



HAL
open science

Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons

Joanna Badr

► To cite this version:

Joanna Badr. Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons. Matériaux composites et construction. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2019. Français. NNT : 2019TOU30153 . tel-02735810

HAL Id: tel-02735810

<https://theses.hal.science/tel-02735810>

Submitted on 2 Jun 2020

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.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Joanna BADR

le jeudi 24 octobre 2019

Titre :

Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie civil

Unité de recherche :

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse

Directeur/trice(s) de Thèse :

Jean-Paul BALAYSSAC et Géraldine VILLAIN

Jury :

M. Patrice RIVARD, Pr. Université de Sherbrooke, Rapporteur

M. Jean-François LATASTE, Mcf. Université de Bordeaux, Rapporteur

Mme Colette SIRIEIX, Pr. Université de Bordeaux, Examineur

M. Cyrille FAUCHARD, D.R. CEREMA Normandie Centre, Examineur

M. Yannick FARGIER, C.R. IFSTTAR Site de Bron, Examineur

M. Sérgio PALMA LOPES, Chercheur IFSTTAR Site de Nantes, Examineur

M. Jean-Paul BALAYSSAC, Pr. Université de Toulouse, Directeur de thèse

Mme Géraldine VILLAIN, D.R. IFSTTAR Site de Nantes, Co-directrice de thèse

Remerciements

Après trois années de thèse réalisées entre le laboratoire LMDC à Toulouse et le laboratoire LAMES – MAST – IFSTTAR à Nantes, je souhaite remercier tous ceux qui par leur aide et leur soutien ont contribué à la réussite de ce projet.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse Jean-Paul Balayssac, ma co-directrice Géraldine Villain et mes encadrants Yannick Fargier, Sérgio Palma Lopes et Fabrice Deby pour leurs conseils et leurs encouragements pendant les trois ans de thèse et pour l'immense partage de connaissances sur des thématiques aussi variées. La confiance qu'ils m'ont accordée ainsi que le soutien scientifique et moral qu'ils ont manifesté à mon égard m'ont permis d'accumuler des expériences professionnelles et personnelles marquantes.

Je tiens évidemment à remercier l'ANDRA d'avoir financé cette thèse et tout particulièrement Sylvie Lesoille pour son suivi régulier, sa vision dynamique du sujet de thèse et toutes les discussions qui ont guidé et renforcé la construction de la présente thèse. Je remercie également Xavier Bourbon pour sa vision de la recherche et pour ses discussions enrichissantes.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des membres du jury pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à l'évaluation de ce manuscrit. Je remercie les rapporteurs, Patrice Rivard et Jean-François Lataste pour leurs relectures attentives et leurs commentaires constructifs. Je remercie également le président du Jury, Cyrille Fauchard, et l'examineur Colette Sirieix. Par leurs remarques et critiques constructives, les membres du jury ont contribué à une discussion enrichissante vis-à-vis des perspectives sur le sujet.

Je remercie également Alain Sellier, directeur du LMDC, et Pierre Hornych, directeur de LAMES, qui m'ont accueillie dans leur laboratoire afin que je puisse y effectuer mes travaux de recherche. Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers l'ensemble du personnel technique des deux laboratoires et plus particulièrement à Carole Soula et Jean-Luc Geffard pour toute l'aide dont j'ai pu bénéficier au cours de ma campagne expérimentale.

Je remercie Elie Mahfoud d'avoir participé à travers son stage de Master aux résultats expérimentaux de ce travail.

Je remercie mes collègues doctorants qui ont fait de ces trois années une expérience inoubliable, en me dévoilant une partie de leur culture et de leurs intérêts parmi lesquels Chantal, Marianne, Reine,

Marie-Antoinette, Hiba, Dany, Mohamed, Thomas, Florent, Teuku, Laurent, Rahma, Khodor, Diana, Benjamin, Natacha, Rodrigo.... et tant d'autres.

Finalement, je ