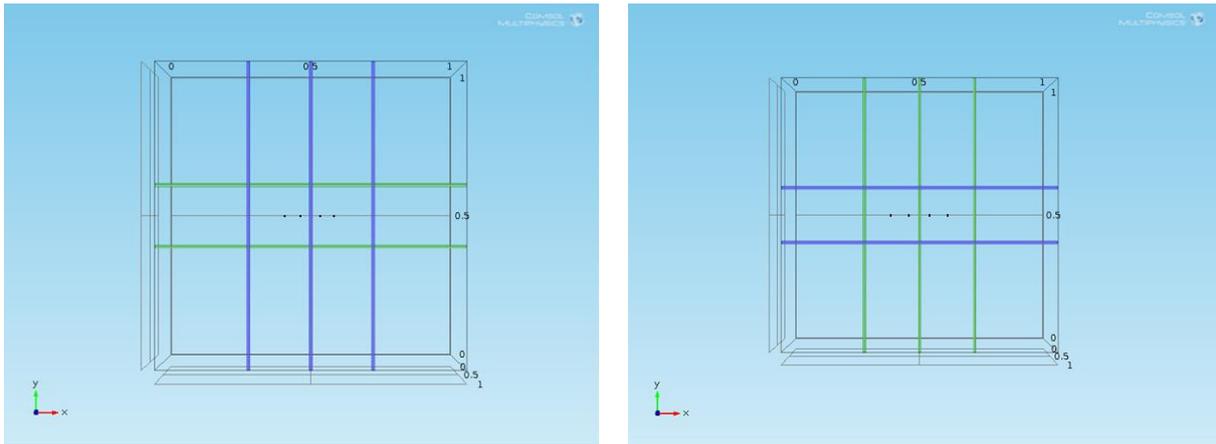


Figure 2. 29 : Modélisation de la configuration sur des éléments en béton armé. Deux configurations testées dans [Salehi, 2013] ; Configuration 1 : mesure perpendiculaire à l'acier au-dessus de la maille ; Configuration 2 : mesure perpendiculaire à l'acier au-dessous de la maille

Tableau 2. 6 : Résultats de simulation avec les configurations de [Salehi, 2013]

	Taille du maillage	20cm x 20cm	30cm x 30cm	40cm x 40cm
Config 1	Résultat ($\Omega.m$)	188,86	192,94	193,41
	Erreur (%)	-5,57%	-3,53%	-3,29%
Config 2	Résultat ($\Omega.m$)	191,59	195,90	195,50
	Erreur (%)	-4,20%	-2,05%	-2,25%

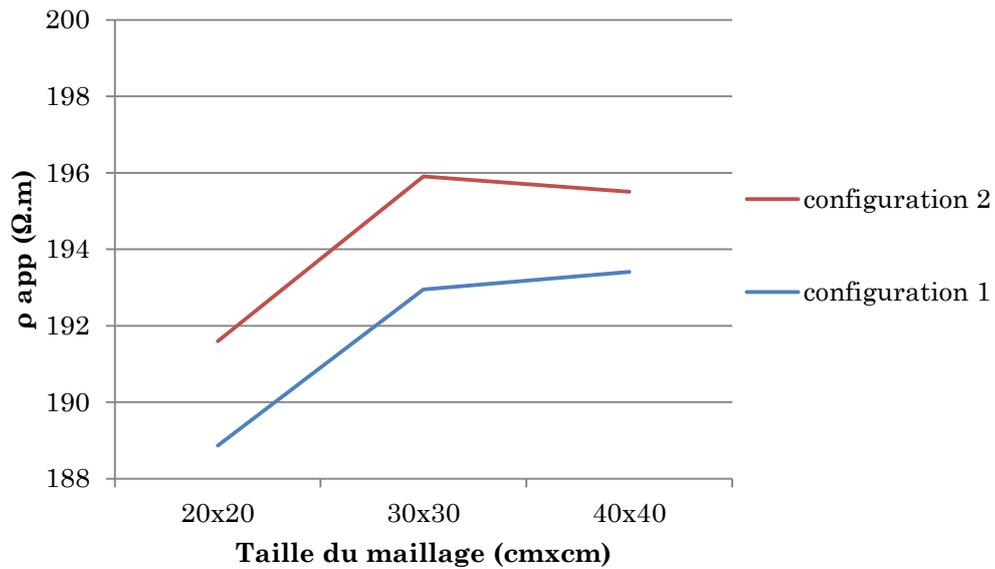


Figure 2. 30 : Résultat de simulation avec les configuration de [Salehi, 2013]

Le tableau montre que bien que la mesure soit réalisée perpendiculairement à l'acier dans un milieu homogène et semi infini, l'influence des aciers demeure non négligeable. Les mesures avec la configuration 2 sont moins influencées par l'acier que celles obtenues avec la configuration 1 car les barres parallèles au dispositif se trouvent plus loin de la surface. Malgré tout, quelle que soit la configuration étudiée, on ne retrouve pas la résistivité réelle du béton.

Une deuxième étude a été effectuée sur COMSOL sur un modèle de taille limitée (50x25x12 cm³, comme dans la **Figure 2. 25**) avec le dispositif Wenner. Deux positions de mesure ont été testées.

1. Dans un premier temps, il s'agit des mesures réalisées perpendiculairement à l'acier avec différents écartements (**Figure 2. 31**). Le **Tableau 2. 7** présente l'ensemble des résultats de la simulation

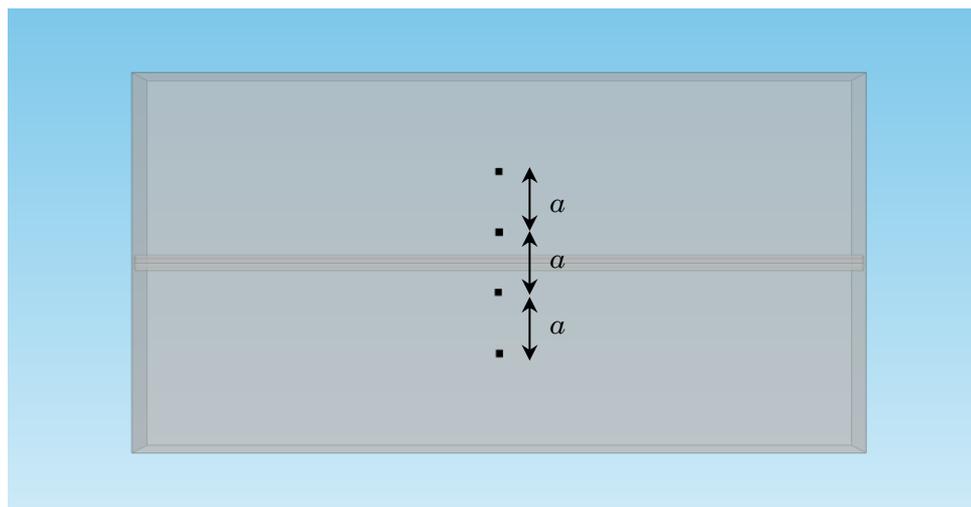


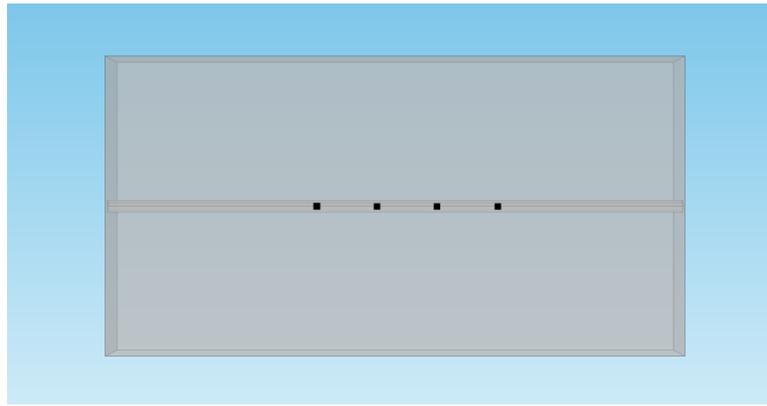
Figure 2. 31 : Test mesure perpendiculaire à l'acier

Tableau 2. 7 : Résultat de simulation des mesures Wenner perpendiculaires à l'acier sur la petite dalle armée

Ecartement entre électrodes de la configuration Wenner (a)	0,04 m	0,05 m	0,06 m
Résultat ($\Omega.m$)	210,25	227,31	255,12
Erreur (%)	5,13%	13,66%	27,56%

Les mesures perpendiculaires à l'acier sur cette dalle montrent que l'effet de bord est significatif, il est d'autant plus fort que l'écartement des électrodes est grand. Ces configurations ne permettent pas d'atténuer les effets de bord.

2. Considérons maintenant des positions au-dessus de l'acier. Deux positions ont été observées : à 17,5 cm du bord et à 2 cm du bord (**Figure 2. 32**). Un seul écartement de 0,05 m a été considéré.



(a)



(b)

Figure 2. 32 : Modèle de petite dalle armée. Mesure au-dessus de l'acier avec le dispositif Wenner (a) à 17,5 cm du bord et (b) à 2 cm du bord

Tableau 2. 8 : Résultat de simulation des mesures Wenner au-dessus de l'acier

	Mesure à 17,5 cm du bord	Mesure à 2 cm du bord
Résultat ($\Omega.m$)	62,98	58,78
Ecart (%)	-68,51%	-70,61%

L'effet de l'acier est significatif et on voit bien que l'effet de bord est réduit avec la présence de l'acier : même si la mesure est faite près du bord, on trouve un résultat comparable avec celui obtenu quand la mesure est faite loin de celui-ci.

2.8. Méthodologie proposée pour la suite de l'étude

L'effet des aciers n'est pas négligeable sur les mesures de résistivité en surface des structures en béton armé. Peu de travaux dans la littérature explicitent l'influence de la maille d'acier sur la résistivité. Les analyses numériques montrent que malgré les recommandations, les mesures de résistivité dans un milieu non semi-infini sont toujours affectées par les effets de bord et la présence de l'acier. Les mesures perpendiculaires à l'acier ne permettent pas d'éliminer totalement l'effet des aciers, ni l'effet de bord lorsque la mesure est faite sur un milieu non semi-infini ce qui est toujours le cas. Contrairement à ce que disent les recommandations dans les travaux de recherche précédents, le dispositif de mesure ne se situe donc jamais assez loin des armatures d'acier. La présence de l'acier doit donc être prise en compte si l'on souhaite évaluer la résistivité réelle du matériau.

La mesure au droit de l'acier semble être une méthode pertinente pour éviter ces effets de bord, même si la résistivité mesurée est très influencée par la présence de l'acier qui la diminue fortement. Une prise en compte des aciers par analyse numérique, en intégrant leur caractérisation électrochimique, doit permettre de fournir des informations sur le matériau.

C'est pourquoi, dans notre travail de thèse nous proposons une méthodologie de mesure directement au droit des aciers par le dispositif linéaire composé de quatre électrodes. Cette procédure permet de confiner le volume de béton investigué de la surface jusqu'au voisinage de l'acier et dans la barre d'acier elle-même au lieu d'une circulation invasive dans le bloc de béton. Les effets de bord sont ainsi éliminés car très peu de courant circule vers les bords du bloc. Les résultats de mesure vont sûrement être influencés par l'acier, comme présenté numériquement, mais ils ne seront pas affectés par les effets de bord ce qui permettra de travailler sur des corps d'épreuve où les électrodes ne se trouvent jamais suffisamment loin du bord. De plus la mesure doit également permettre de donner des informations sur l'état électrochimique de l'acier, ce qui renforcera le diagnostic.

CHAPITRE 3

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Résumé du chapitre 3

Ce chapitre présente l'ensemble de la campagne expérimentale exploitée au cours de la thèse. Deux essais ont été effectués : sur des dalles en béton (armé et non armé) et sur des échantillons carottés. Deux types de béton sont examinés : non carbonaté et carbonaté correspondant respectivement aux états passif et actif de l'acier du point de vue la corrosion.

Les dalles en béton ont été conditionnées afin de créer un gradient de teneur en eau vertical. Deux types de gradient ont été étudiés : le séchage et l'humidification. Les mesures sont réalisées directement au-dessus de l'acier pour les dalles armées et à la même position sur les dalles non armées de façon à n'étudier que l'impact de l'acier. Les mesures commencent sur le béton saturé et sont répétées régulièrement afin de suivre le séchage du matériau jusqu'à la stabilisation du gradient. Les dalles sont pesées régulièrement afin de contrôler leur état d'humidité. L'influence du gradient de teneur en eau et de l'acier sur la mesure est ainsi observée.

Les mesures sur la face humide montrent l'intérêt de la mesure pour l'étude du gradient de teneur en eau. Par contre, les mesures sur la face sèche semblent plus difficiles à exploiter. Dans les deux cas, nous observons bien l'effet de la perte d'eau du béton puisque la résistivité du béton augmente au fil du temps.

La présence de l'armature diminue la résistivité. Il s'agit d'un effet de court-circuit qui diminue la densité de courant passant dans le béton. L'épaisseur d'enrobage influence également la chute de résistivité dans les mesures au droit de l'acier. On a montré qu'il est possible de profiter de cet effet pour s'affranchir des problèmes liés aux effets de bord.

La seconde campagne concerne la caractérisation des carottes en béton. La résistivité, à différents degrés de saturation, a été obtenue en transmission par application directe de la loi d'Ohm. Les résultats obtenus permettent d'obtenir une loi empirique teneur en eau – résistivité, servant à l'inversion numérique des mesures sur les dalles avec gradients.

3.1. Introduction

Dans ce chapitre l'ensemble des essais expérimentaux de cette étude est présenté. Dans un premier temps la section 3.2 présente les mesures de résistivité sur les échantillons de béton carottés par application directe de la loi d'Ohm afin de trouver une loi empirique degré de saturation – résistivité électrique. Ensuite la préparation des corps d'épreuve et la description des essais expérimentaux sont abordées.

Dans la section 3.3 un test de répétabilité est présenté. Ces mesures servent à évaluer la capacité du matériel à reproduire le même courant ainsi que la stabilité de la réponse du matériau examiné afin de déterminer la variation des résultats dans les mêmes conditions de mesure.

La section 3.4 présente l'ensemble des résultats des essais sur les corps d'épreuve, mis en place suivant la méthodologie proposée dans le Chapitre 2, afin d'étudier l'influence du gradient de teneur en eau mais aussi des aciers présents sur les mesures de résistivité. Deux types de gradient de teneur en eau ont été examinés : le séchage (béton sec en surface et plus humide en profondeur) et l'humidification (béton plus humide en surface qu'en profondeur). Deux enrobages différents sont considérés dans nos travaux: 2 cm et 4 cm.

3.2. Mesure de résistivité du béton par transmission

3.2.1. Introduction

Cette campagne de mesure a pour objectif de déterminer une loi empirique entre la résistivité du béton et sa teneur en eau par application directe de la loi d'Ohm. Au total quatre degrés de saturation ont été considérés dans cette campagne : 100% (saturation), 80%, 50% et 30%. Les mesures sont réalisées à ces degrés de saturation avec l'application directe de la loi d'Ohm.

3.2.2. Mode opératoire

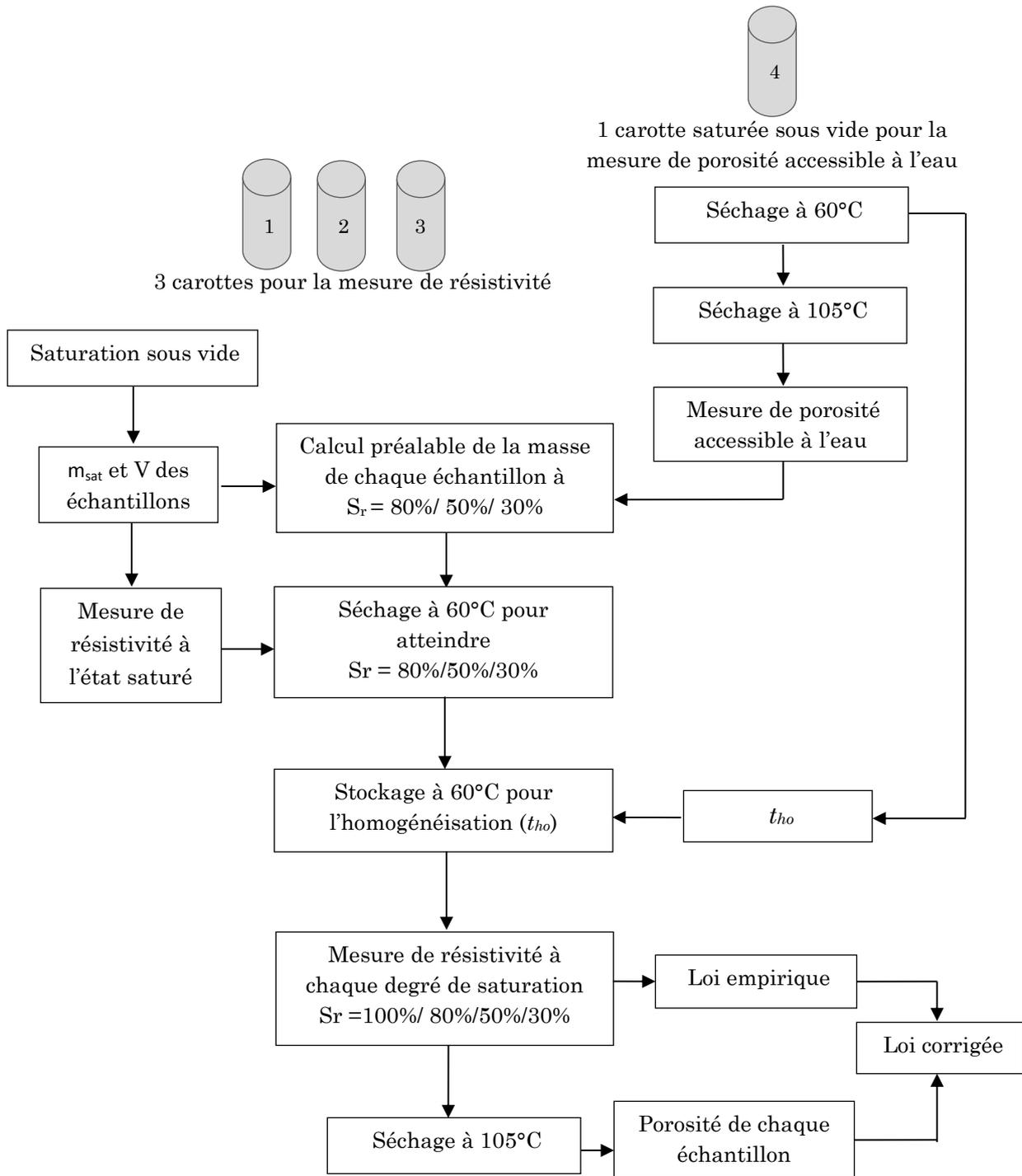
Pour chaque type de béton (non carbonaté et carbonaté) quatre carottes de 7 cm de diamètre et 12 cm de hauteur ont été extraites de la dalle de référence, dont trois sont utilisées pour faire les mesures, la quatrième étant conservée comme « témoin ». Le témoin sert à déterminer la porosité du béton et le temps nécessaire pour l'homogénéisation de la teneur en eau. Cette dernière démarche a pour but d'obtenir un

échantillon homogène de teneur en eau. Pour cela l'échantillon témoin, préalablement saturé sous vide, a été stocké à l'étuve à 60°C jusqu'à ce que sa masse se stabilise. Le temps nécessaire à l'homogénéisation (t_{ho}) est pris égal à la durée du séchage.

Les trois échantillons destinés aux mesures ont été saturés sous vide dans l'eau saturée de chaux. A l'aide de la porosité, préalablement déterminée sur l'échantillon témoin, de la masse des échantillons à l'état saturé (m_{sat}) et de leur volume respectif (V), nous avons calculé la masse de chacun des échantillons pour chaque degré de saturation étudié ($S_r = 80\%$; 50% et 30%).

Afin d'obtenir le degré de saturation visé, les échantillons sont séchés à l'étuve à 60°C jusqu'à ce que leur masse préalablement calculée soit atteinte. Les échantillons sont ensuite emballés dans un film plastique étirable et du papier aluminium adhésif puis passés à l'étape d'homogénéisation ; enfin ils sont sortis et placés dans le laboratoire jusqu'au retour à température ambiante avant de mesurer la résistivité par transmission. A la fin de la campagne, tous les échantillons sont séchés jusqu'à masse constante dans une étuve de 105°C afin de déterminer leur porosité. Cette valeur a été utilisée pour calculer le degré de saturation réel des échantillons, afin d'obtenir la loi empirique de résistivité électrique-teneur en eau pour le béton étudié. Cette loi est une loi en puissance ($y=A.x^n$), conformément à la loi d'Archie.

La **Figure 3. 1** décrit la démarche de cet essai.



Avec t_{ho} : la durée nécessaire de stockage dans l'étuve à 60°C pour homogénéiser la teneur en eau dans l'échantillon, m_{sat} ; V : respectivement la masse et le volume des échantillons à l'état saturé.

Figure 3. 1 : Schéma des mesures sur les échantillons

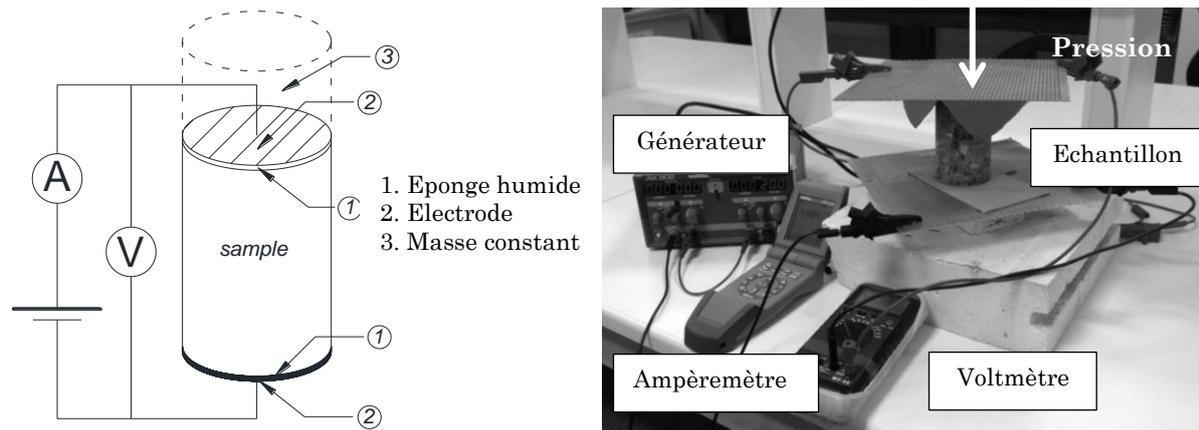


Figure 3. 2: Installation dans le laboratoire

Le courant utilisé dans cet essai est un courant alternatif de basse fréquence. La différence de potentiel de 5V a été appliquée sur l'échantillon et l'intensité du courant a été mesurée. Nous avons testé avec trois fréquences différentes 15Hz, 150Hz et 1500Hz de courant sinusoïdal.

Les résultats ont montré que dans cette gamme de fréquence l'influence de la fréquence est faible pour la mesure de résistivité.

Tableau 3. 1 : Résultats de mesures sur échantillons par application directe de loi d'Ohm

Degré de saturation (%)	Résistivité ($\Omega.m$)			
	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Moyenne
100	44,33	40,34	44,23	42,97
80	45,18	43,17	49,30	45,88
50	295,12	256,47	301,66	284,42
30	1527,40	1677,84	-	1 568,25

Le **Tableau 3. 1** présente les résistivités moyennes mesurées sur trois échantillons pour les quatre degrés de saturation considérés.

Les mesures de porosité des échantillons permettant de corriger la loi empirique sont présentées dans le **Tableau 3. 2 :**

Tableau 3. 2 : Porosité vraie et degré de saturation corrigé des échantillons

	Porosité (%)	Degré de saturation pris pour les mesures (%)	Degré de saturation réel (%)	Résistivité ($\Omega.m$)
Echantillon 1	0,177	80,00	77,21	45,18
		50,00	48,05	295,12
		30,00	28,10	1527,40
Echantillon 2	0,183	80,00	77,70	43,17
		50,00	48,65	256,47
		30,00	28,77	1677,84
Echantillon 3	0,173	80,00	75,05	49,30
		50,00	47,50	301,66
		30,00	26,52	-

Ces résultats permettent de construire une loi empirique de type puissance montrée dans la **Figure 3. 3** et **Figure 3. 4**.

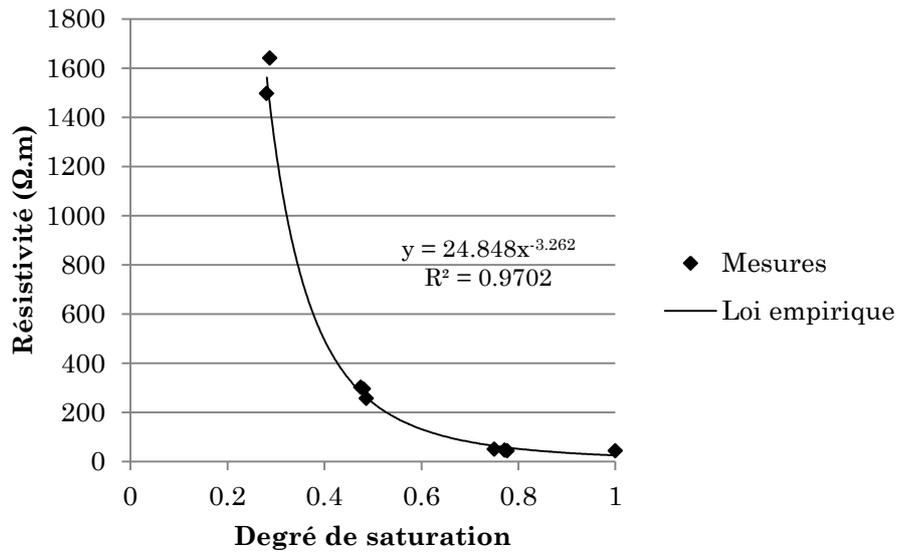


Figure 3. 3: Loi empirique corrigée issue des essais en transmission (béton non carbonaté)

Les **Figure 3. 3** et **Figure 3. 4** montrent respectivement que la résistivité augmente fortement avec la diminution du degré de saturation et la teneur en eau volumique calculée comme le rapport du volume d'eau sur le volume de béton.

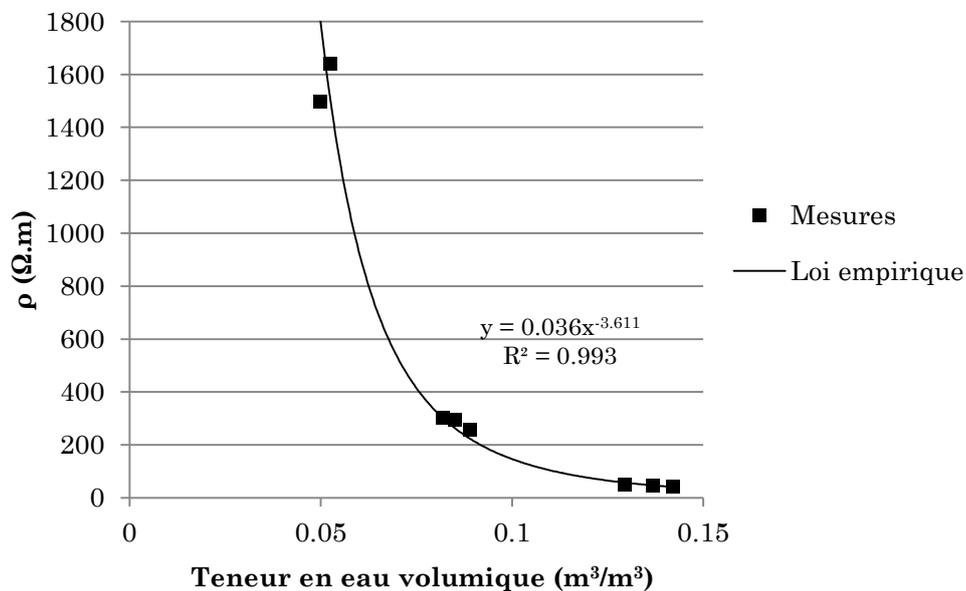


Figure 3. 4 : Loi empirique de résistivité en fonction de la teneur en eau volumique (béton non carbonaté)

Cette loi sera utilisée pour l'analyse numérique présentée dans le Chapitre 4.

3.2.3. Préparation des corps d'épreuve

Au total 6 dalles ont été coulées pour cette campagne de mesure. Trois dalles sont conservées dans une enceinte de carbonatation accélérée jusqu'à l'obtention de la carbonatation totale (dénommées comme « dalles carbonatées » pour la suite), les trois dalles restantes sont conservées dans les conditions normales (dénommées comme « dalles non carbonatées »). Dans chacun des deux groupes il y a une dalle armée, deux dalles non armées dont une est conservée comme témoin. Pour s'assurer que le béton soit bien carbonaté et que l'acier soit bien dans un état passif nous avons retiré de la dalle témoin une carotte sur laquelle après rupture par fendage une pulvérisation de phénolphthaléine a permis de vérifier la carbonatation sur toute l'épaisseur.

La formulation de béton est présentée dans le **Tableau 3. 3**. Toutes les dalles ont été coulées en même temps avec une même gâchée. Un rapport E/C élevé a été choisi pour obtenir un béton poreux.

Tableau 3. 3 : Formulation du béton

Gravier 4/12.5 mm	970 kg/m ³
Sable 0/4 mm	770 kg/m ³
Ciment CEM I 52.5R	280 kg/m ³
Eau	198 kg/m ³
E/C	0,71
Porosité	18,79%

Chaque dalle mesure 50x25x12 cm (**Figure 3. 1**). Quatre barres d'acier ont été introduites dans la dalle armée avec deux épaisseurs d'enrobage différentes de 2 et 4cm

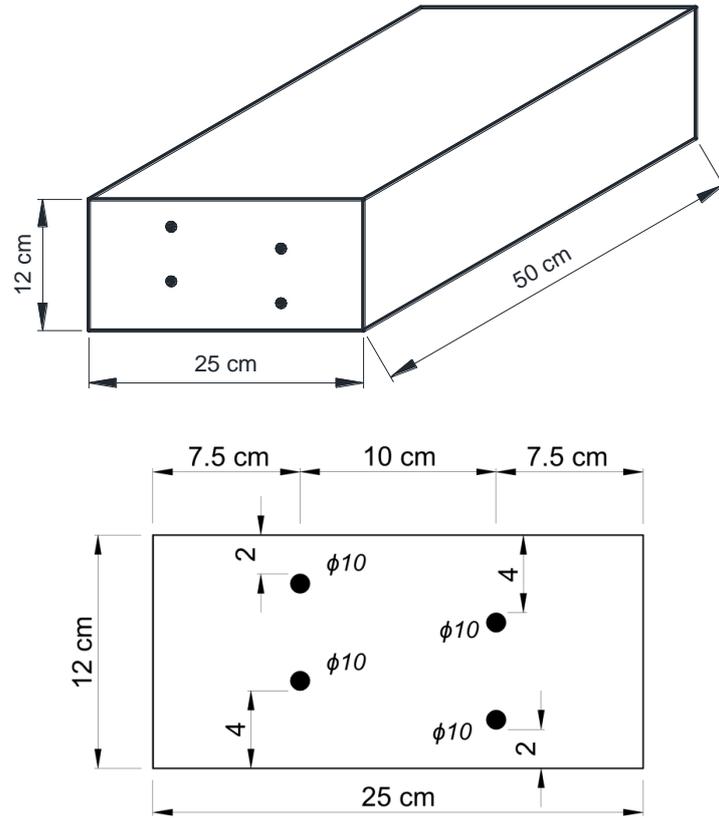


Figure 3. 5: Dalle armée, vue générale et vue de côté



Figure 3. 6 : Les corps d'épreuve fabriqués et conditionnés au-dessus des réservoirs d'eau dans la salle climatisée

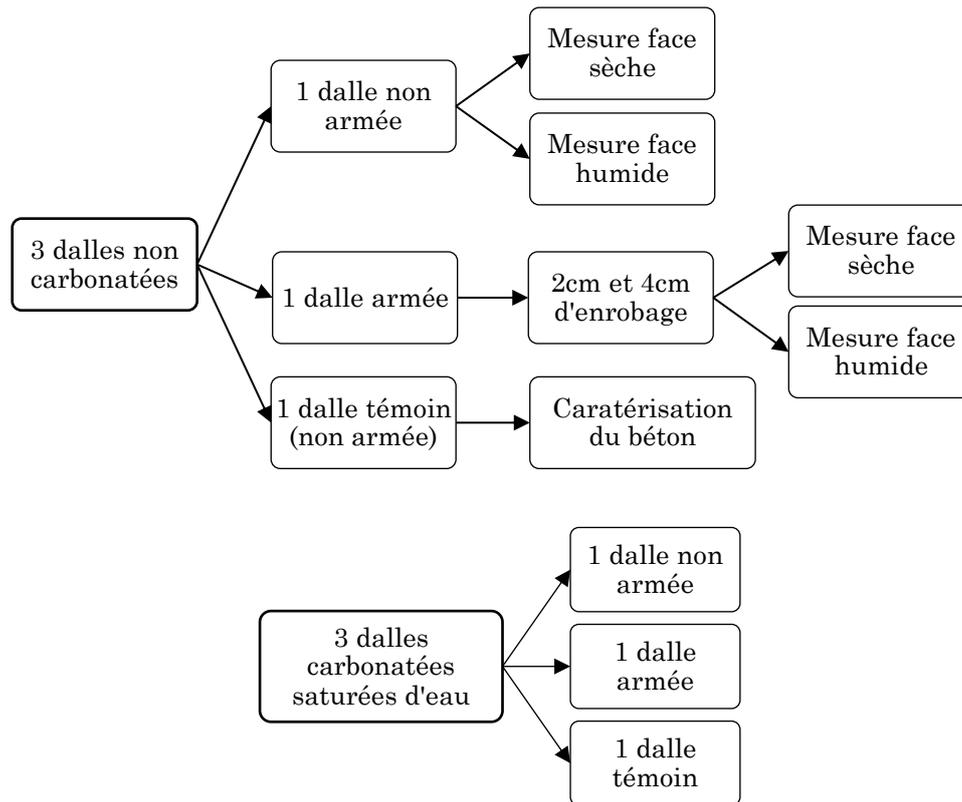


Figure 3. 7: Programme expérimental

Après le coulage, les dalles sont passées en cure dans une salle humide pendant 7 jours consécutifs. Ensuite elles sont immergées dans l'eau saturée de chaux pour atteindre l'état de saturation. Chaque dalle est pesée régulièrement pour contrôler leur état de saturation. La saturation est atteinte quand l'augmentation de masse se stabilise.

Une fois saturée les dalles sont sorties de l'eau et de la résine est appliquée sur les faces latérales. L'objectif est d'empêcher la perte d'eau par ces surfaces et de garantir la création d'un gradient vertical de teneur en eau. Ensuite les dalles sont transférées dans une salle climatisée où la température et l'humidité relative sont contrôlées à 25°C et 55% respectivement. Elles sont posées sur des bacs remplis d'eau mais sans être en contact avec l'eau afin de maintenir la face inférieure en contact avec une humidité relative autour de 100%, tandis que le haut des dalles est en contact avec l'air à 55% d'humidité relative (**Figure 3. 8**).

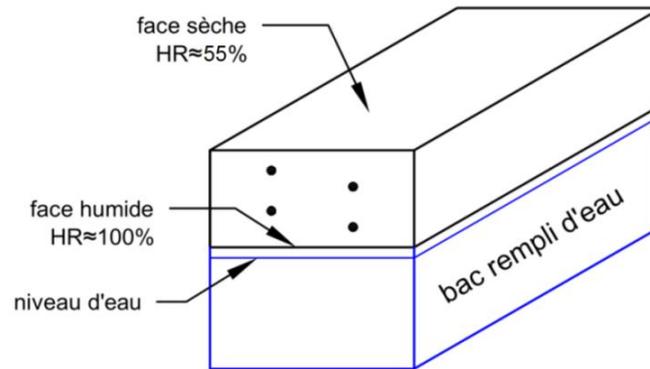


Figure 3. 8: Dispositif expérimental de génération du gradient de teneur en eau vertical permanent

Cette configuration permet de créer une différence de teneur en eau au sein de la structure. Le séchage s'effectuant uniquement par le haut de la dalle et le bas étant continuellement placé au-dessus d'un volume d'eau (sans contact), un gradient est créé graduellement jusqu'à stabilisation, c'est à dire au moment où les échanges d'eau sont en régime permanent et où la masse du corps d'épreuve se stabilise. Cette procédure est contrôlée par la pesée régulière de chaque dalle au moment de la mesure électrique.

Les mesures sont faites régulièrement pendant l'établissement et la stabilisation du gradient de teneur en eau. Un gel conducteur à base d'hydroxyde de potassium (KOH) est utilisé pour assurer le contact entre les électrodes et la surface du corps d'épreuve. Ce gel est une solution saturée de KOH gélifié, très conducteur grâce à sa forte alcalinité sans altérer l'état de surface des structures auscultées, qui reste toujours en surface du matériau. Le potassium a été choisi parce que ses ions (K^+) sont très actifs et mobiles, ce qui rend le produit conducteur. Le gel utilisé, en ne pénétrant pas dans le béton, ne modifie pas, ou que très peu, l'état d'humidité du matériau.

Le gradient de teneur en eau, fixé grâce à mode de conservation, est considéré comme linéaire dans le reste de notre étude. De plus seul le gradient de teneur en eau verticale est étudié, sa variation horizontale est négligée.

Les mesures ont été réalisées directement au-dessus de l'acier sur les dalles armées et à une position similaires sur les dalles non armées de façon d'avoir même effet de bord sur les deux types de structure. (**Figure 3. 9**).

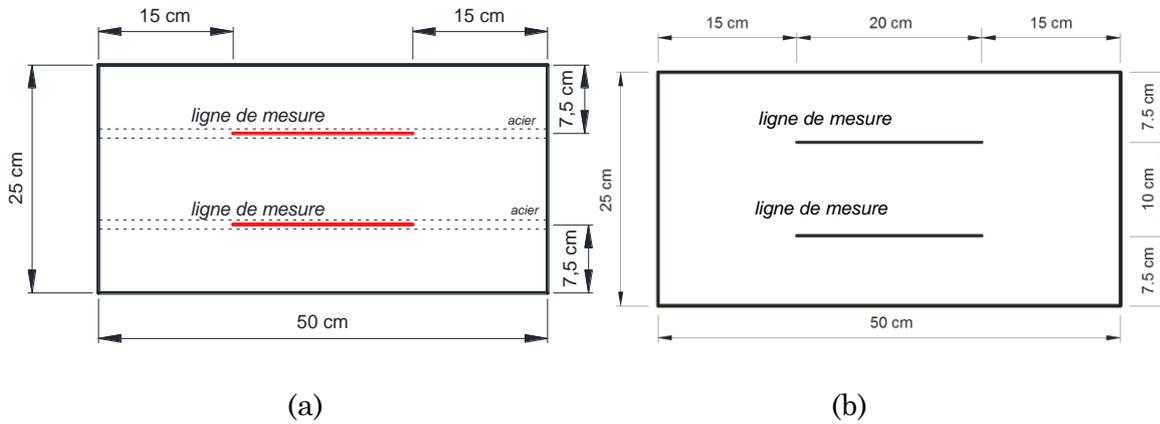
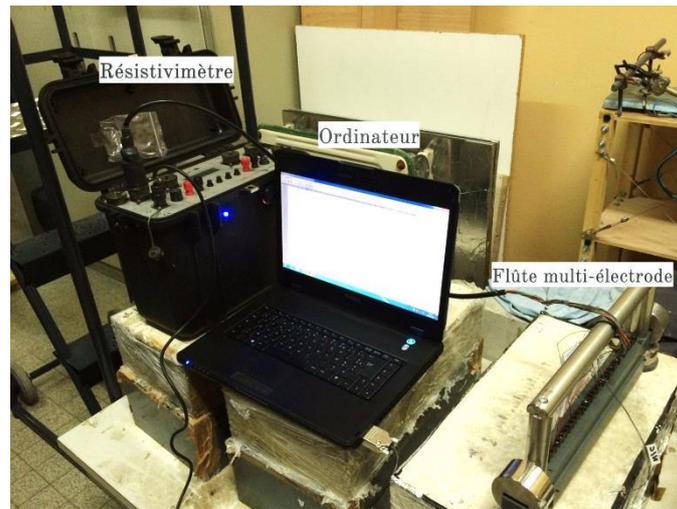


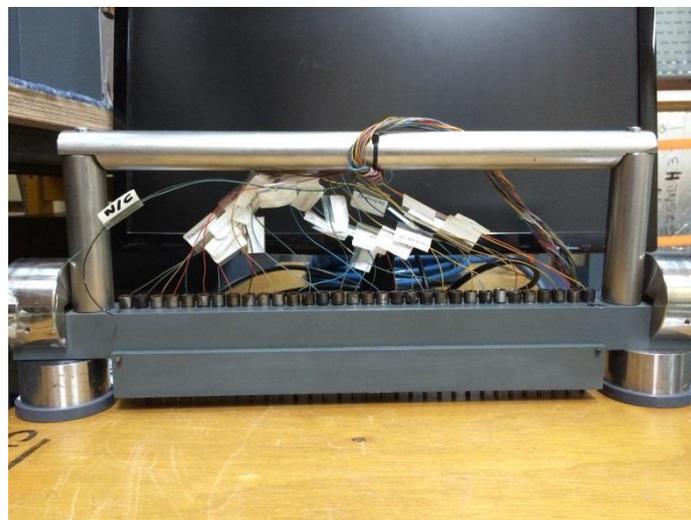
Figure 3. 9 : Position des mesures sur dalle armée (a) et non armée (b)

3.3. Test de répétabilité

Dans l'ensemble des mesures expérimentales ci-dessous le matériel utilisé est un résistivimètre TIGRE d'Allied Associates. L'appareil est connecté à un ordinateur et à une flûte qui se compose de 32 électrodes espacées de 1 cm. La mesure est pilotée à partir de l'ordinateur (**Figure 3. 10**). Pour chaque mesure, seules 4 électrodes utilisées sont activées et le reste est désactivé. Le courant injecté est un courant alternatif de basse fréquence (environ 5Hz), les signaux sont de forme rectangulaire. L'intensité du courant injecté peut varier de 0,5 jusqu'à 200 mA. Nous utilisons dans l'ensemble de nos études le courant de 0,5mA.



(a)



(b)

Figure 3. 10 : Installation des mesures (a) et flûte multi-électrode (b)

L'idée est de réaliser une série de mesures dans les mêmes conditions, sur le même matériau. On a effectué 15 mesures indépendantes à une même position sur la face humide de la dalle non carbonatée, non armée sur plusieurs jours. Pour ce faire nous avons travaillé dans une salle climatisée sur une dalle dont le gradient de teneur en eau était stabilisé. Dans ces conditions il est vraisemblable de considérer que la variation des conditions environnementales et de l'état du matériau est négligeable.

La **Figure 3. 11** présente le coefficient de variation pour chaque point de mesure en fonction de sa distance, r_1 , au point d'injection de courant (électrode C1). Le coefficient est calculé comme le rapport de l'écart-type standard à la moyenne des 15 mesures pour chaque valeur de r_1 (de 0,04 à 0,09 m) selon la formule :

$$c_v = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad (3.1)$$

Avec σ_i et μ_i : écart-type standard et moyenne au point i (correspondant à r_1)

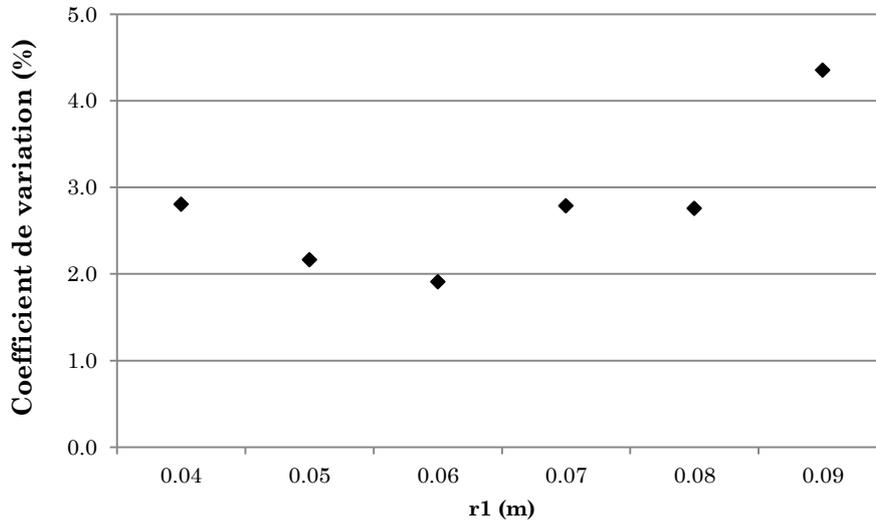


Figure 3. 11: Test de répétabilité

On remarque que la variation est au maximum de 4,4% pour les mesures les plus éloignées de la source du courant ($r_1 = 9$ cm). Cet essai montre que les mesures sur dalles sont répétables avec un coefficient de variation de moins de 5%.

3.4. Résultat de mesures sur dalles en béton / béton armé

Nous présentons dans cette section les résultats de mesures réalisées sur l'ensemble des corps d'épreuve. La présentation est divisée en deux grandes parties : tout d'abord les résultats sur les dalles non carbonatées et ensuite sur les dalles carbonatées. Dans chaque partie nous observons l'évolution de la résistivité de deux types de dalles non armées et armées, sur les deux faces sèche et humide, et nous analysons ensuite l'influence de l'acier sur les mesures de résistivité en surface.

Enfin l'influence de l'état électrochimique de l'acier sur les résultats sera observée et analysée.

3.4.1. Sur les dalles non carbonatées

Dans cette section, l'ensemble des résultats expérimentaux sur les dalles non carbonatées est présenté, du début de la campagne de mesure (l'état saturé d'eau) puis au cours de la création du gradient de teneur en eau, jusqu'à la stabilisation de ce gradient. Deux types de gradients sont caractérisés par la mesure, soit un gradient de séchage soit un gradient d'humidification. Dans le cas du gradient de séchage, la mesure est effectuée sur la face sèche, c'est-à-dire au contact de l'air, dans le cas du gradient d'humidification elle est réalisée sur la face humide, située au-dessus du réservoir d'eau.

3.4.1.1. Résultats sur la dalle non armée

a. Sur la face humide

Les mesures sur la face humide, en contact avec le réservoir d'eau, (**Figure 3. 8**) correspondent au gradient d'humidification. Il s'agit d'un matériau contenant plus d'eau en surface qu'en profondeur.

La **Figure 3. 12** présente l'évolution de la résistivité à différentes échéances sur la face humide de la dalle non armée.

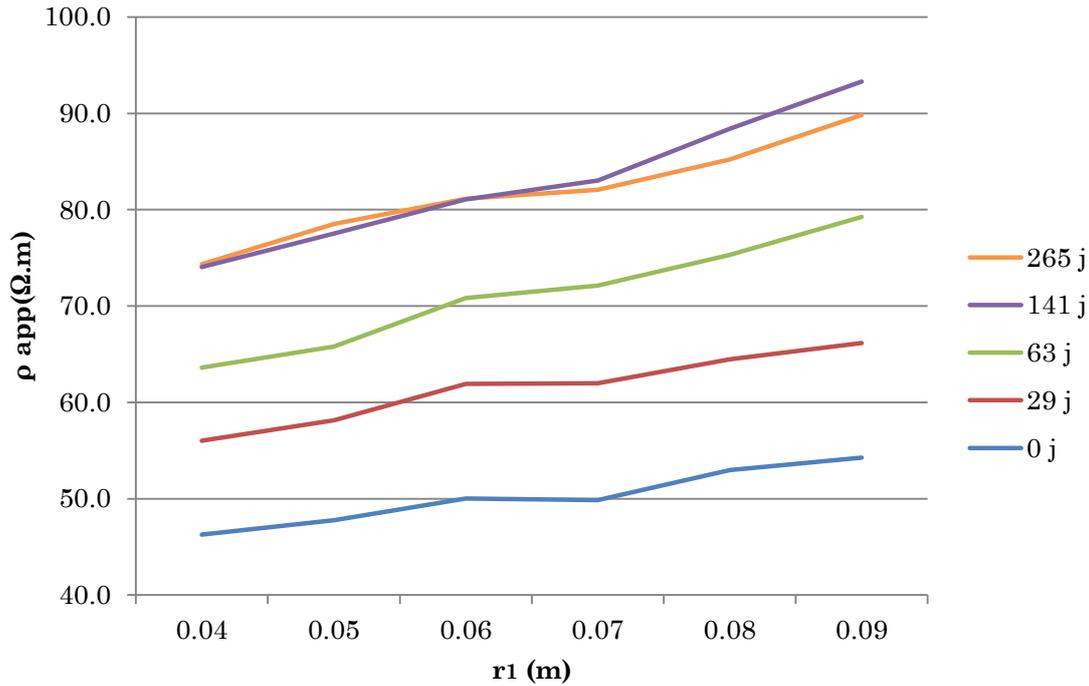


Figure 3. 12: Evolution de la résistivité apparente de la dalle non armée, face humide en fonction de r_1 et pour différentes échéances.

L'augmentation des valeurs de résistivité au cours du temps révèle l'évolution du séchage du béton jusqu'à la stabilisation. L'eau s'évapore par la face au contact de l'air en créant un gradient de teneur en eau entre deux faces de la dalle.

Il est observé aussi que le gradient de teneur en eau se stabilise aux alentours de 150 jours où on remarque que la variation de la résistivité devient moins significative. A 265 jours le gradient de teneur en eau est considéré comme établi et stable, la courbe de résistivité ne bouge plus. Cette remarque est confirmée par la **Figure 3. 13** qui montre que la perte de masse des dalles commence à se stabiliser aux alentours de 150 jours et s'arrête à 265 jours, pour les deux dalles (armée et non armée).

La **Figure 3. 14** montre les mesures de résistivité à $r_1=4$ cm et 9 cm. Elle est en très bonne concordance avec la **Figure 3. 13**, ce qui confirme la relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau du béton.

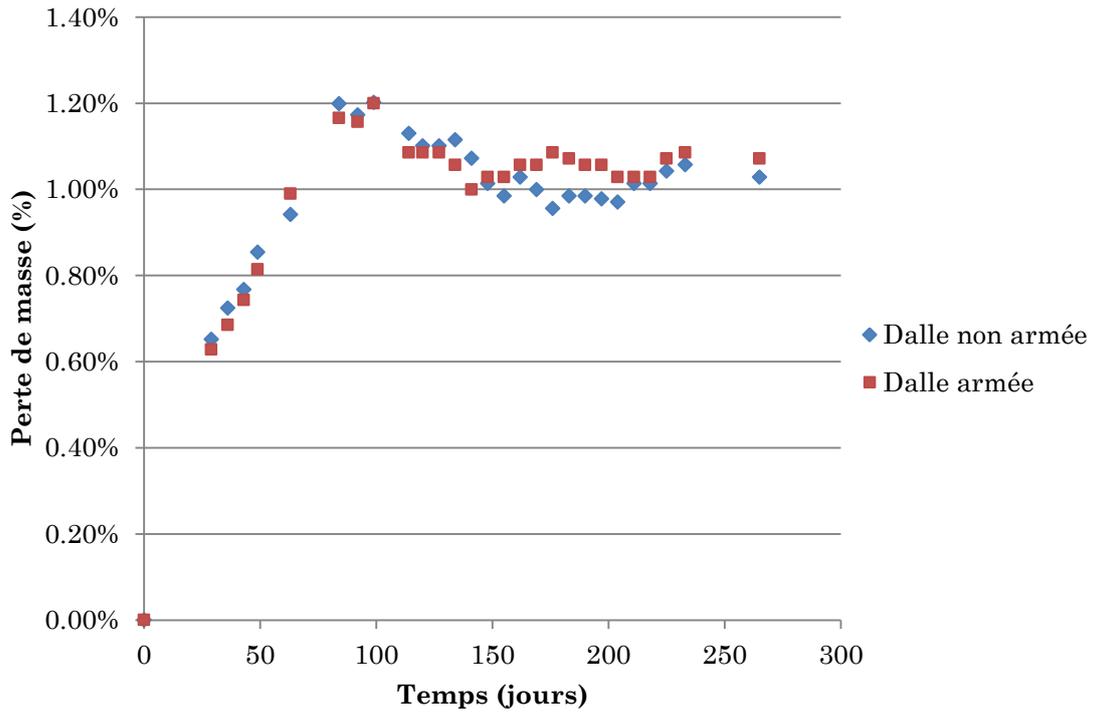


Figure 3. 13: Perte de masse des dalles armée et non armée en fonction du temps

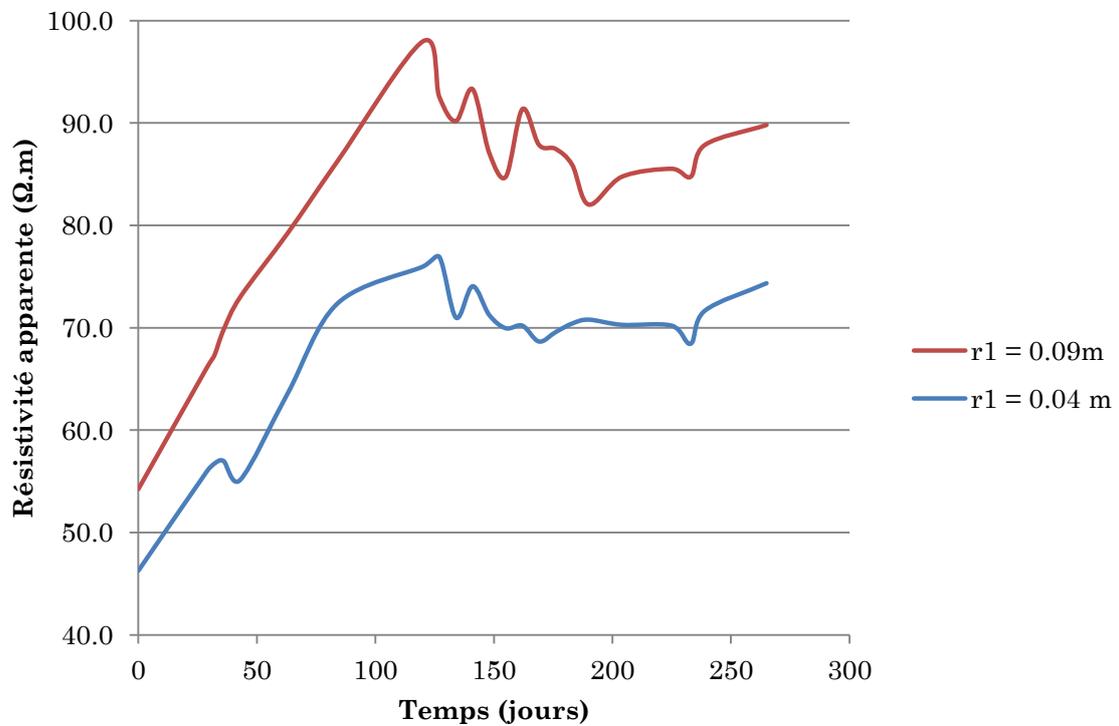


Figure 3. 14: Evolution de résistivité apparente aux différents points de mesure en fonction du temps ($r_1= 4 \text{ cm}$ et $r_1=9 \text{ cm}$)

b. Sur la face sèche

Seuls les résultats de mesures jusqu'au 84^{ème} jour sont disponibles pour cette série ; au-delà le béton était trop sec et donc trop résistif pour que les mesures soient réalisables.

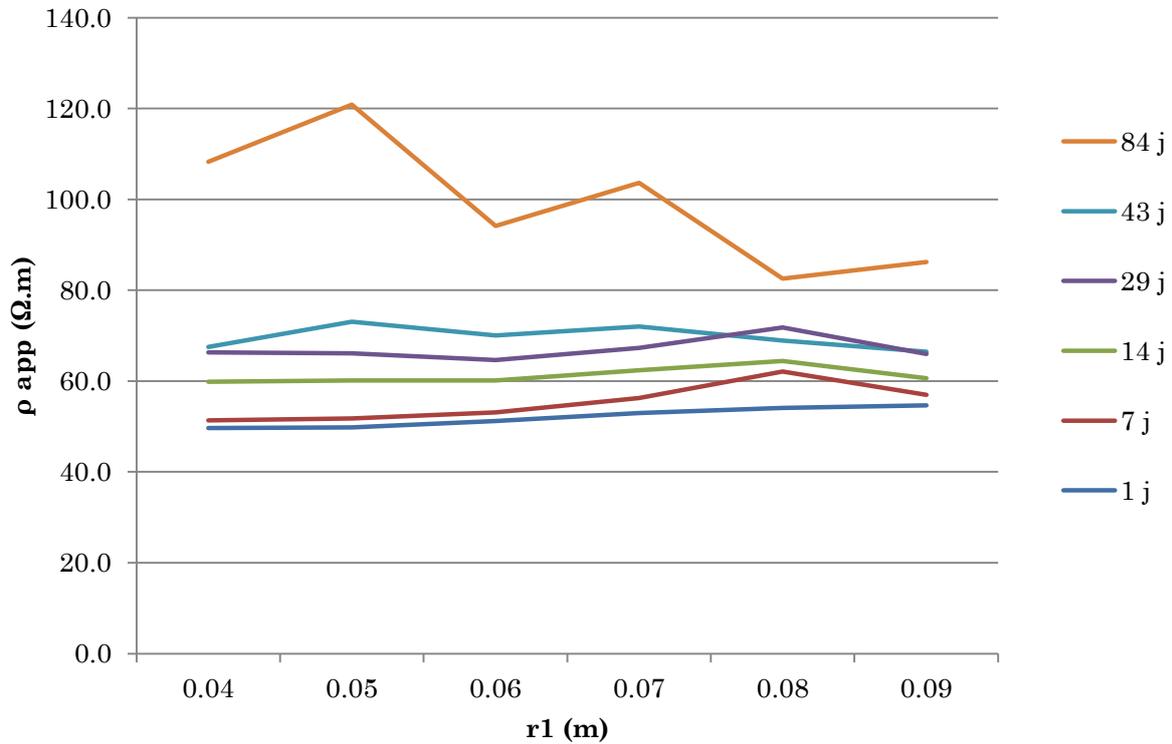


Figure 3. 15: Evolution de la résistivité apparente sur la face sèche de la dalle non armée en fonction du temps.

Tout comme pour les mesures sur la face humide, on observe ici l'effet de perte d'eau du béton. La courbe de résistivité augmente progressivement au fur et à mesure de l'établissement du gradient dans le béton.

3.4.1.2. Résultats sur la dalle armée

Cette section présente, dans un premier temps, l'ensemble des résultats de mesure sur la face humide de la dalle armée et non carbonatée. La plupart des observations faites pour les résultats de mesures sur la face humide sont applicables au cas de la face sèche.

a. Résultat sur la face humide

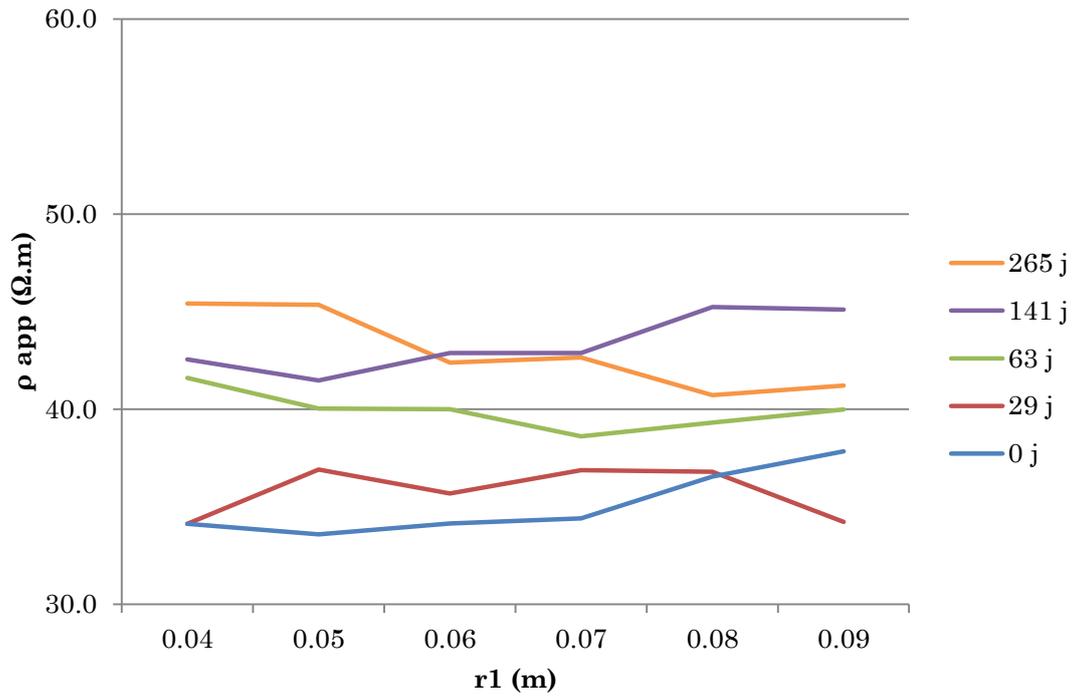


Figure 3. 16: Résultats de mesure au droit de l'acier 2 cm (face humide)

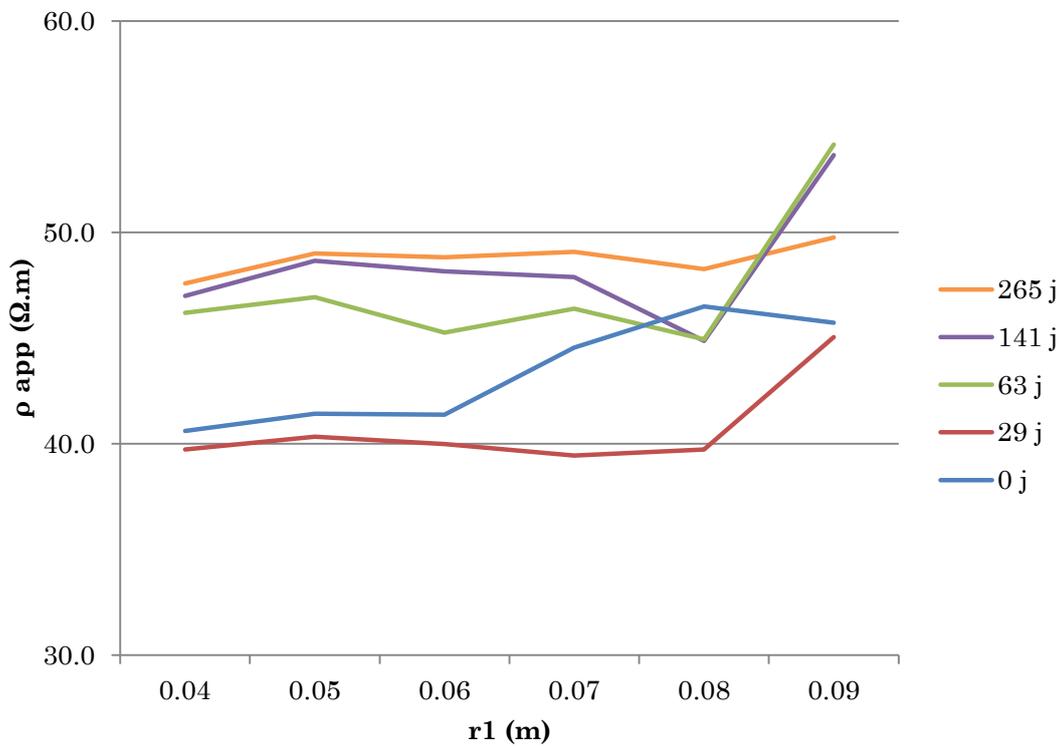


Figure 3. 17: Résultats de mesure au droit de l'acier 4 cm (face humide)

Les **Figure 3. 16** et **Figure 3. 17** montrent les résultats de mesure au droit de l'acier à 2 cm et 4 cm de profondeur respectivement, sur la face humide de la dalle armée. La présence de l'armature semble perturber le classement des courbes : les courbes sont moins bien organisées que dans le cas du béton non armé (**Figure 3. 12**) mais l'établissement du gradient de teneur en eau est toujours observé puisque la résistivité augmente en fonction du temps. On peut remarquer que cette augmentation n'est pas aussi prononcée que dans le cas du béton non armé mais cette différence s'explique bien par l'effet court-circuit dû à la présence de l'acier qui est plus conducteur que le béton. Par exemple la résistivité moyenne de la dalle non armée augmente de 31,67 Ω .m entre 0 et 265 jours (soit 63%) tandis que pour la dalle armée cette augmentation n'est que de 7,85 Ω .m (soit 22%) et 5,39 Ω .m (soit 12%) pour les enrobages de 2 et 4 cm respectivement (on utilisera les dénominations « acier 2 cm » et « acier 4 cm » pour la suite). Ces valeurs indiquent que l'effet de l'acier est encore très grand, même à la fin de la campagne de mesure (où le gradient de teneur en eau est établi) sur la face humide, d'où vient une augmentation légère de la résistivité. Le fait que l'augmentation soit plus grande sur l'acier 2 cm que sur l'acier 4cm peut être expliqué par l'effet de l'enrobage sur le court-circuit. La baisse de résistivité au premier jour est beaucoup plus forte avec l'acier à 2 cm ce qui conduit à un écart plus grand qu'avec l'acier à 4 cm.

Comme pour la dalle non armée, la résistivité commence à se stabiliser après 150 jours de stockage dans la salle conditionnée et le gradient de teneur en eau est établi à 265 jours.

b. Résultat sur la face sèche

Les mêmes observations peuvent être faites pour les mesures sur la face sèche.

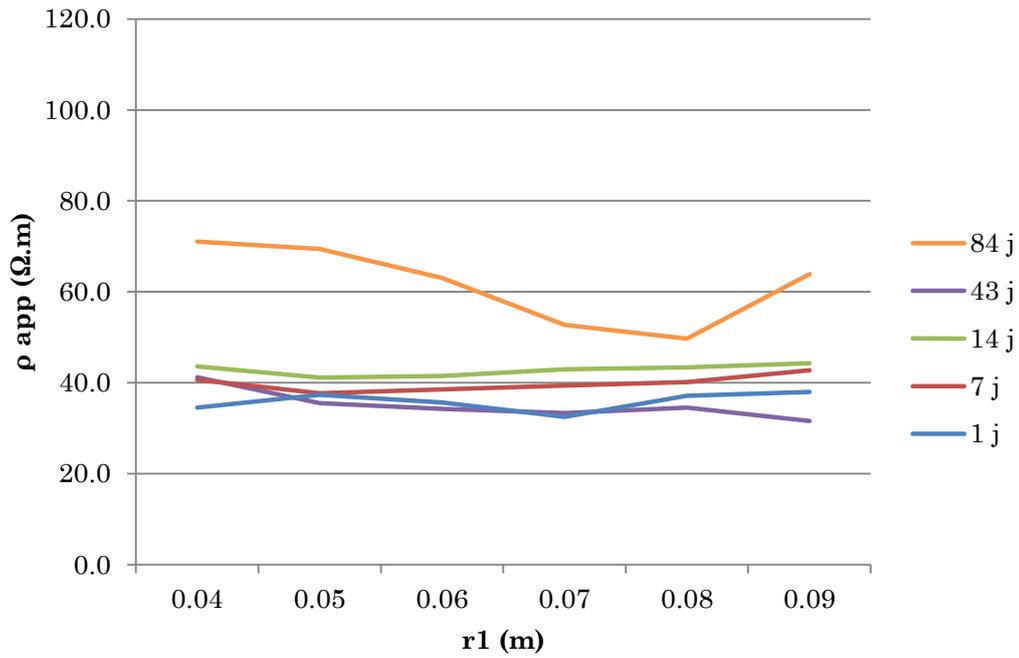


Figure 3. 18: Résistivité mesurées au droit de l'acier 2 cm (face sèche)

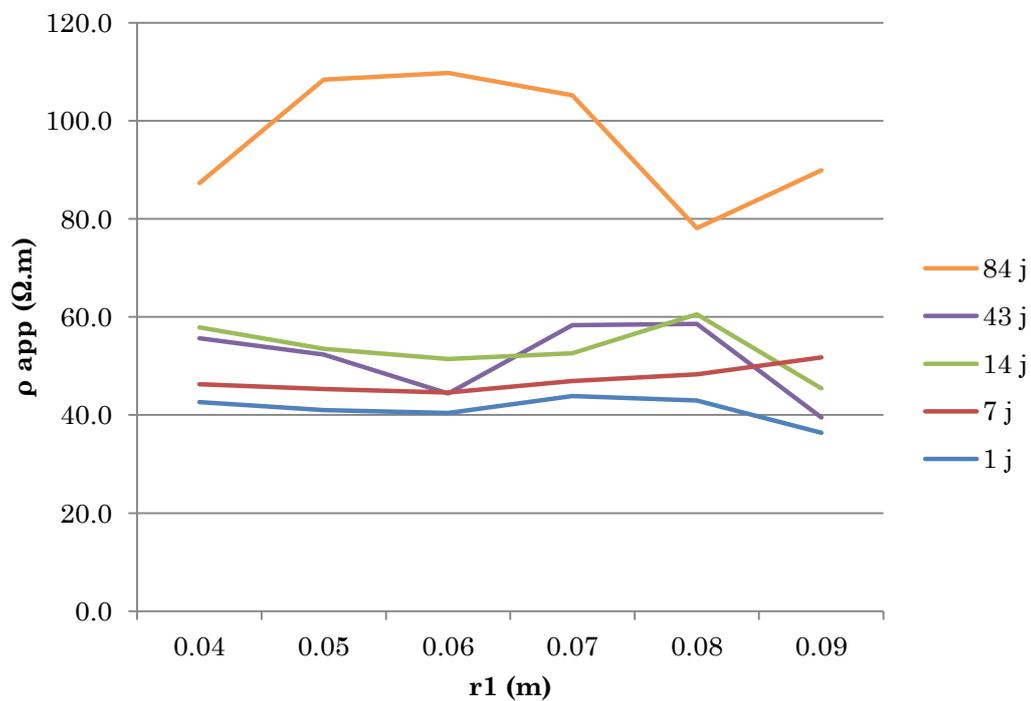


Figure 3. 19: Résultats de mesures au droit de l'acier 4 cm (face sèche)

L'effet du séchage du béton est également observé ici, en plus de l'effet de la présence de l'acier. Au contraire de la face humide, l'augmentation de résistivité due au séchage du

béton de 1 à 84 jours de la dalle non armée est moins significative que celle de la dalle armée. La résistivité moyenne de la dalle non armée augmente de 38,19 $\Omega.m$ (soit 63%) alors que sur la dalle armée cette valeur est de 30,67 $\Omega.m$ (soit 99%) sur l'acier 2 cm et de 57,31 $\Omega.m$ (soit 146%) sur l'acier 4 cm. En effet, l'effet de court-circuit est sensiblement identique pour les deux enrobages à 1 jour, la résistivité mesurée étant de l'ordre de 40 $\Omega.m$ dans les deux cas. En revanche, à 84 jours, l'effet de court-circuit devient quasiment inexistant pour l'enrobage de 4 cm contrairement à l'enrobage de 2 cm où un court-circuit résiduel doit exister (comme le montrera la **Figure 3. 21**). L'augmentation de résistivité obtenue est donc plus importante pour l'enrobage de 4 cm que pour de 2 cm.

Globalement sur la dalle armée, l'effet du séchage du béton sur la résistivité est plus fort sur la face sèche que sur la face humide. Cette remarque indique que l'effet de l'acier est plus prononcé sur un béton sec que sur un béton humide tant qu'il est suffisamment humide toutefois pour que l'échange des charges soit possible. En effet, si le béton est trop sec, il n'y a plus d'échange de charges électriques entre l'acier et béton et donc l'effet de l'acier n'est plus observable.

3.4.1.3. Effet de court-circuit sur la dalle armée

On analyse dans cette section l'influence de la présence de l'armature sur les mesures de résistivité en comparant les résistivités obtenues sur la dalle armée et non armée et sur les deux faces.

a. Sur la face humide

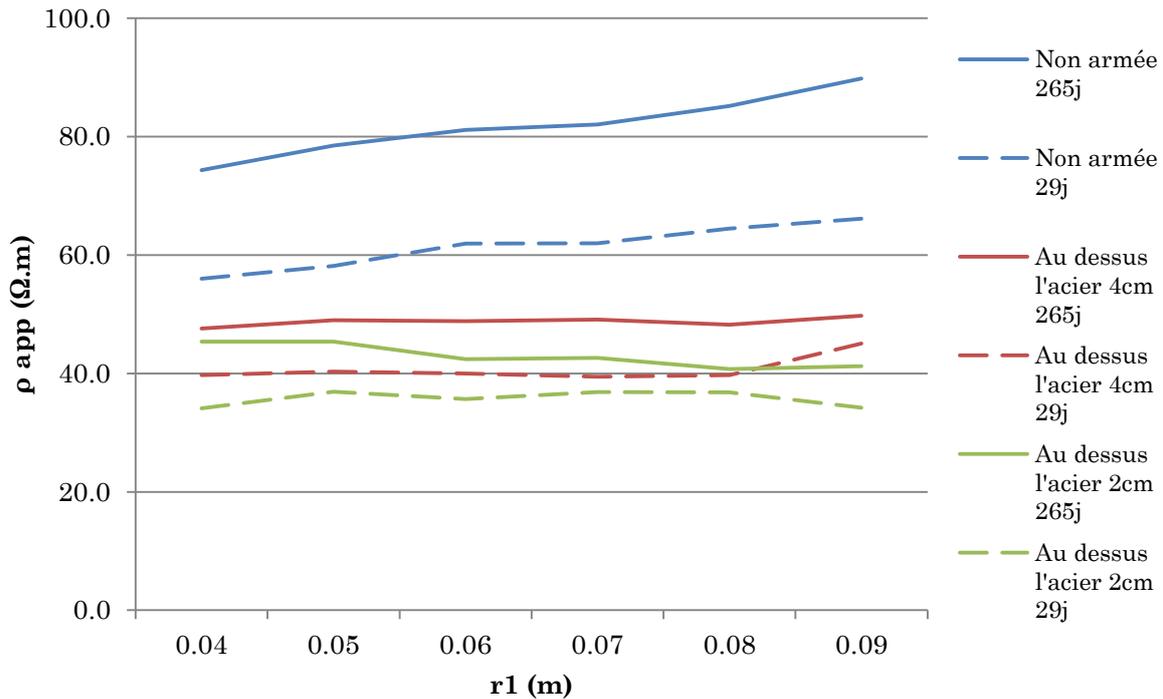


Figure 3. 20: Illustration de l'effet de court-circuit sur la face humide de la dalle armée, non carbonatée, à 29 et 265 jours

La **Figure 3. 20** montre l'influence de l'armature sur les résultats de résistivité sur les dalles non armée et armée à 29 et 265 jours. Une chute de résistivité est observée avec la présence de l'acier. Les courbes de résistivité de l'acier 2 cm et 4 cm se trouvent toujours au-dessous de celle de la dalle non armée. La forme des courbes est également modifiée : les courbes de la dalle non armée sont croissantes en fonction de r_1 (cf. **Figure 3. 15**) tandis qu'elles restent presque plates pour la dalle armée. La présence de l'acier peut ainsi conduire à une mauvaise interprétation des résultats.

La chute de résistivité est également plus importante à 265 jours qu'à 29 jours. Puisque le béton est devenu plus sec et par conséquent électriquement plus résistif dans le temps, la barre d'acier est devenue un chemin privilégié pour la circulation du courant électrique.

Les valeurs de résistivité sont toujours légèrement plus élevées pour l'acier 4 cm que pour celui à 2 cm car le courant doit traverser un volume de béton plus important pour atteindre l'armature. L'influence de l'acier sur la mesure de résistivité est donc moins significative pour l'acier 4 cm.

Cette chute de résistivité peut être expliquée par l'effet de court-circuit. Le béton est un matériau relativement résistif tandis que l'acier est électriquement conducteur. La résistivité de l'acier étant de l'ordre $10^{-6} \Omega.m$ [Reichling et al., 2014], largement inférieure à celle du béton, les armatures d'acier « attirent » alors le courant électrique.

Ce phénomène a été également rapporté dans les travaux de thèse de Lataste [Lataste, 2002]. En faisant des mesures de résistivité avec un quadripôle carré et en injectant le courant parallèlement et perpendiculairement aux armatures d'acier, Lataste a constaté que les lignes de courant sont « canalisées » par les barres d'acier.

b. Résultats sur la face sèche

Dans cette section les résultats sont présentés jusqu'à 84 jours. Au-delà de cette échéance, les mesures deviennent impossibles parce que le béton est trop sec, donc trop résistif, pour que le courant électrique passe dans le matériau.

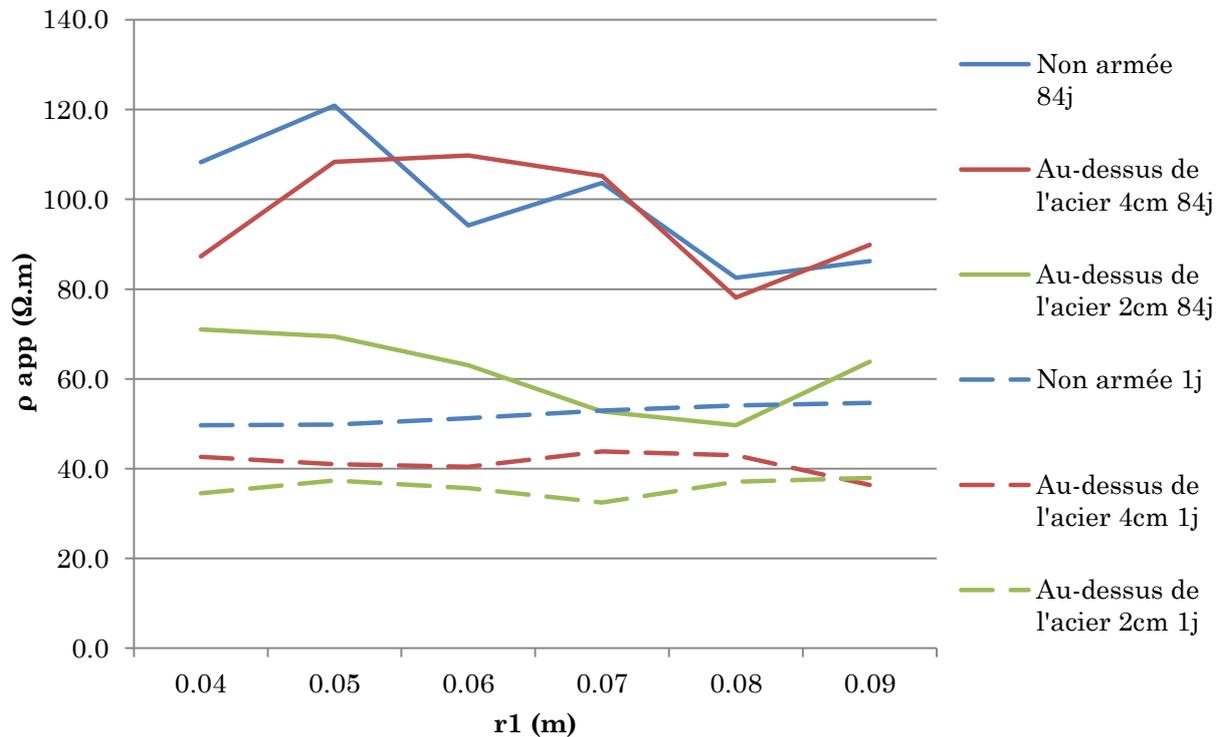


Figure 3. 21: Effet de court-circuit sur la face sèche à différentes échéances

La **Figure 3. 21** met en évidence l'effet de court-circuit de la dalle armée à 1 jour et à 84 jours. Une grande diminution de résistivité à cause de la présence de l'armature a été observée. Cet effet est également plus remarquable pour l'enrobage de 2 cm que pour celui de 4 cm. Le séchage du béton est clairement observé puisque la courbe de résistivité augmente avec le temps.

A 84 jours il n'y a pas eu de chute significative de résistivité pour l'acier à 4 cm. Cela peut être expliqué par une teneur en eau plus faible du béton en surface qui gêne l'injection du courant au béton (augmentation de la résistance du contact). En plus la quantité d'eau est trop faible pour que l'échange des charges électriques sur l'interface de

l'acier se produise. L'effet de court-circuit est donc moins visible voire invisible dans ce cas.

c. Comparaison face sèche – face humide

Le **Tableau 3. 4** présente la chute de résistivité par comparaison des valeurs moyennes de tous les points mesurés dans tous les cas étudiés. Le pourcentage de la chute a été calculé comme le rapport de la résistivité mesurée au droit de l'acier à celle mesurée sur le béton sans acier.

$$\text{Chute de résistivité} = \left(1 - \frac{\text{Moyenne des mesures au droit de l'acier}}{\text{Moyenne des mesures sur dalle non armée}} \right) \cdot 100\% \quad (3. 2)$$

Tableau 3. 4 : Chute de résistivité pour chaque cas de mesure

	Echéance	Acier 2cm	Acier 4cm
Face sèche	Jour 1	16,23 Ω .m (31,00%)	10,85 Ω .m (20,83%)
	Jour 84	37,65 Ω .m (37,92%)	2,85 Ω .m (2,87%)
Face humide	Jour 29	25,73 Ω .m (41,87%)	20,73 Ω .m (33,74%)
	Jour 265	38,90 Ω .m (47,53%)	33,10 Ω .m (40,44%)

Ce tableau montre que la chute de résistivité est plus significative sur la face humide que sur la face sèche. En effet, sur la face humide, la conduction de courant est globalement plus facile que sur la face sèche, ce qui engendre un effet de court-circuit plus fort et une chute de résistivité plus importante. Si le béton est trop sec, et donc électriquement très résistif, les réactions électrochimiques ne peuvent pas se produire et l'effet de court-circuit devient très faible. L'épaisseur d'enrobage joue aussi un rôle important : plus l'acier se trouve près de la surface plus l'effet de court-circuit est significatif.

3.4.2. Effet de l'état électrochimique de l'acier sur les mesures de résistivité

Dans cette section nous présentons l'effet de court-circuit sur la dalle armée, non carbonatée (NC) et carbonatée (C) (correspondant à un acier dans un état de corrosion passif et actif respectivement). La comparaison des résultats dans les deux cas permet de souligner l'influence de l'état électrochimique de l'acier sur les mesures de résistivité.

Les résultats de mesure au jour 1 ont été choisis pour éviter l'effet du gradient de teneur en eau. Le béton n'ayant pas encore subi de dessiccation, on peut le supposer quasiment saturé de façon homogène, donc, dans ce cas l'effet de court-circuit est majoritairement observé.

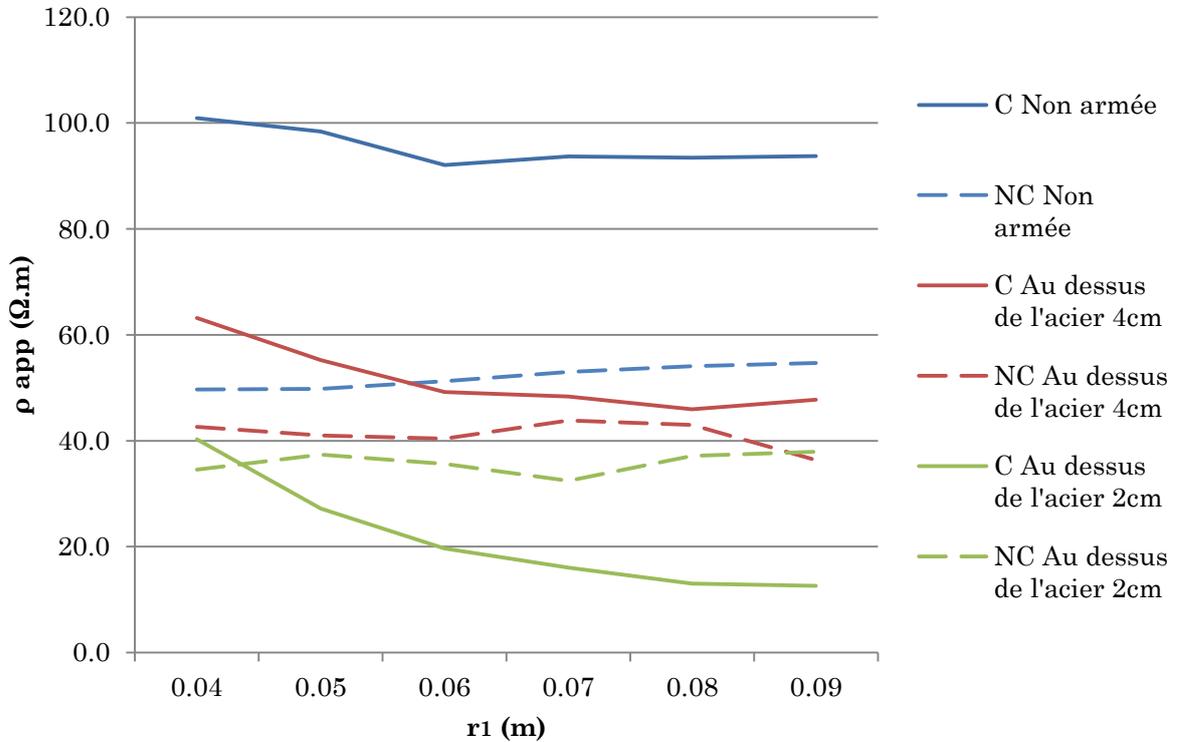


Figure 3. 22: Effet de court-circuit sur dalle armée, non carbonatée (ligne continue) et carbonatée (ligne pointillée)

Tableau 3. 5 : Chute de la résistivité moyenne à 1 jour pour l'acier passif et actif

	Acier passif (dalle Non Carbonatée)	Acier actif (dalle Carbonaté)
2cm	16,23 Ω.m (31,00%)	73,90 Ω.m (77,48%)
4cm	10,85 Ω.m (20,83%)	43,77 Ω.m (45,89%)

La Figure 3. 22 et le Tableau 3. 5 présentent l'ensemble des résultats sur les dalles à 1 jour ainsi que la chute de résistivité liée à l'effet de court-circuit sur les aciers passifs et actifs.

La résistivité du béton non armé carbonaté est plus élevée que celle du béton non armé carbonatée, ce qui indique que le volume d'eau dans la dalle carbonatée est moins

important. Ceci est dû au fait que la porosité du béton est diminuée car les volumes molaires des produits de la réaction de carbonatation sont supérieurs à ceux des hydrates qui les forment.

Pour l'acier 2 cm, la courbe de la dalle carbonatée se trouve au-dessous de celle de la dalle non carbonatée. Sa forme est aussi différente : celle de la dalle carbonatée montre une chute significative lorsque r_1 augmente tandis que celle de la dalle non carbonatée est plus ou moins plate. Cela signifie que l'effet de court-circuit sur l'acier 2 cm est plus fort sur le béton carbonaté que sur le béton non carbonaté.

Pour l'acier 4 cm, le contraire est observé sur la courbe, pourtant la chute de résistivité reste plus forte, 46% contre 21%, on peut donc conclure que l'effet de court-circuit est plus fort sur le béton carbonaté que sur le béton non carbonaté. Par contre que ce soit sur béton carbonaté ou non carbonaté, l'effet de court-circuit est plus marqué lorsque l'enrobage est faible.

On observe que la chute de la valeur de résistivité calculée selon la formule **(3. 2)** est plus importante sur l'acier actif que sur l'acier passif (sur l'acier 2 cm, 77,48% pour l'acier actif contre 31% pour l'acier passif, et sur l'acier 4 cm, 45,89% et 20,83% respectivement). Ainsi l'état passif ou actif de l'acier influence fortement les résultats de mesure de résistivité. En fait, dans les conditions normales l'acier dans le béton est protégé par un film passif. Pour l'acier actif, ce film passif est détruit, favorisant la polarisation de l'acier sous l'effet d'un courant externe. Ce phénomène est lié à une résistance de polarisation R_p de l'acier lorsqu'un courant lui est appliqué. Pour l'acier actif, la résistance de polarisation R_p est plus faible que pour l'acier passif. Par conséquent le transfert de charge électrique à l'interface acier-béton est plus facile sur l'acier actif, et fait donc baisser la résistivité apparente mesurée.

3.5. Conclusion

Le processus de mesure proposé a montré son intérêt dans la recherche du gradient de teneur en eau du béton par la mesure de résistivité. Sur les structures en béton armé, la présence de l'armature perturbe les mesures de résistivité par sa conductivité infiniment plus élevée que celle du béton. Cet effet s'appelle l'effet court-circuit. Il peut être un moyen pour s'affranchir des effets de bord inévitables sur échantillons de laboratoire mais également sur structures réelles. Les analyses expérimentales et numériques sur les dalles ont confirmé la perturbation causée par les armatures. Ces effets de bord et les aciers sont inévitables sur les structures en béton armé ; il est nécessaire de les prendre en compte.

L'état passif ou actif de l'acier a également un impact sur la mesure de résistivité apparente des structures en béton armé. On observe une chute nette de résistivité sur

les mesures au droit de l'acier actif par rapport à l'acier passif, compte tenu d'une plus faible résistance de polarisation. Cette observation ouvre une possibilité d'exploiter les mesures de résistivité au droit de l'acier afin de déterminer son état de corrosion.

De plus, nous nous intéressons dans ces travaux de thèse à caractériser la teneur en eau et son gradient à l'intérieur du béton d'enrobage, pour contribuer à caractériser la corrosion des armatures d'acier. Les courants étant « confinés » dans l'épaisseur du béton d'enrobage ils porteront davantage d'informations sur le matériau que dans le cas où ils sont libres de circuler dans un volume plus important et moins concentré dans l'enrobage.

CHAPITRE 4

ANALYSE NUMERIQUE

Résumé

Les résultats obtenus dans les campagnes expérimentales sont les données d'entrée des études numériques conduites pour retrouver les résistivités réelles du béton ainsi que les paramètres électrochimiques de l'acier. Deux modèles ont été créés correspondant aux deux dalles considérées dans la procédure expérimentale : une dalle armée et une dalle non armée. Les réactions électrochimiques à l'interface béton-acier sont modélisées par l'équation Butler-Volmer. Pour la série non carbonatée, deux résultats de mesure à 43 et à 265 jours ont été considérés dans les analyses numériques correspondant respectivement à deux états d'établissement du gradient de teneur en eau : un gradient en phase de stabilisation et un gradient établi. Le béton homogène saturé en eau a également été considéré. La loi empirique précédemment déterminée, qui décrit la relation entre la teneur en eau et la résistivité électrique, a été utilisée pour simuler le gradient de teneur en eau dans les mesures à 265 jours. Pour la série carbonatée, la simulation des mesures est réalisée avec l'état saturé.

La procédure numérique commence avec le modèle non armé afin de déterminer le profil de résistivité. Ce dernier est ensuite utilisé pour le modèle du béton armé. Le résultat de la mesure au droit de l'acier à 2 cm permet de déterminer les paramètres électrochimiques de l'acier, puis l'ensemble des paramètres (résistivité du béton et caractéristiques de l'acier) est vérifié avec le résultat sur l'acier à 4 cm.

Les résultats de simulation montrent l'intérêt de la méthodologie pour la recherche du gradient de résistivité, avec un écart inférieur à 10% par rapport aux résultats de mesure dans la plupart des cas étudiés. La simulation a montré que la mesure de résistivité nous permet de remonter au gradient de résistivité et de définir les paramètres électrochimiques de l'acier via le modèle de Butler-Volmer. Elle indique aussi que si le béton est bien caractérisé, il est possible de retrouver également le gradient de teneur en eau du matériau.

En outre, une étude sur l'influence du maillage d'acier a été réalisée dans le but de déterminer la zone à modéliser pour un béton armé d'un treillis d'acier.

4.1. Introduction

Les simulations sont réalisées avec le logiciel commercial COMSOL Multiphysics ® fondé sur la méthode des éléments finis.

Ces travaux d'analyse numériques ont pour objectif d'inverser les résultats expérimentaux afin de retrouver la résistivité, ou le gradient de résistivité, du béton et les paramètres électrochimiques de l'acier. Les analyses numériques se poursuivent dans un second temps avec la simulation des mesures sur les dalles présentées au Chapitre 3. Trois états d'humidité des dalles sont pris en compte pour notre travail : l'état saturé d'eau, l'état intermédiaire où le gradient de teneur en eau est en train de s'établir et l'état final où il est établi. Les simulations sont effectuées avec deux modèles : sans et avec armatures, sur les deux types de gradient examinés, humidification et séchage.

Une autre simulation est réalisée sur un modèle de grande taille afin d'évaluer les effets des treillis d'armatures sur les résultats de mesure. Cela permet de déterminer le volume minimal à modéliser pour être capable d'inverser les mesures et de remonter à tous les paramètres.

4.2. Equations constitutives du modèle numérique

La simulation numérique a été menée en utilisant le module AC/DC intégré dans le logiciel COMSOL Multiphysics ® basé sur la méthode des éléments finis. L'équation qui gouverne le phénomène électrique est la loi d'Ohm locale qui exprime la densité de courant j [A/m²] en fonction du gradient de potentiel ΔE [V/m]. Les deux équations qui abordent les problématiques d'entrée sont respectivement la loi d'Ohm locale (4. 1) et la conservation de la charge (4. 2) :

$$j = -\frac{1}{\rho} \Delta E + j_e \quad (4. 1)$$

$$\Delta j = Q_j \quad (4. 2)$$

Avec j_e : densité du courant appliqué à l'extérieur [A/m²]. Q_j : source du courant [A]

4.3. Modèle de Butler-Volmer

4.3.1. Système électrochimique de la corrosion

La corrosion de l'acier dans le béton est décrite par les réactions Rédox qui traduisent le transfert de charges à l'interface acier-béton. L'acier et l'électrolyte dans le béton forment une pile électrochimique. Sur la surface de l'acier deux réactions d'oxydoréduction couplées ont lieu :

A l'anode : l'oxydation du fer à partir de l'état métallique en libérant des électrons



A la cathode : la réduction de l'oxygène par consommation d'électrons fournis par l'anode :

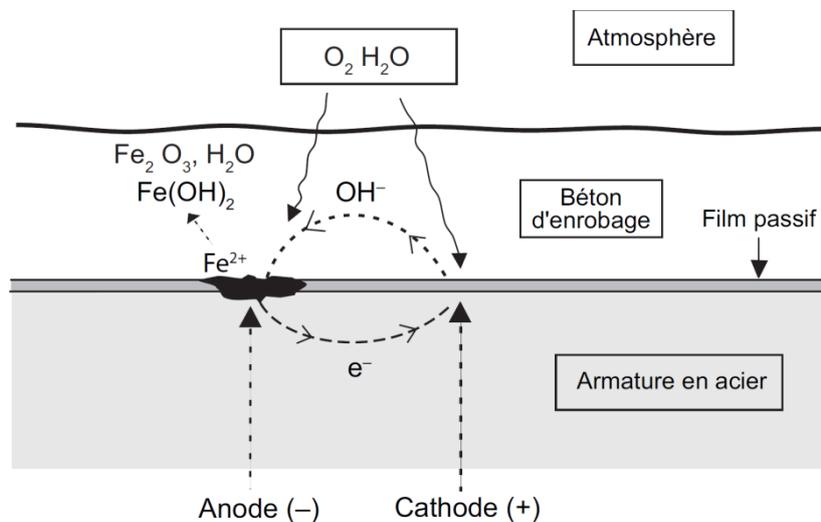


Figure 4. 1 : Système électrochimique de corrosion de l'acier
[Breysse et al., 2005]

Lorsque l'acier est plongé dans une solution contenant les ions de fer Fe^{2+} (ici la phase aqueuse du béton) il est soumis à la réaction d'équilibre (4. 3). A l'état équilibre, le taux d'oxydation est égal au taux de réduction. Il n'y a donc pas de perte de masse métallique. Il s'agit d'une électrode réversible. Il existe un potentiel réversible E_{rev} de l'électrode à cet état équilibre.

Lorsqu'il y a un couplage entre deux électrodes réversibles ou que du courant est apporté au système, l'équilibre se rompt. On parle alors de la polarisation d'électrode. Il y a deux types de polarisation : la polarisation cathodique qui va forcer la réaction de réduction et la polarisation anodique qui, dans notre cas, va se traduire par l'oxydation de l'acier. La courbe de polarisation de l'électrode réversible est définie par la relation entre les variables E et j du système.

La vitesse des réactions électrochimiques est reliée au courant j et une réaction ne peut se produire que dans un domaine de potentiel. On peut donc relier le courant (paramètre cinétique) et le potentiel (paramètre thermodynamique).

La réponse d'une électrode réversible $j(E)$ est modélisée par l'équation de Butler-Volmer (BV) qui relie la densité de courant net apparent (j) au potentiel E de l'électrode.

$$j = j_0 \left[\exp\left(\ln(10) \frac{E - E_{rev}}{\beta_a}\right) - \exp\left(-\ln(10) \frac{E - E_{rev}}{\beta_c}\right) \right] \quad (4.5)$$

Où

- E_{rev} : potentiel réversible de l'électrode [V]
- j_0 est la densité de courant d'échange de l'électrode [A/m^2] (paramètre cinétique),
- β_a et β_c sont respectivement les coefficients de Tafel anodique et cathodique de l'électrode [V/decade]

4.3.2. La corrosion uniforme

La corrosion uniforme est définie comme le couplage électrique de deux électrodes réversibles infiniment proches. Chaque électron produit à l'anode est consommé à la cathode. La chute ohmique entre l'anode et la cathode due à la résistance de l'électrolyte est négligeable, le potentiel d'équilibre du système couplé est uniforme et il n'y a pas de courant circulant dans le béton [Sohail et al., 2015].

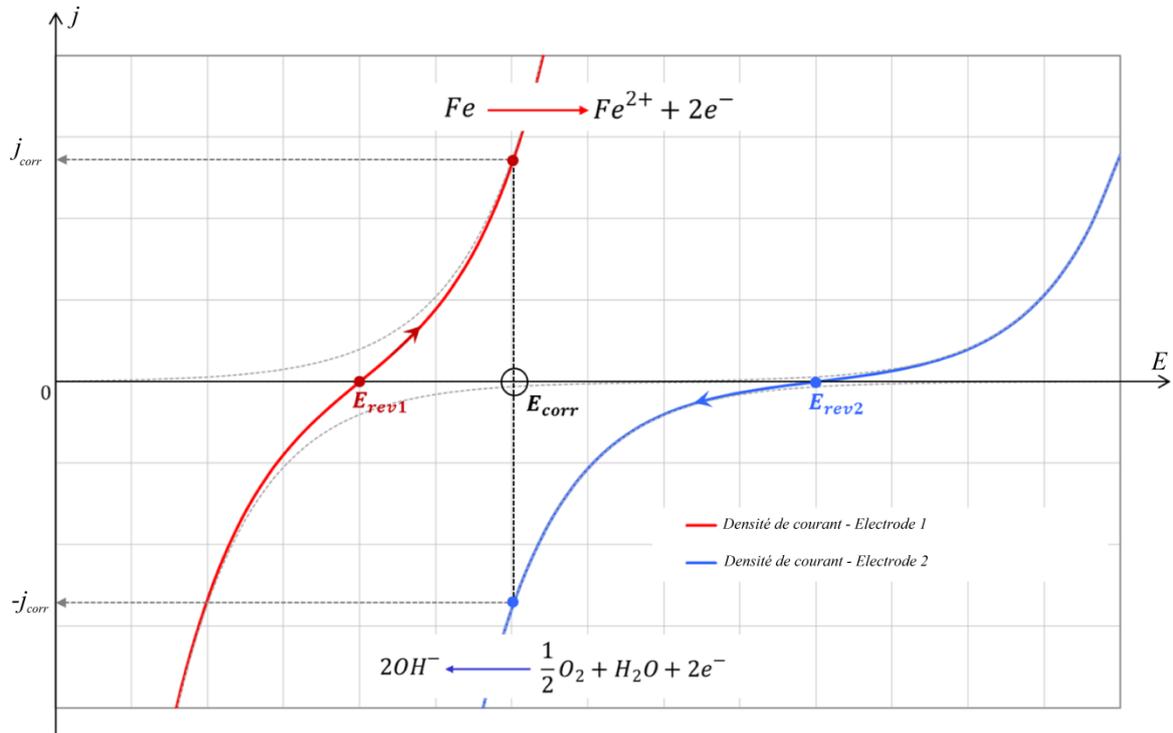


Figure 4. 2 : Courbes de polarisation des 2 électrodes réversibles et équilibre du système de corrosion uniforme résultant de leur couplage

La **Figure 4. 2** représente les courbes de polarisation de deux électrodes infiniment proches. Les courbes rouge et bleue représentent respectivement les courbes de polarisation des électrodes 1 (l'acier) et 2 (l'oxygène). Le couplage électrique des 2 électrodes entraîne leur polarisation vers un nouveau potentiel libre commun, qualifié de potentiel de corrosion E_{corr} compris entre E_{rev1} et E_{rev2} .

Les équations de Butler-Volmer de chaque électrode sont :

$$j_1 = j_{0,1} \left[\exp\left(\ln(10) \frac{E - E_{rev1}}{\beta_{a,1}}\right) - \exp\left(-\ln(10) \frac{E - E_{rev1}}{\beta_{c,1}}\right) \right] \quad (4. 6)$$

Et

$$j_2 = j_{0,2} \left[\exp\left(\ln(10) \frac{E - E_{rev2}}{\beta_{a,2}}\right) - \exp\left(-\ln(10) \frac{E - E_{rev2}}{\beta_{c,2}}\right) \right] \quad (4. 7)$$

Sachant que l'électrode 1 est polarisée anodiquement et que l'électrode 2 est polarisée cathodiquement, les termes associés à la cathode de l'équation (4. 6) et à l'anode de l'équation (4. 7) peuvent être négligés. Elles deviennent donc :

$$j_1 = j_{0,1} \exp\left(\ln(10) \frac{E - E_{rev1}}{\beta_{a,1}}\right) \quad (4.8)$$

Et

$$j_2 = -j_{0,2} \exp\left(-\ln(10) \frac{E - E_{rev2}}{\beta_{c,2}}\right) \quad (4.9)$$

A l'équilibre, la densité de courant net apparent produite par le système de corrosion uniforme est nulle :

$$j_1 + j_2 = j_{0,1} \exp\left(\ln(10) \frac{E_{corr} - E_{rev1}}{\beta_{a,1}}\right) - j_{0,2} \exp\left(-\ln(10) \frac{E_{corr} - E_{rev2}}{\beta_{c,2}}\right) = 0 \quad (4.10)$$

Cette dernière équation présente une seule inconnue (E_{corr}) et peut donc être résolue pour déterminer le potentiel de corrosion.

$$j_{corr} = j_{0,1} \exp\left(\ln(10) \frac{E_{corr} - E_{rev1}}{\beta_{a,1}}\right) = j_{0,2} \exp\left(-\ln(10) \frac{E_{corr} - E_{rev2}}{\beta_{c,2}}\right) \quad (4.11)$$

Les équations (4.8) et (4.9) deviennent :

$$j_1 = j_{corr} \exp\left(\ln(10) \frac{E - E_{corr}}{\beta_{a,1}}\right) \quad (4.12)$$

Et

$$j_2 = -j_{corr} \exp\left(-\ln(10) \frac{E - E_{corr}}{\beta_{c,1}}\right) \quad (4.13)$$

Pour simplifier l'écriture, les coefficients de Tafel ne seront plus référencés selon l'électrode réversible associée et on notera β_a pour $\beta_{a,1}$ et β_c pour $\beta_{c,2}$. L'équation de Butler-Volmer pour le couplage devient :

$$j = j_1 + j_2 = j_{corr} \left[\exp\left(\ln(10) \frac{E - E_{corr}}{\beta_a}\right) - \exp\left(-\ln(10) \frac{E - E_{corr}}{\beta_c}\right) \right] \quad (4.14)$$

C'est cette dernière équation qui sera utilisée dans la suite du travail. Elle permet donc de décrire pour les systèmes électrochimiques lents, pour laquelle la cinétique de corrosion est pilotée par la cinétique des réactions d'oxydoréduction, le comportement de l'acier en corrosion uniforme (barre d'acier active ou passive, sans couplage électrique avec une autre barre d'un état différent). Il est également important de noter que les paramètres électrochimiques de l'équation (4. 14) dépendent de l'état de dépassivation de l'acier [Sohail et al., 2015], ci-dessous l'indice a pour l'acier actif et p pour l'acier passif.

- Densité du courant de corrosion $j_{corr} : j_{corr,a} \gg j_{corr,p}$
- Potentiel de corrosion $E_{corr} : E_{corr,a} < E_{corr,p}$
- Coefficient anodique de Tafel : $\beta_{a,a} < \beta_{a,p}$
- Coefficient cathodique de Tafel : $\beta_{c,a} \approx \beta_{c,p}$

4.4. Exploitation numérique de l'étude expérimentale

4.4.1. Description

La simulation est réalisée avec le module AC/DC du logiciel COMSOL ® fondé sur la méthode des éléments finis. La procédure de simulation a été décrite dans la section 2.5 à la seule différence qu'ici les barres d'acier sont simulées comme des tubes creux, sur la surface desquelles la densité de courant est contrôlée par l'implantation de l'équation de Butler-Volmer (voir **Figure 4. 3**).

Deux modèles ont été créés correspondant aux deux dalles étudiées : non armée et armée. Ces modèles possèdent les mêmes dimensions que les dalles de la campagne expérimentale. Comme pour la mesure, le courant continu est appliqué sur la surface du modèle et les potentiels sont acquis aux points situés au milieu des sources.

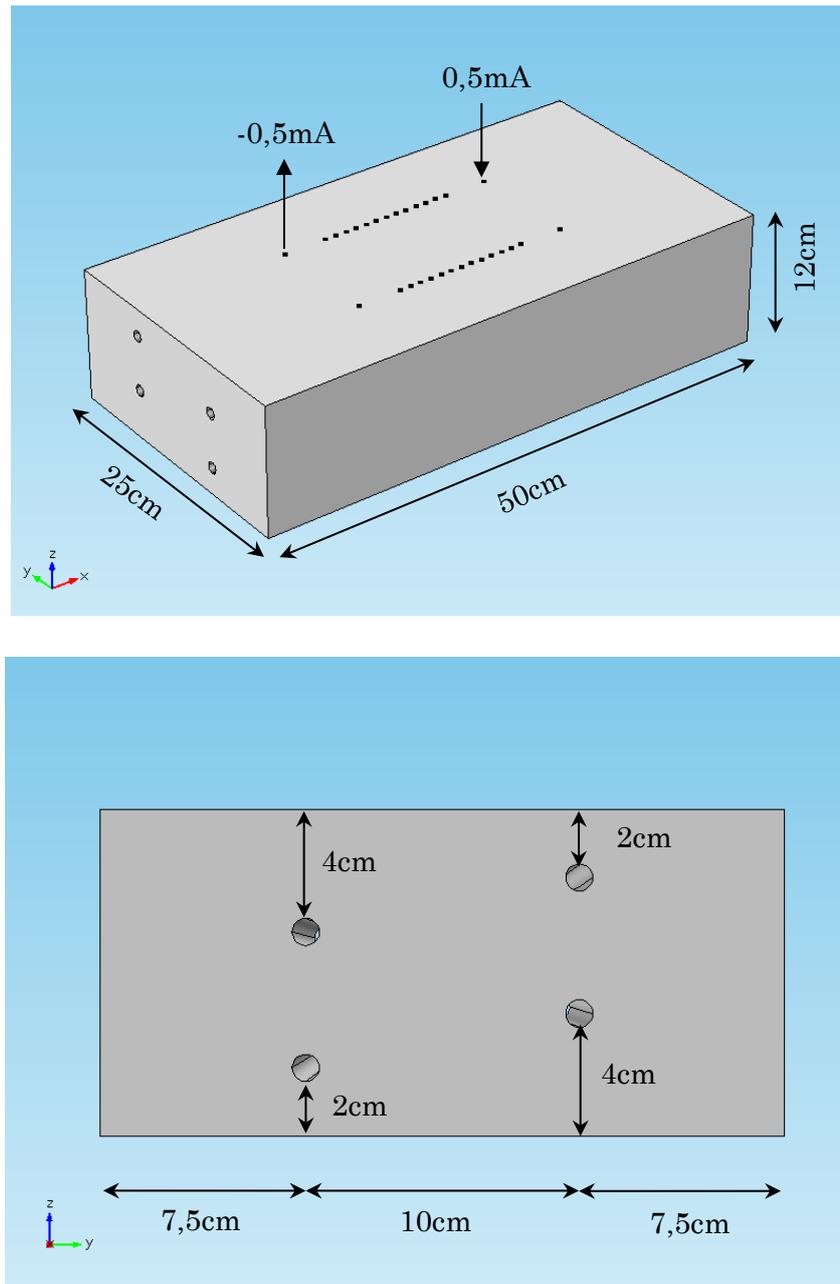


Figure 4. 3 : Détails géométriques du modèle de simulation dans COMSOL Multiphysics ®

Les données d'entrée de la simulation sont les caractéristiques électriques des matériaux : la résistivité du béton ρ_b ; les paramètres de Butler-Volmer de l'acier (j_{corr} ; E_{corr} ; β_a ; β_c). Ces paramètres ont été ajustés afin que la courbe de résistivité obtenue soit similaire à celle obtenue dans les essais expérimentaux.

Deux résultats de mesures ont été sélectionnés pour la simulation numérique correspondant à deux différents états d'humidité de béton : à 43 jours lorsque le gradient de teneur en eau était en train de s'établir et à 265 jours quand le gradient est stabilisé.

4.4.2. Mode opératoire

La simulation a été effectuée avec les mesures sur face sèche et a été vérifiée avec celles de la face humide.

Détermination de la résistivité du béton saturé ρ_b^{sat}

Dans un premier temps nous avons simulé la dalle non armée saturée d'eau (matériau considéré comme homogène) à 1 jour. Cela nous a permis de déterminer la résistivité du béton saturé ρ_b^{sat} qui sera appliquée pour le béton humide en contact avec la vapeur d'eau (HR proche de 100%).

Simulation des mesures à 43 et 265 jours

Dans cette étape les résultats des essais à 43 jours et 265 jours sont exploités. Tout d'abord la résistivité du béton a été déterminée avec le modèle de la dalle non armée. Les paramètres d'entrée ont été choisis pour que la courbe de résistivité obtenue par l'analyse numérique se superpose avec celle trouvée dans les essais expérimentaux.

A l'issue de cette étape nous trouvons le profil de résistivité du béton selon son état d'humidité.

Pour l'essai à 43 jours

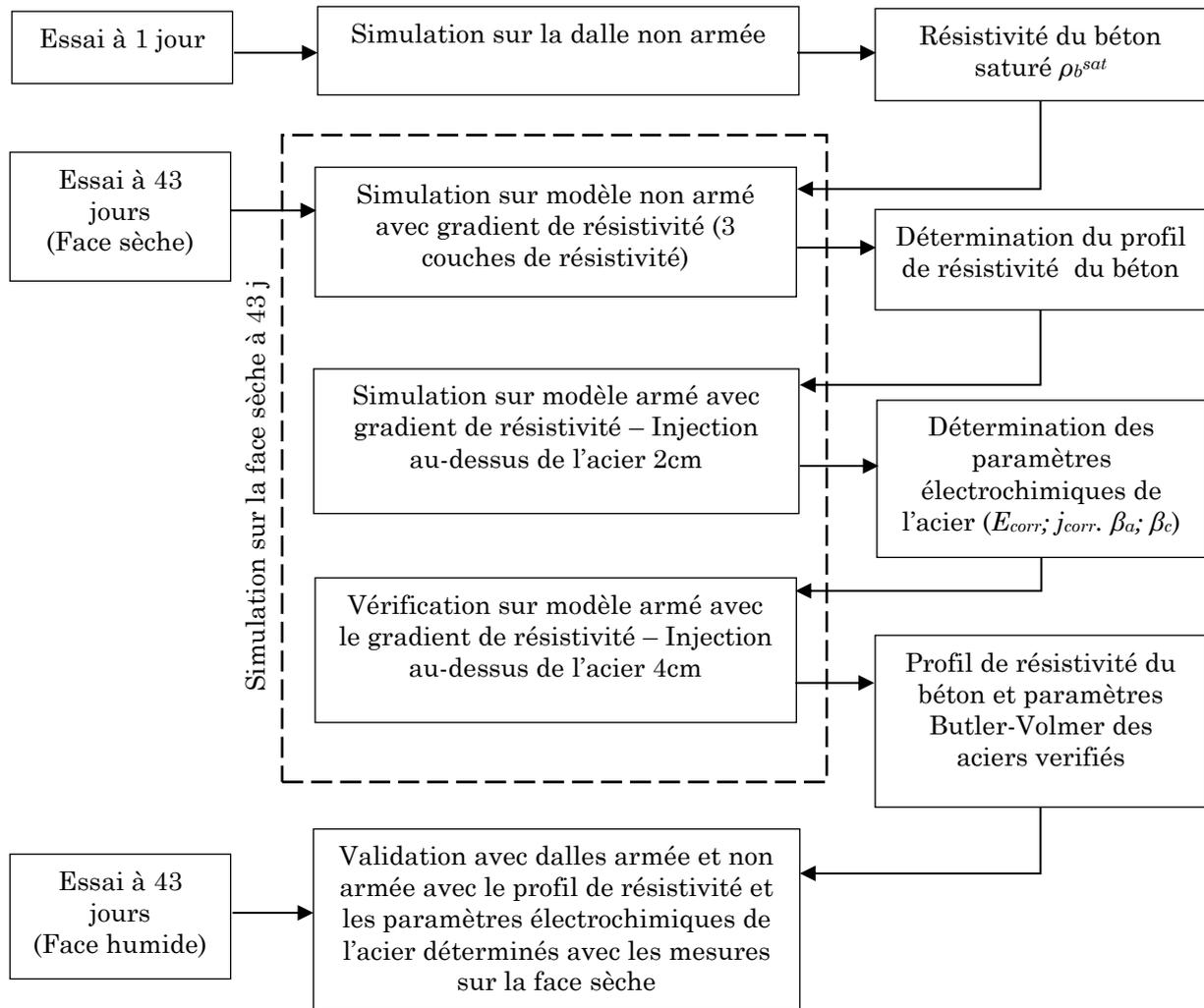


Figure 4. 4: Organigramme simulation de numérique sur COMSOL essai à 43 jours

A 43 jours le gradient de teneur en eau est en train de s'établir sur la partie supérieure de la dalle (en contact avec l'air) tandis que la partie inférieure (dont la surface est gardée humide) reste encore saturée d'eau. Il existe en plus un béton de peau sur la face sèche de la dalle où la résistivité est élevée (à cause de la carbonatation par exemple). Pour prendre en compte ces différentes complexités le profil de résistivité de la dalle a été divisé en trois couches.

- Couche supérieure : béton de peau de résistivité homogène de $100 \Omega.m$
- Couche centrale : variation linéaire de $100 \Omega.m$ du haut à la ρ_b^{sat} (résistivité du béton saturé)
- Couche inférieure : béton saturé d'eau de résistivité homogène de ρ_b^{sat}

Les données d'entrée pour cette simulation sont : l'épaisseur des trois couches, la résistivité du béton sec ($100 \Omega.m$) la résistivité du béton saturé (ρ_b^{sat}), et les paramètres électrochimiques des aciers (E_{corr} , j_{corr} , β_a , β_c).

La simulation débute avec les mesures sur la face sèche de la dalle non armée. Nous avons fait varier les paramètres d'entrée pour caler avec les résultats expérimentaux. Nous obtenons ainsi le profil de résistivité du béton sur l'épaisseur.

Ce profil de résistivité est ensuite appliqué au modèle avec armature avec implémentation de l'équation de Butler-Volmer. L'injection se fait au-dessus de l'acier 2 cm. Les paramètres de l'acier déterminés à l'issue de cette étape sont utilisés dans le modèle à l'étape suivante où le courant est injecté au-dessus de l'acier 4 cm pour vérification.

Une fois toutes les données d'entrée déterminées, elles sont validées encore une fois avec les mesures sur la face humide des deux dalles (non armée et armée).

Pour l'essai à 265 jours

A 265 jours le gradient de teneur en eau est déjà stabilisé et établi sur toute l'épaisseur de la dalle. La loi déterminée expérimentalement dans la section 3.2 entre résistivité électrique et le degré de saturation est prise en compte dans ce modèle :

$$\rho = 24,848.S_r^{-3,262} \quad (4.15)$$

Le degré de saturation a été trouvé égal à 89% pour la face humide et à 55% pour la face sèche, conformément à la condition de stockage dans la campagne expérimentale (**Figure 3. 8**). A cette échéance, comme seules les mesures sur la face humide sont possibles, la simulation a donc été faite en utilisant les mesures sur la face humide des dalles. La **Figure 4. 5** montre l'organigramme modifié de la simulation sur les mesures à 265 jours.

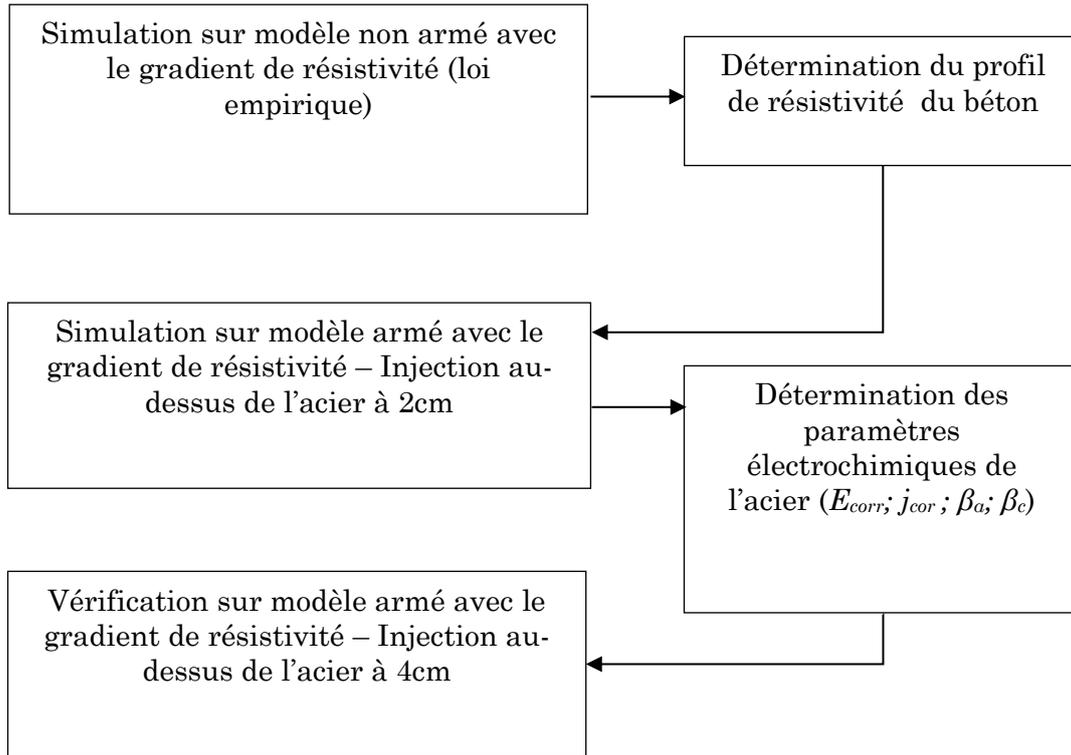


Figure 4. 5: Procédure de simulation sur la dalle à 265 jours sur la face humide.

La loi empirique a été rentrée dans le modèle et testée avec la dalle non armée. A l'issue de cette étape on obtient le profil de résistivité du béton. Ensuite, on cherche à caractériser l'acier via les paramètres électrochimiques de l'équation de Butler-Volmer. Nous commençons par la simulation de l'essai sur l'acier à 2 cm. Une fois déterminés, les paramètres de Butler-Volmer sont vérifiés avec le résultat de la mesure sur l'acier à 4 cm.

L'erreur de simulation est calculée avec l'équation (4. 16):

$$Erreur = 1 - \frac{\text{Moyenne des valeurs de résistivité par simulation}}{\text{Moyenne des valeurs de résistivité apparente des mesures}} \quad (4. 16)$$

4.4.3. Résultats de simulation

La **Figure 4. 6** montre les résultats sur le modèle non armé et homogène qui simule la dalle de béton saturée en eau à 1 jour. La résistivité obtenue est de 36 $\Omega.m$ avec une erreur de -3,47%.

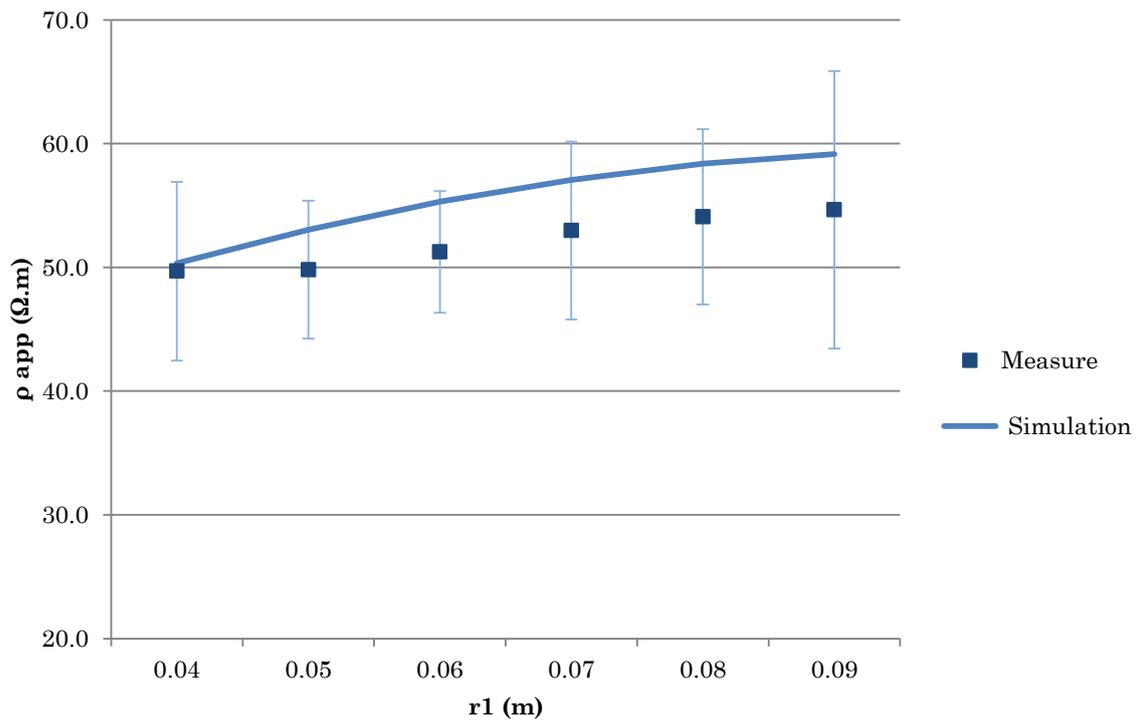


Figure 4. 6: Résultat de simulation sur dalle non armée totalement saturée à 1 jour (avec un intervalle de confiance de 99%)

4.4.3.1. Simulation de la dalle non carbonatée à 43 jours

Le profil de résistivité pris en compte pour les mesures à 43 jours est présenté sur la **Figure 4. 7.**

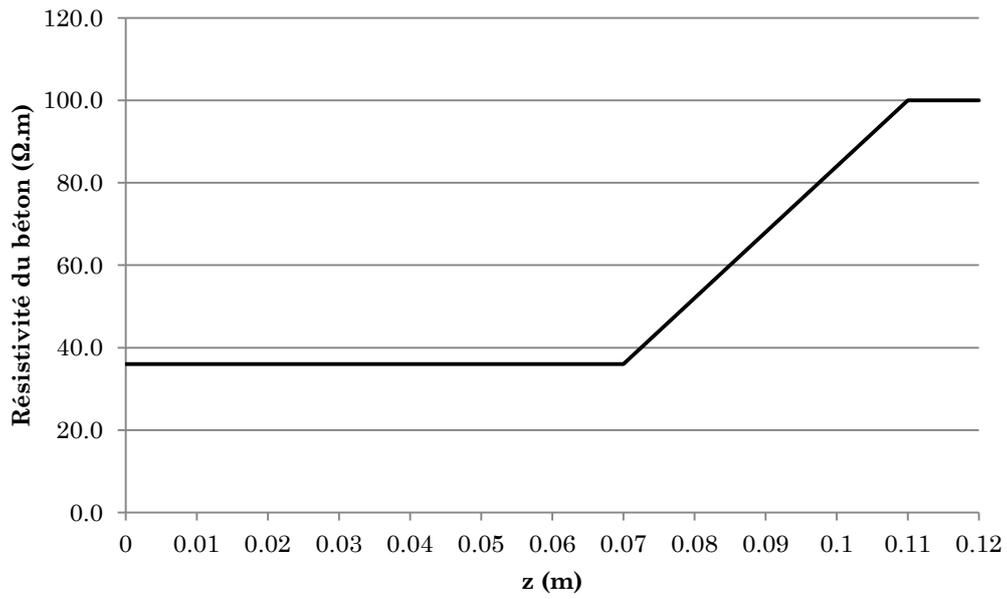


Figure 4. 7 : Profil de résistivité simulé pour la dalle à 43 jours (face sèche)

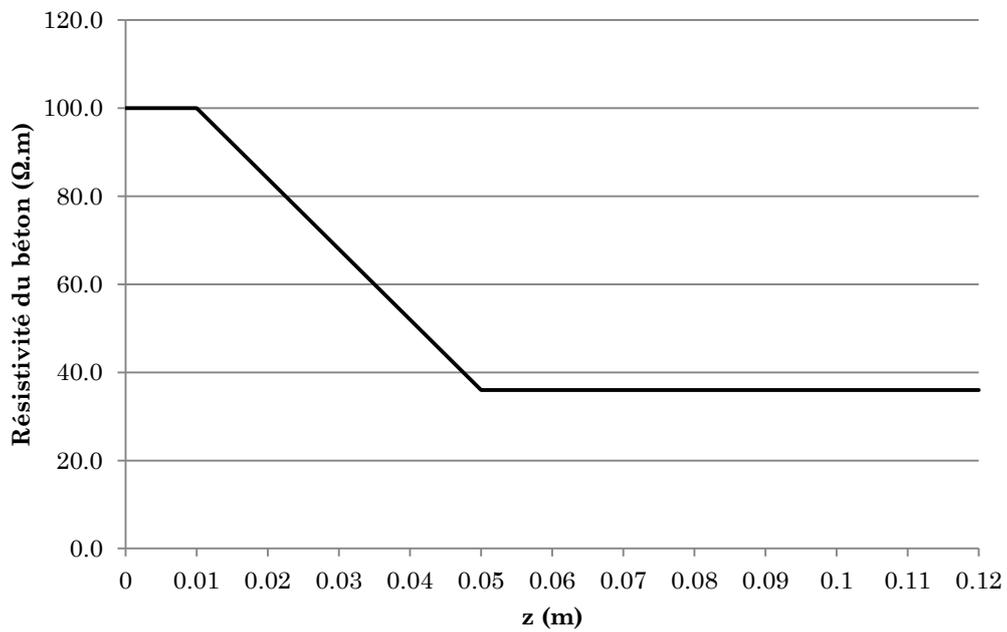


Figure 4. 8 : Profil de résistivité simulé pour la dalle à 43 jours (face humide).

Le profil utilisé à l'issue de cette simulation est présenté dans **Figure 4. 7** avec $z=0$ m correspondant au fond et $z=0,12$ m correspondant à la surface de la dalle examinée. L'épaisseur de la couche du béton de peau est estimée à 1 cm. Celle de la couche du

milieu est de 4 cm. Les paramètres électrochimiques des aciers sont présentés dans le tableau **Tableau 4. 1**:

Tableau 4. 1 : Paramètres électrochimiques des aciers passifs à 43 jours

j_{corr}	2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
E_{corr}	-150 mV
β_a	500 mV/dec
β_c	80 mV/dec

Dans la littérature, les valeurs de j_{corr} , E_{corr} , β_a , β_c sont très variables, selon les conditions environnementales (taux d'humidité relative, température, salinité, carbonatation) [Song, 2000; Sohail, 2013]. Le **Tableau 4. 2** présente la gamme de valeurs mesurées par Sohail dans ses travaux de recherche [Sohail, 2013]. La recherche des paramètres électrochimiques de l'acier par la simulation est basée sur ses résultats car d'une part cet auteur a employé une formulation de béton identique à celle de cette étude et d'autre part il a caractérisé les paramètres électrochimiques sur des aciers dans un béton carbonaté ou non.

Tableau 4. 2 : Gammes de paramètres électrochimiques selon [Sohail, 2013]

	Acier passif	Acier actif
j_{corr}	De 0,01 à 0,15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	De 0,3 à 2,6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
E_{corr}	De -319 à -89 mV	De -650 à -543 mV
β_a	De 374 à 700 mV/dec	De 180 à 280 mV/dec
β_c	De 70 à 160 mV/dec	De 190 à 350 mV/dec

Les paramètres obtenus sont cohérents avec les valeurs trouvées par Sohail dans [Sohail, 2013] sauf pour la densité de courant de corrosion j_{corr} dont la valeur simulée sort de cette gamme.

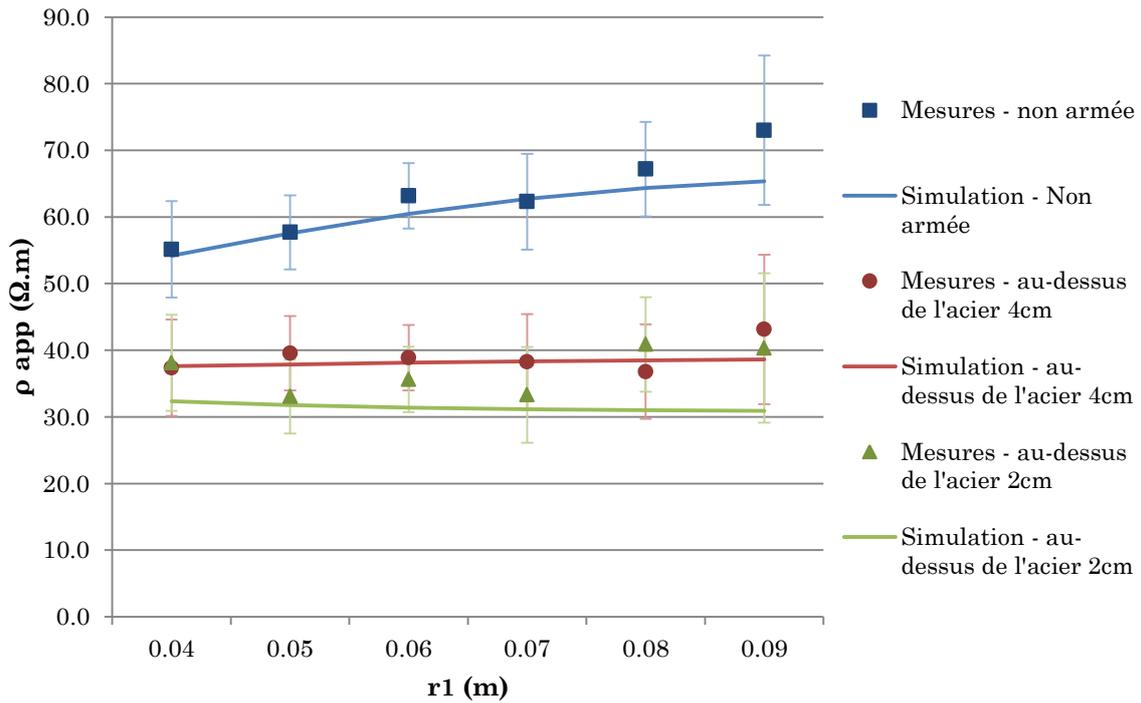


Figure 4. 9 : Résultat des simulations et comparaison avec les mesures des dalles non carbonatées sur la face humide à 43 jours (avec un intervalle de confiance de 99%)

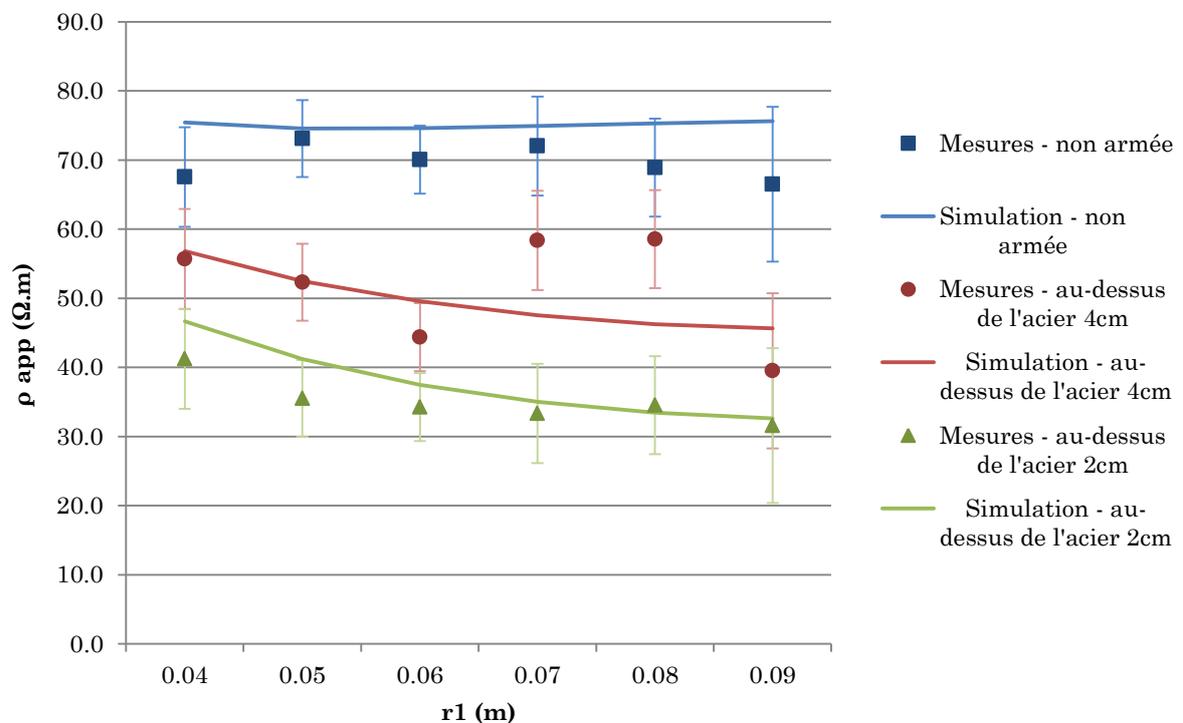


Figure 4. 10 : Résultat des simulations et comparaison avec les mesures sur les dalles non carbonatées sur la face sèche à 43 jours (avec un intervalle de confiance de 99%)

Les **Figure 4. 9** et **Figure 4. 10** montrent l'ensemble des valeurs de résistivité mesurées et le résultat de la simulation à 43 jours, sur la face sèche et sur la face humide respectivement. Il est observé que les courbes de simulations reproduisent globalement bien les courbes expérimentales.

Le **Tableau 4. 3** présente les écarts de la simulation par rapport aux mesures. Les résultats de la simulation montrent l'intérêt de la méthodologie pour l'étude du gradient de résistivité du béton ainsi que l'état électrochimique de l'acier. Il est important aussi de noter que la couche de béton de peau doit être prise en considération pour la simulation numérique.

Tableau 4. 3 : Ecart entre la simulation et les mesures sur les dalles non carbonatées à 43 jours

	Non armée	Au-dessus de l'acier 2cm	Au-dessus de l'acier 4cm
Face sèche	-5,39%	7,63%	-3,41%
Face humide	-3,66%	-14,80%	-2,14%

4.4.3.2. Simulation de la dalle non carbonatée à 265 jours

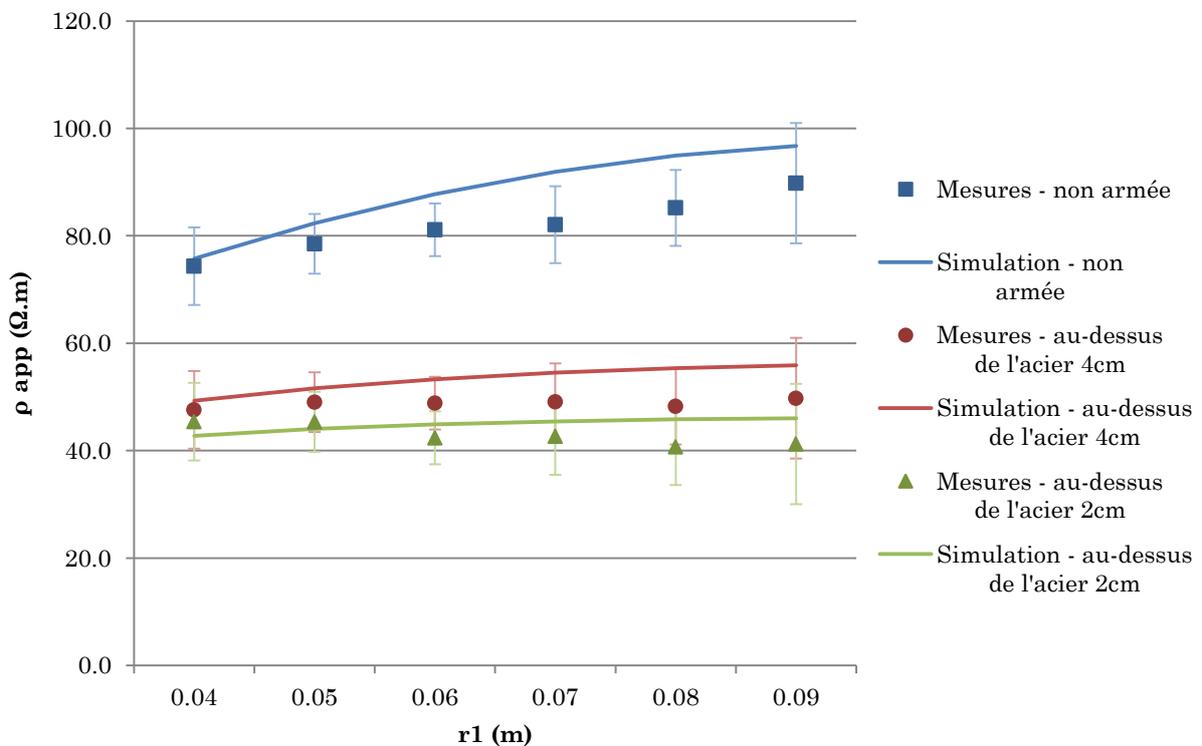


Figure 4. 11 : Résultat de simulation avec les mesures sur les dalles non carbonatées à 265 jours sur la face humide (avec l'intervalle de confiance de 99%).

Tableau 4. 4 : Ecart entre la simulation et les mesures sur les dalles non carbonatées à 265 jours

Non armée	Au-dessus de l'acier 2cm	Au-dessus de l'acier 4cm
-7,24%	-4,17%	-8,58%

Les écarts par rapport aux mesures sont inférieurs à 10% dans la plupart des cas (sauf sur l'acier 2 cm de la face humide à 43 jours). Dans la plupart des cas, les courbes de simulation se trouvent à l'intérieur du fuseau de barres d'erreurs des points de mesure. Ces barres d'erreurs représentent la variation possible des résultats de mesures par point sur la base de 15 mesures. Ces barres d'erreur sont calculées de sorte que l'intervalle de confiance soit de 99%. Le résultat de simulation est donc cohérent avec les mesures expérimentales. La valeur de j_{corr} obtenue semble élevée et ne se trouve pas dans la gamme de valeurs trouvée par Sohail [Sohail, 2013] tandis que les valeurs des autres paramètres semblent cohérentes.

4.4.3.3. Simulation de la dalle carbonatée à l'état saturé (jour 0)

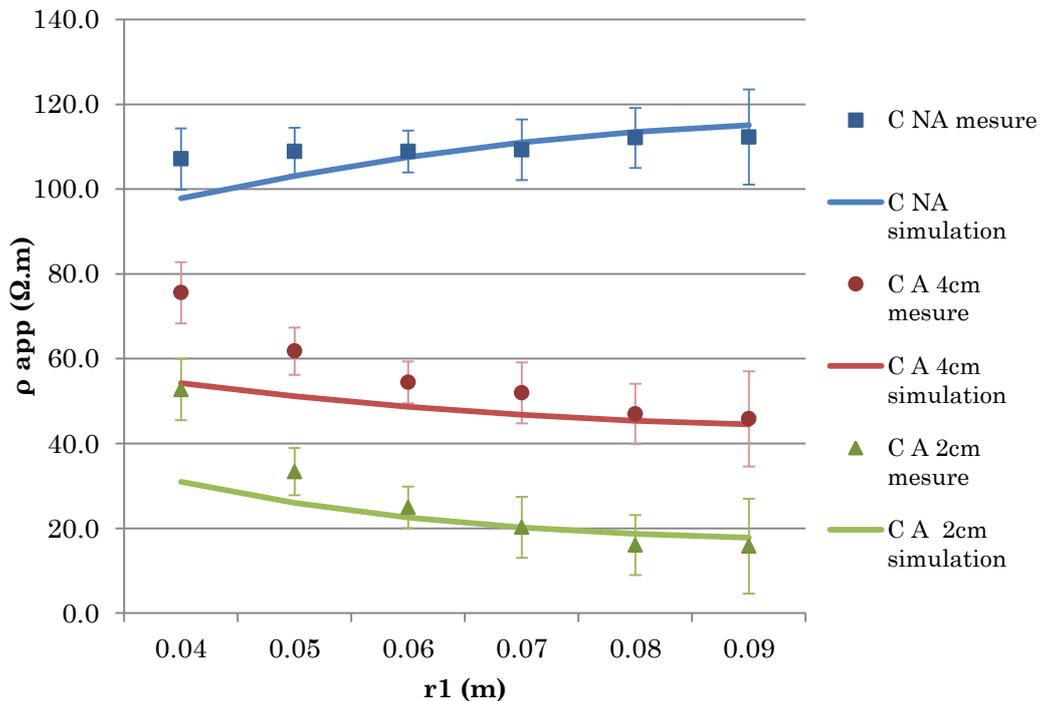


Figure 4. 12 : Résultat de simulation sur les dalles carbonatées saturée (avec un intervalle de confiance de 99%).

La procédure de simulation de la dalle carbonatée saturée est similaire au cas des dalles non carbonatées. Les mesures ont été faites sur la face humide, à la sortie de l'eau. La surface de mesure a été essuyée avec un chiffon pour enlever l'eau en excès.

A cette échéance les dalles sont saturées d'eau et la résistivité est considérée comme homogène dans le bloc. La résistivité du béton carbonatée saturée est de 56 Ω .m. Cette valeur est ensuite appliquée pour le modèle armé afin de caractériser l'acier. Les paramètres de Butler-Volmer obtenus avec le modèle armé sont présentés dans la **Tableau 4. 5**.

La **Figure 4. 12** présente le résultat de la simulation sur les dalles carbonatées saturées. On observe que l'écart est plus grand quand r_1 est faible ($r_1 < 0,06m$), et que le gradient obtenu par simulation correspond bien à celui de la mesure lorsque r_1 est grand ($r_1 > 0,06m$). Ce phénomène peut être lié à la disposition des électrodes de potentiel qui est liée à la profondeur d'investigation. Plus r_1 est grand, plus les électrodes de potentiel s'éloignent de la source et plus la résistivité apparente que l'on obtient est influencée par le matériau en profondeur.

Tableau 4. 5 : Paramètres électrochimiques de l'acier actif par la simulation des mesures sur la dalle carbonatée à l'état saturé (jour 0)

j_{corr}	10 $\mu A/cm^2$
E_{corr}	-650 mV
β_a	120 mV/dec
β_c	150 mV/dec

Le **Tableau 4. 5** donne les paramètres Butler-Volmer de l'acier obtenus par la simulation sur la dalle carbonatée des mesures à l'état saturé. Tout comme dans le cas de l'acier passif les résultats obtenus se trouvent bien dans la gamme de mesure de Sohail (présentée dans le **Tableau 4. 2**) sauf pour la densité de courant de corrosion j_{corr} . Le rapport entre $j_{corr,a}$ de l'acier actif et $j_{corr,p}$ de l'acier passif est de 5, ce qui signifie que, pour l'acier actif, l'échange de charges électriques à l'interface acier-béton est bien plus élevé que pour l'acier passif. La résistance de polarisation, caractérisation la résistance de transfert de charges électriques de la solution interstitielle du béton à l'acier, calculée avec la formule (4. 17), est également fortement plus élevée pour l'acier passif que l'acier passif. Cela correspond à un effet de court-circuit plus fort, qui explique la chute plus significative de résistivité au-dessus de l'acier actif. Même si le rapport de 5 entre $j_{corr,a}$ et $j_{corr,p}$ est plus faible que celui trouvé dans la littérature, ce rapport montre la dépassivation de l'acier et peut être exploité pour détecter l'état de corrosion de l'acier.

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{\ln(10) (\beta_a + \beta_c) \cdot j_{corr}} \quad (4.17)$$

En comparant les valeurs de l'acier actif (**Tableau 4. 5**) et de l'acier passif (**Tableau 4. 1**) on trouve que les valeurs des paramètres sont cohérentes avec la recommandation proposée par Sohail [Sohail et al., 2015] sur la relation entre ces paramètres et l'état de dépassivation de l'acier, citée dans la section 4.3.2.

Tableau 4. 6 : Ecart entre la simulation et les mesures sur les dalles carbonatées à 0 jour

Non armée	Au-dessus de l'acier 2cm	Au-dessus de l'acier 4cm
1,58%	16,45%	13,62%

4.5. Etude paramétrique de facteurs influençant la mesure de résistivité au droit de l'acier

Cette étude numérique a pour but de mettre en évidence différents paramètres étudiés et remarqués lors des mesures expérimentales. Pour ce faire nous avons créé deux modèles numériques sous COMSOL, dimensionnés exactement comme dans l'expérience: une dalle armée avec un enrobage de 2 cm et de dimensions 50x25x12 cm et la même dalle avec un enrobage de 4 cm Deux états électrochimiques de l'acier, état passif et actif) sont étudiés dont les paramètres de Butler-Volmer sont identiques à ceux déterminés par [Sohail et al., 2015] et présentés dans le **Tableau 4. 7**). La résistivité du béton est fixée à une valeur homogène de 100, 500 ou 900 $\Omega.m$. Cela représente donc 12 cas d'étude au total. L'injection se fait toujours directement au-dessus de l'acier pour le modèle armé, et à même position pour le non armé.

Tableau 4. 7 : Paramètres électrochimiques de l'acier mesurés par [Sohail et al., 2015]

	Acier passif (béton non carbonaté)	Acier actif (béton carbonaté)
j_{corr}	0,025 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
E_{corr}	-150 mV	-650 mV
β_a	400 mV/dec	90 mV/dec
β_c	150 mV/dec	150 mV/dec

La chute de résistivité est calculée selon la formule (3. 2). L'ensemble des résultats est présenté dans la **Figure 4. 13**. Les courbes ont une forme ascendante qui signifie que la chute de résistivité augmente avec l'augmentation de la résistivité du béton. Autrement dit, plus le béton est résistif plus l'effet de court-circuit est prononcé. La dépassivation de l'acier a un impact sur cet effet de court-circuit. L'acier actif est plus favorable au courant de court-circuit que l'acier passif (les courbes rouges se trouvent toujours au-dessus les courbes bleues). Cet effet de court-circuit dépend aussi de l'épaisseur d'enrobage : plus l'enrobage est faible, plus l'effet de court-circuit est grand. Ces remarques sont identiques à celles des essais expérimentaux. Cela confirme la pertinence des mesures expérimentales au-dessus de l'acier avec la méthodologie proposée.

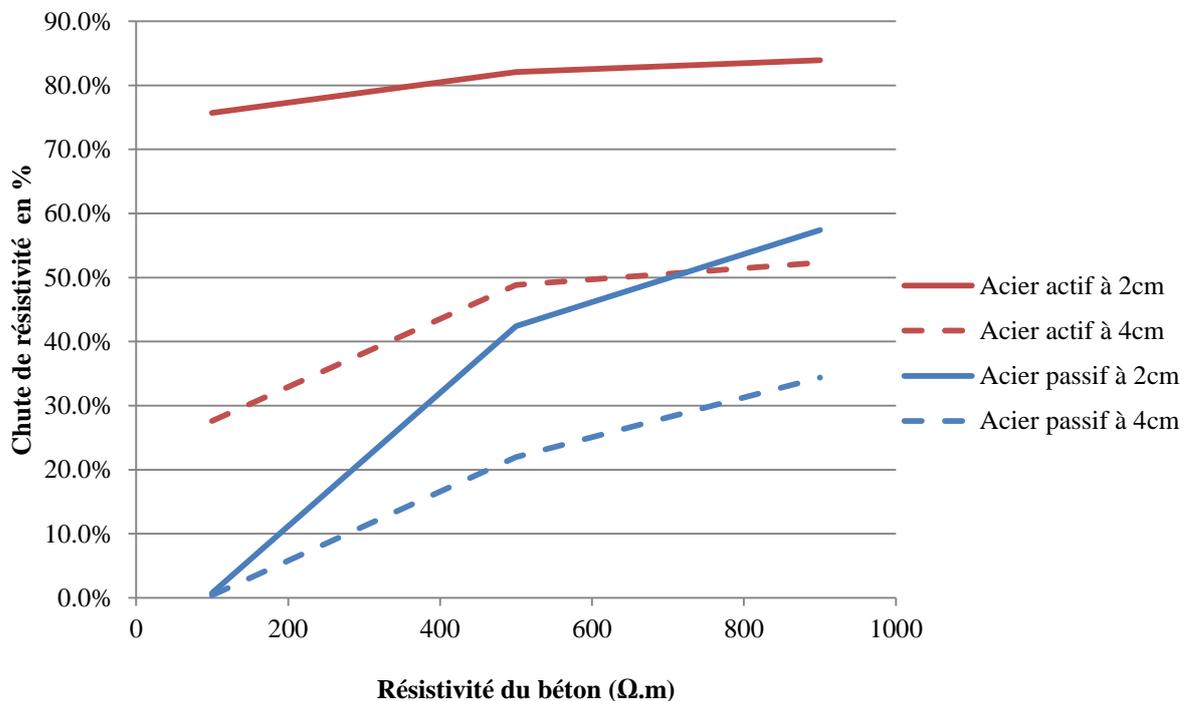


Figure 4. 13 : Etude paramétrique par simulation numérique : chute de résistivité en fonction de la résistivité du béton, avec deux enrobages et deux états électrochimiques de l'acier

4.6. Etude sur l'influence des mailles d'armatures

4.6.1. Objectif

Pour compléter les études du gradient de teneur en eau des structures en béton armé, une étude numérique sur l'influence des mailles d'acier a été réalisée. L'objectif est de déterminer la zone d'influence à prendre en compte dans la procédure d'inversion numérique.

4.6.2. Mode opératoire

La dalle modélisée a une taille de $2\text{m}\times 2\text{m}\times 0,15\text{m}$. L'épaisseur d'enrobage est de 2 cm, l'acier a un diamètre de 10mm. Deux types de maille d'acier sont considérées de $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ et $15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$. La mesure est réalisée toujours au droit de l'acier central. Tous les autres paramètres sont identiques à ceux des modèles de simulation de la section 2.5 (voir **Tableau 2. 5**). Les barres croisées dans le treillis sont superposées et le treillis d'armature est donc interconnecté.

Les différentes configurations considérées dans la simulation sont :

- Configuration 1 : une seule barre au centre de la dalle
- Configuration 2 : deux barres croisées
- Configuration 3 : deux barres croisées et deux barres parallèles au profil de mesure
- Configuration 4 : maillage sur une zone de $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ (ou $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}$ pour une maille d'aciers de $15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$)
- Configuration 5 : maillage sur une zone de $40\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ (ou $60\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ pour une maille d'aciers de $15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$)
- Configuration 6 : maillage sur une zone de $60\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ (ou $90\text{ cm}\times 90\text{ cm}$ pour une maille d'aciers de $15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$)

Un deuxième lit d'armature est ajouté. L'écartement entre les deux lits est de 10 cm. Les deux lits sont reliés électriquement par des aciers. Seulement les configurations 5 et 6 sont considérées dans ce cas. Le but est d'examiner l'influence du deuxième lit d'acier sur les mesures.

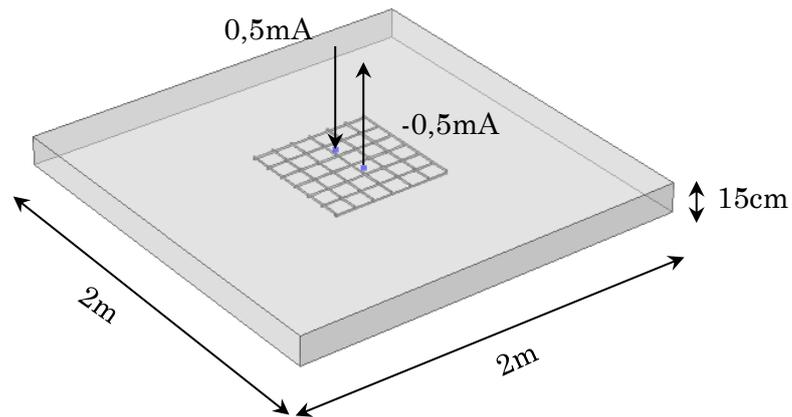
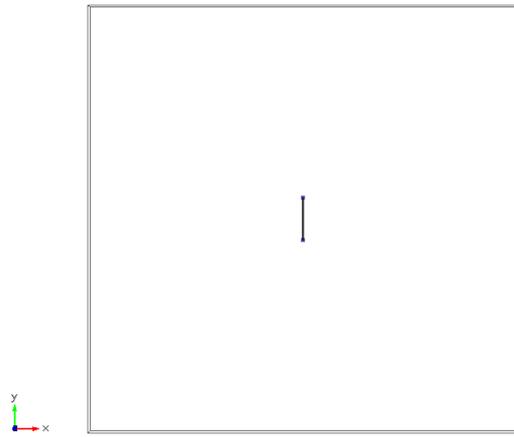
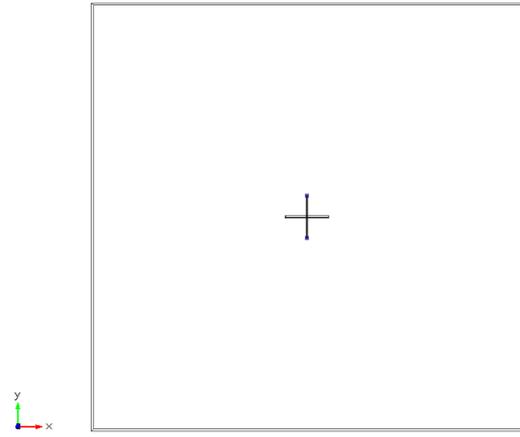


Figure 4. 14 : Modèle de simulation pour l'étude sur le maillage d'acier (les points représentent les positions des électrodes d'injection et de récupération du courant)

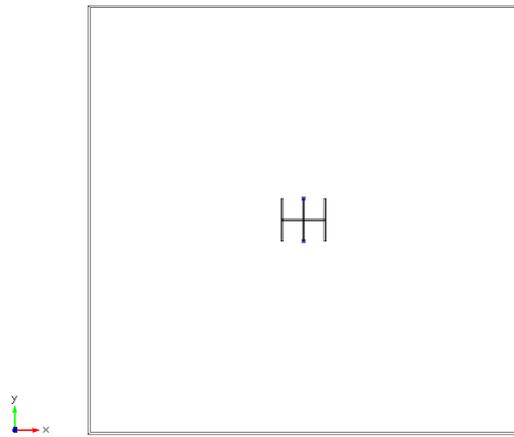
La **Figure 4. 14** décrit les détails géométriques du modèle numérique et la **Figure 4. 15** montre les différentes configurations utilisées par la simulation.



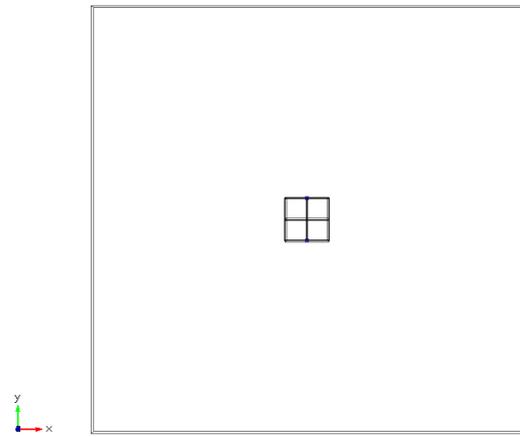
Configuration 1



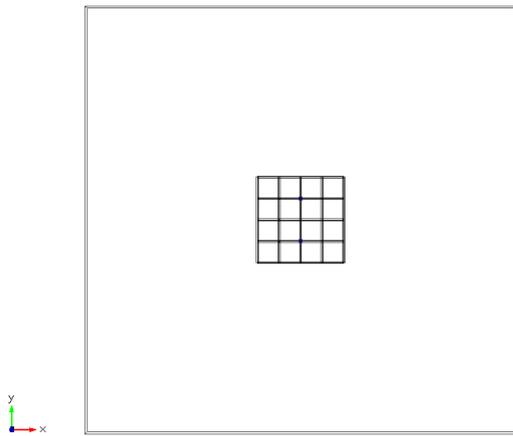
Configuration 2



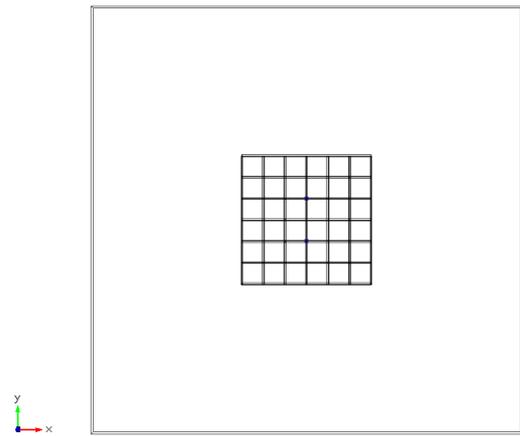
Configuration 3



Configuration 4



Configuration 5



Configuration 6

Figure 4. 15 : Différentes configurations testées par la simulation

4.6.3. Résultats

Les **Figure 4. 16** et **Figure 4. 17** présentent les résultats de la simulation sur le modèle avec le treillis de 10 cm et de 15 cm respectivement.

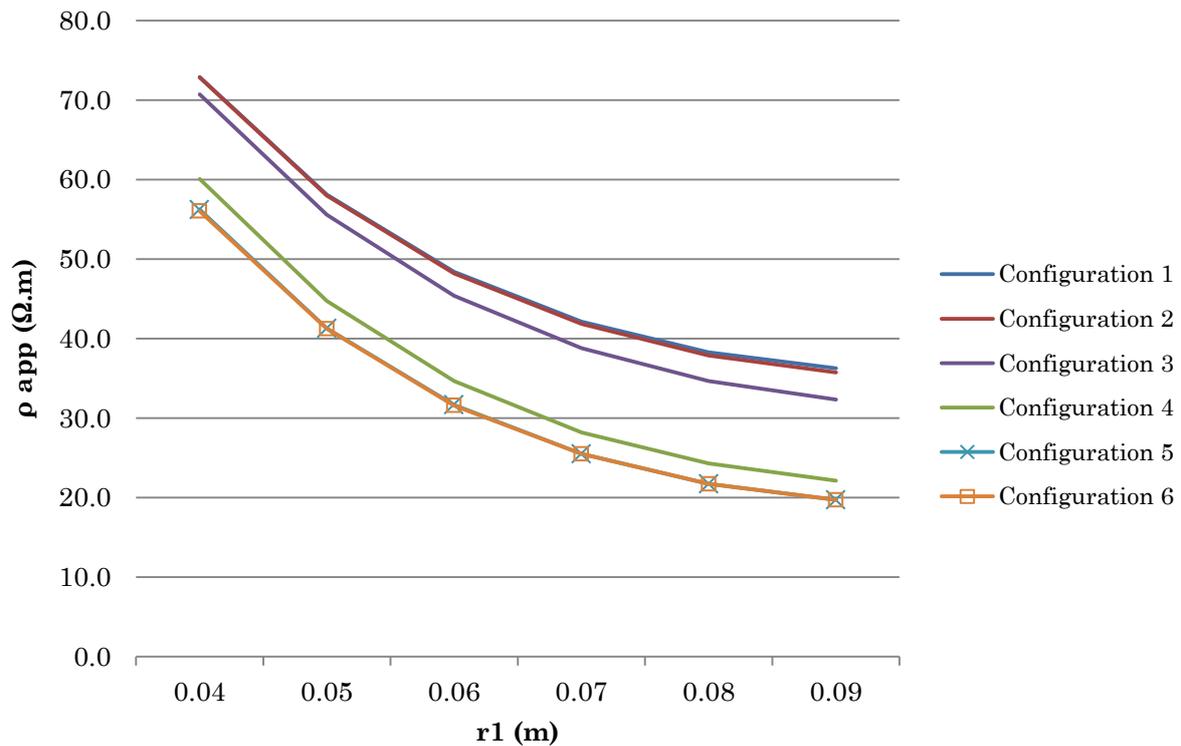


Figure 4. 16 : Etude de l'influence de la configuration du maillage d'acier (maille de 10 cm)

Il n'y a quasiment pas de différence entre les courbes de « Configuration 1 » et « Configuration 2 », ce qui signifie que la barre perpendiculaire au dispositif n'influence que très peu le résultat. Par contre il y a une différence entre « Configuration 1 » et « Configuration 3 » qui signifie que les barres parallèles au dispositif a une influence sur la résistivité mesurée, car dans ce cas les aciers « captent » davantage le courant. Plus l'électrode de potentiel s'éloigne de la source de courant, plus le courant est réparti dans le volume et plus le résultat est affecté par l'acier. Pour « Configuration 4 » la chute de résistivité est importante. Dans cette configuration les deux sources de courant se trouvent sur le treillis d'acier où toutes les barres sont interconnectées ce qui explique la chute significative.

On remarque que la courbe de « Configuration 5 » est encore baissée par rapport à « Configuration 4 » et que les courbes de « Configuration 5 » et « Configuration 6 » sont

superposées. Ces résultats montrent que pour une maille de $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ il suffit de simuler une zone de $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ de treillis pour bien modéliser la structure en béton armé.

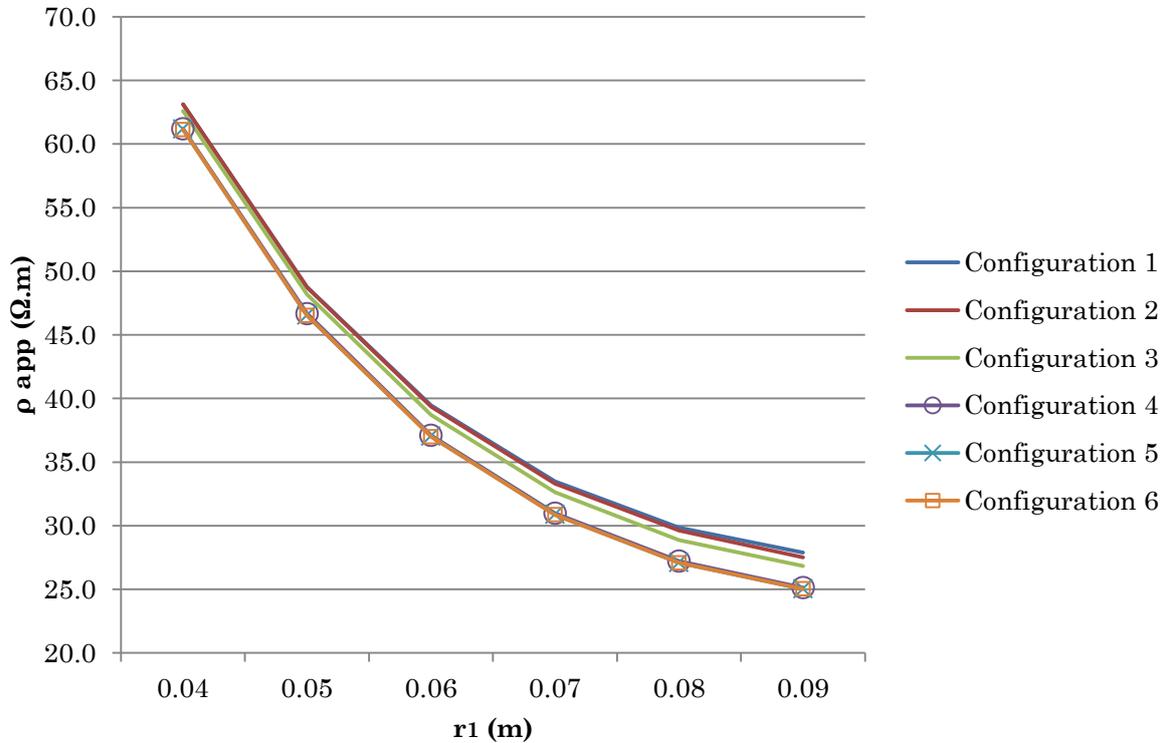


Figure 4.17 : Etude sur l'influence du maillage d'acier (maille de 15 cm)

Pour le maillage $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ on arrive aux mêmes conclusions que pour le maillage de $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, mis à part pour « Configuration 3 » pour laquelle on ne trouve pas une chute très significative. Comme les points d'injection du courant ne se trouvent pas au niveau du nœud de maille, la différence entre la courbe de « Configuration 3 » et 4 n'est pas aussi remarquable que la **Figure 4.16**. Il faut donc éviter de positionner les sources de courant (C) aux nœuds du treillis.

Les résultats de Configuration 4, 5 et 6 sont très proches, ce qui signifie que la simulation d'une zone de $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ suffit pour prendre en compte tout le treillis.

L'influence du deuxième lit d'armatures sur la mesure de résistivité est montrée dans la **Figure 4.18**.

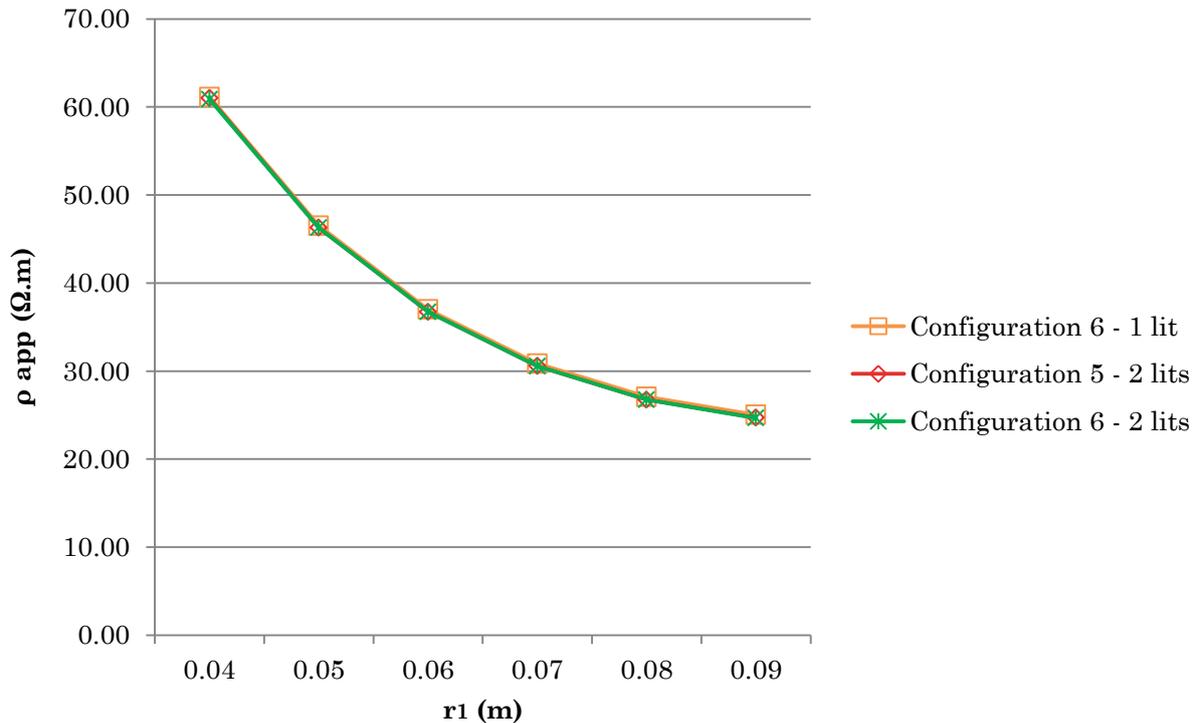


Figure 4. 18 : Etude sur l'influence du maillage d'acier, avec 2 lits d'acier reliés (maille de 15 cm)

La superposition des courbes de résistivité montre bien que la présence du deuxième lit d'armature n'affecte que très peu les mesures selon les configurations 5 et 6. On peut conclure que dans le cas de deux lits d'armature et de mesure au-dessus de l'acier, la simulation d'un seul lit est nécessaire pour une zone d'armature de 30 cm x 30 cm.

4.7. Conclusion

L'ensemble des travaux numériques présenté dans ce chapitre permet de retrouver le gradient de résistivité dans l'épaisseur d'une dalle ainsi que les paramètres électrochimiques de l'acier. L'analyse numérique a été faite avec le logiciel COMSOL Multiphysics ® basé sur la méthode des éléments finis. La loi d'Ohm et la conservation du courant gouvernent la circulation du courant dans le béton. L'armature d'acier et son comportement électrochimique sont modélisés à l'aide du modèle de Butler-Volmer.

Le processus de simulation semble pertinent pour la recherche du gradient de résistivité et des paramètres électrochimiques de l'acier. Il est possible de remonter au gradient de résistivité en profitant des mesures au droit de l'acier avec une erreur inférieure à 10%. Lorsque le gradient est stabilisé, la loi d'Archie qui relie le degré de saturation et la

résistivité électrique sur l'épaisseur totale de la dalle est utilisée pour passer du gradient de résistivité au gradient de teneur en eau.

Les paramètres de Butler-Volmer obtenus par la simulation sont cohérents avec ceux trouvés dans la littérature, sauf pour la densité de courant de corrosion j_{corr} qui est plus élevée que celles trouvées dans la littérature. Par contre, le rapport du $j_{corr,a}/j_{corr,p}$ a été trouvé égal à 5, qui est correct et cohérent par rapport aux données de la littérature. Ainsi la simulation des mesures sur la dalle en béton armé a montré que les mesures de résistivité au droit de l'acier permettent de retrouver les paramètres électrochimiques de l'acier ainsi que son état de passivation.

Les facteurs qui influencent l'effet de court-circuit (la résistivité du béton, l'épaisseur d'enrobage et les paramètres électrochimiques de l'acier) sont numériquement étudiés par simulation. Les résultats confirment les remarques trouvées précédemment par l'expérimentation : l'effet de court-circuit est d'autant plus élevé que la résistivité du béton est grande, que l'épaisseur d'enrobage est faible et que l'acier est électrochimiquement dépassivé.

Il est important de noter que dans nos travaux, le gradient de teneur en eau vertical est supposé linéaire sur l'épaisseur de la dalle. Cette hypothèse doit être vérifiée avec d'autres moyens, par exemple la résonance magnétique nucléaire ou la gammadensimétrie.

L'étude numérique sur l'effet de la présence d'un maillage d'acier permet de définir la zone du treillis à modéliser pour bien prendre en compte les aciers environnants tout en limitant le volume de béton modélisé. Le résultat montre que les aciers parallèles au profil de mesure ont l'influence la plus significative alors que les barres perpendiculaires perturbent peu la mesure. Selon la taille du maillage d'acier, la zone à modéliser est variable. L'influence d'un deuxième lit d'acier qui est électriquement lié au premier est négligeable. Ainsi pour le cas étudié, la simulation du premier lit suffit pour prendre en compte tout le treillis. Il faut également éviter d'injecter le courant au droit des nœuds du treillis d'acier.

CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES

Les méthodes de CND sont utilisées dans le génie civil pour le diagnostic et l'auscultation des structures en béton armé, grâce à leurs avantages par rapport à des techniques destructives. Parmi ces méthodes de CND la mesure de résistivité électrique est une méthode bien connue pour caractériser le béton. La bonne relation entre la résistivité et la teneur en eau est confirmée par différents travaux scientifiques. Pourtant le gradient de teneur en eau du béton est encore peu étudiée alors qu'en réalité il n'existe quasiment pas de structure ayant une teneur en eau homogène. L'objectif de notre travail est d'évaluer le gradient de teneur en eau du béton d'enrobage dans les structures en béton armé, ainsi que l'état électrochimique de l'acier par la mesure de résistivité.

Une nouvelle procédure expérimentale pour la mesure de résistivité a été proposée dans la thèse. En utilisant le dispositif quadripolaire linéaire, la procédure de mesure permet d'obtenir une courbe de potentiel des points en surface au milieu des points d'injection. Cette courbe est ensuite exploitée pour présenter une relation entre la résistivité et la profondeur. Une configuration dite « symétrique » est proposée pour mieux exploiter cette courbe de potentiel afin d'évaluer le gradient de résistivité en fonction de la profondeur. Une simulation numérique est réalisée pour étudier l'effet du gradient de résistivité sur la mesure de résistivité avec cette nouvelle procédure. Deux types de gradients sont considérés : le gradient « séchage » correspond à un modèle ayant une résistivité plus élevée en surface qu'en profondeur et vice versa pour le gradient d'« humidification ». La variation de résistivité en fonction de l'épaisseur est considérée comme linéaire. Le résultat de simulation a montré que cette procédure de mesure est capable de détecter la variation en profondeur de la résistivité d'un matériau. Pour le gradient de « séchage », la courbe de résistivité apparente le montre bien mais dans le cas du gradient d'« humidification », le résultat est significativement moins visible. Il est important de souligner que ces remarques restent dans le cas d'un matériau isotrope ayant un gradient de résistivité vertical. En réalité il est beaucoup plus difficile à détecter le gradient de résistivité dans le cas du béton armé où il y a différents paramètres qui perturbent les mesures.

La résistivité mesurée en surface de la structure auscultée est appelée la résistivité apparente et prend en compte tous les éléments dans la zone auscultée. Cette valeur n'est pas la résistivité réelle du béton d'enrobage et elle est influencée par différents éléments. L'influence de l'acier dans le béton armé sur la mesure de résistivité est justifiée numériquement et expérimentalement. La présence de l'acier diminue fortement la résistivité mesurée. Il s'agit d'un effet de court-circuit, qui confine le courant électrique vers l'acier (infiniment plus conducteur que le béton) lorsque le courant est injecté près de l'acier. Malgré les recommandations, l'influence de l'acier est inévitable selon les études numériques. Une autre source d'erreur rencontrée lors des mesures en surface est la géométrie de la structure auscultée. L'effet de bord augmente sensiblement la résistivité mesurée. Plus les mesures sont réalisées près des bords, plus la résistivité est augmentée par son influence. Par contre l'effet de l'acier est

prépondérant par rapport aux effets de bord. Ces derniers peuvent être affranchis en profitant l'effet de court-circuit par les mesures directement au-dessus de l'acier en créant un chemin favorable pour le courant et réduisant la densité de courant circulant aux bords des corps d'épreuve.

D'autres paramètres en lien avec l'armature influençant la résistivité électrique mesurée sont étudiés expérimentalement et numériquement. L'épaisseur du béton d'enrobage a un impact sur l'effet de court-circuit. Plus l'épaisseur d'enrobage est faible et plus le béton est électriquement résistif, plus la chute de résistivité causée par cet effet est élevée. L'état électrochimique influence également le résultat de certaines mesures. Une étude expérimentale est réalisée de façon à n'étudier que l'impact de l'état de l'acier sur la mesure. Il est observé que la chute de résistivité mesurée au-dessus d'un acier actif est bien plus importante à celle d'un acier passif. Le rapport de la chute de résistivité en pourcentage entre l'acier actif et passif est supérieur à 2.

Les résultats de mesures expérimentales montrent l'intérêt de la procédure pour la recherche du gradient de teneur en eau. L'exploitation de la courbe de potentiel par la configuration symétrique permet d'obtenir une courbe de résistivité en fonction de la distance entre l'électrode de potentiel et l'électrode de courant. Deux types de gradient de teneur en eau sont étudiés : le gradient de séchage et le gradient d'humidification. Même si les mesures sur la face humide, correspondant au gradient d'humidification, montre le gradient de teneur en eau, les mesures sur la face sèche connaissent plus de difficulté d'exploitation. Dans tous les cas, l'effet de séchage du béton peut être observé avec la mesure de résistivité.

Pour la procédure d'inversion des études numériques sont réalisées afin de remonter au gradient de résistivité à partir des résultats expérimentaux. La procédure commence par le modèle sans acier correspondant à la dalle non armée afin de déterminer la résistivité du béton, puis elle continue par le modèle avec acier pour retrouver les paramètres électrochimiques de l'acier avec l'application du modèle Butler-Volmer. Deux états de gradient de teneur en eau sont considérés : un gradient de teneur en eau en phase de stabilisation et un gradient bien établi. Cette procédure a montré son intérêt pour la recherche du gradient de résistivité et donc du gradient de teneur en eau avec un écart inférieur à 10% dans plupart de cas d'étude. La loi empirique qui relie le degré de saturation à la résistivité électrique est utilisée pour la simulation et donne des résultats cohérents. Cela montre qu'il est intéressant d'effectuer une procédure d'inversion afin de remonter au gradient de teneur en eau du béton.

Les résultats de la simulation montrent un rapport entre la densité de courant j_{corr} de l'acier actif et de l'acier passif de 5, ce qui marque un grand écart entre les densités de courant des deux états de corrosion de l'acier. Cette observation est intéressante car elle montre la possibilité de cette procédure de mesure et d'inversion pour étudier également l'état de corrosion de l'acier.

L'influence d'un treillis d'acier sur la mesure de résistivité a également été étudiée par la modélisation numérique. L'injection du courant est réalisée au-dessus de l'acier. Cette étude a pour objectif de déterminer le volume de béton armé et le treillis d'acier à modéliser afin de prendre en compte tous les effets causés par la géométrie de la structure et par l'acier. La présence d'un deuxième lit d'acier électriquement connecté au premier lit n'affecte que très peu la mesure. Il suffit donc de ne simuler qu'un premier lit dans un volume limité d'une structure pour examiner une structure en béton armé avec la nouvelle procédure proposée. Cette étude permet au modélisateur de réduire le temps de calcul et de simplifier la simulation.

Perspectives

Les résultats expérimentaux sont acquis par des essais de laboratoire où les conditions sont bien contrôlées. Pour une meilleure évaluation du béton sur site, des études supplémentaires sont requises. Quelques perspectives peuvent être proposées pour les études futures :

Dans ce travail on a fait l'hypothèse que le gradient de teneur en eau est vertical et varie linéairement. Même si la simulation numérique a montré que cette hypothèse est cohérente, la linéarité du gradient de teneur en eau est à confirmer par des méthodes bien maîtrisées et référencées telles que la gammadensimétrie. La variation horizontale du gradient n'est pas non plus abordée dans la thèse, c'est une piste à creuser dans les futures études. Une cartographie de résistivité pourrait être une solution pour examiner le gradient de teneur en eau dans le sens vertical et horizontal.

L'état de surface de la structure auscultée est important et peut modifier les résultats. La résistance de contact est un vrai problème de mesure. Pour certains bétons, notamment les bétons dégradés, secs et donc très résistifs, la mesure de résistivité en surface est parfois impossible. L'amélioration de la surface de contact pour la mesure est nécessaire. On pourrait par exemple proposer d'enlever localement une fine épaisseur de béton en surface pour rendre la mesure de résistivité possible.

Les mesures de résistivité dans d'autres milieux non contrôlés sont nécessaires. L'influence d'autres paramètres tels que la température sont à considérer afin d'améliorer la méthodologie proposée.

Le béton utilisé dans le travail de thèse est un béton très poreux. Son comportement est donc différent des bétons usuels qui ont dans la plupart des cas une porosité plus faible. Les mesures sur d'autres types de béton sont donc nécessaires pour valider la procédure de mesure proposée.

La procédure d'inversion numérique est encore à optimiser. En effet dans la campagne de mesure on impose et contrôle un gradient de teneur en eau dans le béton. Pour les mesures in situ la détection et la détermination du gradient de teneur en eau seront probablement beaucoup plus complexes. La prise en compte d'un gradient non linéaire doit également être envisagée dans les futurs développements.

Les informations recueillies uniquement par des mesures de résistivité en surface sont sans doute insuffisantes pour caractériser précisément un gradient de teneur en eau. L'utilisation combinée de la résistivité et d'autres techniques de CND sensibles à la teneur en eau (le GPR par exemple) est intéressante pour confirmer l'existence du gradient et donc pour établir un diagnostic plus précis. Une perspective similaire peut être envisagée pour améliorer la connaissance de l'état électrochimique de l'acier en combinant par exemple la méthodologie proposée avec une mesure de résistance de polarisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andrade C., Alonso C. « *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site* ». *Constr. Build. Mater.* [En ligne]. juillet 1996. Vol. 10, n°5, p. 315-328. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00044-5](http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5) >
- Andrade C., Sanjuán M. A., Recuero A., Río O. « *Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments, in non-steady-state conditions* ». *Cem. Concr. Res.* [En ligne]. 1994. Vol. 24, n°7, p. 1214-1228. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90106-6](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(94)90106-6) >
- Archie G. « *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics* ». *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng.* 1942. Vol. 146, p. 54-62.
- Balayssac J.-P., Arliguie G., Klysz G., Fnine A., Lataste J.-F., Dérobert X. « *Evaluation non destructive du béton d'enrobage* ». *Rev. Eur. Génie Civ.* [En ligne]. 2006. Vol. 10, n°8, p. 913-932. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1080/17747120.2006.9692862> >
- Baroghel-Bouny V., Andrade C. « *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction* ». Document scientifique et technique : Association Française de Génie Civil. Juillet 2004.
- Baroghel-Bouny V., Capra B., Laurens S. « *Chapitre 9: La durabilité des armatures et du béton d'enrobage* ». Dans : *Durabilité Bétons*. France : Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 2008. p. 303-385.
- Baron J. (, Ollivier J.-, Desdevises A., Buil M., Detriche C. H., Vernet C., Duval R., Carles-Gibergues A., Pigeon M., Berube M.-, Hornain H., Estoup J.-, Capmas A., Dumas T., Letourneux J.-. « *La durabilité des bétons* ». *Collect. Assoc. Tech. Ind. LIANTS Hydraul.* – *Ecole française des bétons* [En ligne]. 1992. Disponible sur : < <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1008143> >
- Bäßler R., Mietz J., Raupach M., Klinghoffer O. « *Corrosion monitoring sensors for durability assessment of reinforced concrete structures* ». *Proc. SPIE 3988, Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, 32 (April 20, 2000); DOI:10.1117/12.383168. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1117/12.383168> >
- Breysse D., Abraham O. « *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton* ». Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées. Paris, France : Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2005. 560 p.(Association Française de Génie Civil; Confédération Française pour les Essais Non Destructifs). ISBN : 2-85978-405-5.
- Bungey J. H., Millard S. G., Grantham M. G. « *Testing of concrete in structures* ». 4th éd. London and Newyork : Taylor & Francis, 2006. 353 p.ISBN : 0-415-26301-8.
- Cabrera J. G., Ghoddoussi P. « *The influence of fly ash on the resistivity and rate of corrosion of reinforced concrete* ». *Spec. Publ.* 1994. Vol. 145, p. 229-244.
- Carino N. J. « *Nondestructive techniques to investigate corrosion status in concrete structures* ». *J. Perform. Constr. Falicites.* 1999. Vol. 13, n°3, p. 96-106.

Du Plooy R. L. « *The development and combination of electromagnetic non-destructive elevation techniques for the assessment of cover concrete condition prior to corrosion* ». Thèse. France : Université Nantes Angers Le Mans, 2013. 269 p.

Duval R. « *La durabilité des armatures et du béton d'enrobage* ». In : *Durabilité Bétons*. France : Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 1992. ISBN : 2-85978-184-6.

Enevoldsen J. N., Hansson C. M., Hope B. B. « *The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion of steel embedded in concrete and mortar* ». *Cem. Concr. Res.* [En ligne]. 1994. Vol. 24, n°7, p. 1373-1382. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90122-8](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(94)90122-8) >

Fares M., Villain G., Thiery M., Derobert X., Palma Lopes S. « *Estimation of water content gradient and concrete durability indicators using capacitive and electrical probes* ». In : *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*. Berlin, Allemagne : BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, 2015.

Forde M. C., SRI RAVINDRARAJAH, McCarter W. J., Whittington H. W. « *Resistivity characteristics of concrete* ». *ICE Proc.* [En ligne]. 3 janvier 1982. Vol. 73, n°1, p. 223-224. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1680/iicep.1982.1993> >

Garzon A. J., Sanchez J., Andrade C., Rebolledo N., Menéndez E., Fulla J. « *Modification of four point method to measure the concrete electrical resistivity in presence of reinforcing bars* ». *Cem. Concr. Compos.* [En ligne]. octobre 2014. Vol. 53, p. 249-257. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.013> >

Gemert D. V., Janssens H., Rickstal F. V. « *Evaluation of electrical resistivity maps for ancient masonry* ». *Mater. Struct.* [En ligne]. avril 1996. Vol. 29, n°3, p. 158-163. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1007/BF02486161> >

Gowers K. R., Millard S. G. « *Measurement of concrete resistivity or assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique* ». *ACI Mater. J.* 1999. Vol. 96, n°5, p. 536-541.

Gowers K. R., Millard S. G., Bungey J. H. « *The influence of environmental conditions on the measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion durability* ». In : *British Institute of Non-destructive Testing International Conference*. Liverpool University : British Institute of Non-destructive Testing, 1993. p. 633-657. ISBN : 0-903132-20-6.

Hammond E., Robson T. « *Comparison of electrical properties of various cement and concretes* ». *The Engineer (London)*. 1955. Vol. 199, p. 78-80-115.

Hornbostel K., Larsen C. K., Geiker M. R. « *Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review* ». *Cem. Concr. Compos.* [En ligne]. mai 2013. Vol. 39, p. 60-72. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019> >

Keyvani A. « *Electrical resistivity of cement types in reinforced concrete structures of electrically powered transit lines* ». *Int. J. Tech. Phys. Probl. Eng.* septembre 2013. Vol. 5, n°3, p. 96-101.

- Koleva D. A., Copuroglu O., Van Breugel K., Ye G., De Wit J. H. W. « *Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow* ». *Cem. Concr. Compos.* [En ligne]. septembre 2008. Vol. 30, n°8, p. 731-744. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.04.001> >
- Lakshminarayanan V., Ramesh P. S., Rajagopalan S. R. « *A new technique for the measurement of the electrical resistivity of concrete* ». *Mag. Concr. Res.* [En ligne]. 3 janvier 1992. Vol. 44, n°158, p. 47-52. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1680/mac.1992.44.158.47> >
- Langford P., Broomfield J. « *Monitoring the corrosion of reinforcing steel* ». *Constr. Repair.* 1987. Vol. 1, n°2, p. 32-36.
- Lataste J. F. « *Evaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesure de résistivité électrique* ». Thèse de Doctorat. Bordeaux, France : Université de Bordeaux, 2002. 294 p.
- Lataste J. F., Behloul M., Breyse D. « *Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements* ». *NDT E Int.* [En ligne]. décembre 2008. Vol. 41, n°8, p. 638-647. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.03.008> >
- Laurens S., Balayssac J. P., Rhazi J., Klysz G., Arliguie G. « *Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: Experimental study and direct modeling* ». *Mater. Struct.* [En ligne]. 1 novembre 2005. Vol. 38, n°9, p. 827-832. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1007/BF02481655> >
- McCarter W. J., Taha H. M., Suryanto B., Starrs G. « *Two-point concrete resistivity measurements: interfacial phenomena at the electrode-concrete contact zone* ». *Meas. Sci. Technol.* [En ligne]. 2015. Vol. 26, n°8, p. 85007. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/26/8/085007> >
- Medeiros-Junior R. A., Lima M. G. « *Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement* ». *Constr. Build. Mater.* [En ligne]. 15 mars 2016. Vol. 107, p. 11-16. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168> >
- Millard S. G. « *Reinforced concrete resistivity measurement techniques* ». *ICE Proc.* [En ligne]. 3 janvier 1991. Vol. 91, n°1, p. 71-88. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1680/iicep.1991.13583> >
- Millard S. G., Ghassemi M. H., Bungey J. H. « *Assessing the electrical resistivity of concrete structures for corrosion durability studies* ». In : *3rd Symposium on corrosion of reinforcement in concrete construction*. Wishaw : Society of Chemical Industry, 1990.
- Millard S. G., Gowers K. R. « *Resistivity assessment of in-situ concrete: the influence of conductive and resistive surface layers.* » *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.* [En ligne]. 1 novembre 1992. Vol. 94, n°4, p. 389-396. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1680/istbu.1992.21502> >
- Millard S., Harrison J., Edwards A. J. « *Measurement of the electrical resistivity of reinforced concrete structures for the assessment of corrosion risk* ». *Br. J. Non Destr. Test.* 1989. Vol. 31, n°11, p. 617-621.

Morris W., Moreno E. I., Sagüés A. A. « *Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe* ». *Cem. Concr. Res.* [En ligne]. décembre 1996. Vol. 26, n°12, p. 1779-1787. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)00175-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(96)00175-5) >

Morris W., Vico A., Vazquez M., De Sanchez S. R. « *Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements* ». *Corros. Sci.* [En ligne]. janvier 2002. Vol. 44, n°1, p. 81-99. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00033-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00033-6) >

Naar S. « *Évaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographique infrarouge passive* ». Thèse de Doctorat. Bordeaux, France : Université de Bordeaux, Université de Sherbrooke, 2006. 290 p.

Neville A. M. « *Propriétés des bétons* ». 1re éd. Paris, France : Eyrolles, 2000. 824p. ISBN : 978-2-212-01320-7.

Newman J. « *Resistance for flow of current to a disk* ». *J Electrochem Soc.* 1966. Vol. 107, p. 501-502.

Østvik J. M., Larsen C. K., Vennesland Ø., Sellevold E. J., Andrade M. C. « *Electrical resistivity of concrete - Part I: Frequency dependence at various moisture contents and temperatures* ». *2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*. Québec City, Canada : RILEM Publications SARL, 2006. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1617/2351580028.105> > ISBN : 2-35158-003-6.

Polder R., Andrade C., Elsener B., Vennesland Ø., Gulikers J., Weidert R., Raupach M. « *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete* ». *Mater. Struct.* [En ligne]. 1 décembre 2000. Vol. 33, n°10, p. 603-611. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1007/BF02480599> >

Polder R. B. « *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation* ». *Constr. Build. Mater.* [En ligne]. mars 2001. Vol. 15, n°2-3, p. 125-131. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1) >

Polder R. B. « *Chloride diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment* ». *RILEM Int. Workshop Chloride Penetration Concr. 1st RILEM workshop on Chloride Penetration into Concrete*. St Rémy lès Chevreuse, France : RILEM Publications SARL, 1995. p. 225-233. ISBN : 2-912143-00-04.

Presuel-Moreno F., Wu Y.-Y., Liu Y. « *Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time* ». *Constr. Build. Mater.* [En ligne]. novembre 2013. Vol. 48, p. 874-882. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.094> >

Reichling K., Raupach M., Klitzsch N. « *Determination of the distribution of electrical resistivity in reinforced concrete structures using electrical resistivity tomography* ». *Mater. Corros.* [En ligne]. 1 août 2014. Vol. 66, n°8, p. 763-771. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1002/maco.201407763> >

S. Feliu, C. Andrade, J. A. González, C. Alonso. « *A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete* ». *Mater. Struct.* [En ligne]. 1 juillet 1996. Vol. 29, n°6, p. 362-365. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1007/BF02486344> >

Saleem M., Shameem M., Hussain S. E., Maslehuddin M. « *Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete* ». *Constr. Build. Mater.* [En ligne]. avril 1996. Vol. 10, n°3, p. 209-214. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00078-X](http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618(95)00078-X) >

Salehi M. « *Numerical investigation of the effects of cracking and embedded reinforcement on surface concrete resistivity measurements using Wenner probe* ». Rapport de stage. Ottawa, Ontario : Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, 2013.

Salehi M., Ghods P., Isgor O. B. « *Numerical investigation of the role of embedded reinforcement mesh on electrical resistivity measurements of concrete using the Wenner probe technique* ». *Mater. Struct.* [En ligne]. 17 décembre 2014. Vol. 49, n°1-2, p. 301-316. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0498-x> >

Sengul O., Gjorv O. E. « *Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction* ». *ACI Mater. J.* 2008. Vol. 106, n°6, p. 541-547.

Sirieix C., Lataste J.-F., Breysse D., Frappa M. « *Caractérisation de l'endommagement du béton par mesures électriques* ». *Mater. Struct.* [En ligne]. 1 mai 2002. Vol. 35, n°4, p. 204-210. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1007/BF02533081> >

Sohail M. G. « *Corrosion of Steel in Concrete: Development of an Accelerated Test by Carbonation and Galvanic Coupling* ». Thèse de Doctorat. Toulouse, France: Université de Toulouse, 2013.

Sohail M. G., Laurens S., Deby F., Balayssac J. P. « *Significance of macrocell corrosion of reinforcing steel in partially carbonated concrete: numerical and experimental investigation* ». *Mater. Struct.* 2015. 2015. Vol. 48, p. 217-233.

Song G. « *Theoretical analysis of the measurement of polarisation resistance in reinforced concrete* ». *Cem. Concr. Compos.* [En ligne]. décembre 2000. Vol. 22, n°6, p. 407-415. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00040-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00040-8) >

Soutsos M. N., Bungey J. H., Millard S. G., Shaw M. R., Patterson A. « *Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing* ». *NDT E Int.* [En ligne]. septembre 2001. Vol. 34, n°6, p. 419-425. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00009-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00009-3) >

Sriravindrarajah R., Swamy R. N. « *Development of a conductivity probe to monitor setting time and moisture movement in concrete* ». *Cem. Concr. Aggreg. CCAGDP.* Winter 1982. Vol. 4, n°2, p. 73-80.

Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E. « *Applied Geophysics* ». 2nd éd. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 770 p.(Cambridge University Press). ISBN : ISBN 0-521-32693-1.

Thierry M., Villain G., Dangla P., Platret G. « *Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics* ». *Cem. Concr. Res.* [En ligne]. juillet 2007. Vol. 37, n°7, p. 1047-1058. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.002> >

Tuutti K. « *Corrosion of steel in concrete* ». Stockholm, Suède: Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. ISBN: 1982 0346-6906.

Villain G., Sbartai Z. M., Lataste J. F., Garnier V., Derobert X., Abraham O., Bonnet S., Balayssac J. P., Nguyen N. T., Fares M. « *Characterization of Water Gradients in Concrete by Complementary NDT Methods* ». *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*. Berlin, Allemagne : BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, 2015.

Wedding P., Woelfl G., Lauer K. « *The Electrical Resistivity of Concrete with Emphasis on the Use of Electrical Resistance for Measuring Moisture Content* ». *Cem. Concr. Aggreg.* [En ligne]. 1979. Vol. 1, n°2, p.64. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1520/CCA10405J> >

Wen S., Chung D. D. L. « *Uniaxial compression in carbon fiber-reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions* ». *Cem. Concr. Res.* [En ligne]. février 2001. Vol. 31, n°2, p.297-301. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00438-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00438-5) >

Whittington H. W., McCarter J., Forde M. C. « *The conduction of electricity through concrete* ». *Mag. Concr. Res.* 1981. Vol. 33, n°144, p. 48-60.



AUTEUR : Anh Quan NGUYEN

TITRE : Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique

DIRECTEURS DE THESE : Jean-Paul BALAYSSAC, Gilles KLYSZ, Fabrice DEBY

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : Université Toulouse III – Paul Sabatier, le 13 décembre 2016

RESUME :

Nous proposons une nouvelle procédure de mesure permettant de tracer la courbe de résistivité en fonction de l'écartement électrode de courant-électrode de potentiel relié à la profondeur d'investigation et au gradient de teneur en eau. Les mesures de résistivité au droit des armatures sont réalisées et une procédure d'inversion permettant de remonter au gradient de résistivité est mise en place. Deux types de mesures ont été effectués expérimentalement, sur des dalles en béton armé et non armée. Deux types de gradient sont étudiés : le séchage et l'humidification. La présence de l'armature diminue significativement la résistivité à cause d'un effet de court-circuit. Les mesures montrent l'intérêt de la procédure pour l'étude du gradient de teneur en eau. Pour la partie numérique la simulation a montré que la mesure de résistivité permet effectivement de déterminer le gradient de résistivité et de définir les paramètres électrochimiques de l'acier via le modèle de Butler-Volmer.

MOTS-CLES : Contrôle non destructif, gradient de teneur en eau, résistivité électrique, état de corrosion, inversion numérique.

ABSTRACT :

We propose a new measurement procedure that allows drawing a resistivity curve as a function of the spacing between current electrode and potential electrode which is linked to the investigation depth and the water content gradient. The resistivity measurements above the rebars are performed and an inversion procedure to assess the resistivity gradient is carried out. For the experimental part two kinds of measurement are performed on concrete slabs (reinforced and unreinforced). Two gradient types are studied: drying and wetting. The presence of the reinforcement significantly decreases the measurement of the resistivity. The measurements show the interest of the proposed procedure for the study of the water content gradient. Two measurement results were considered in numerical analyses. The simulation shows that it is possible to assess the resistivity gradient and the electrochemical parameters of the rebar via the Butler-Volmer model.

KEYWORDS: Non-destructive evaluation, water content gradient, electrical resistivity, corrosion state, numerical inversion.

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE :

Docteur de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, spécialité : Génie Civil

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE :

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)
INSA/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil
31077 Toulouse cedex 04 France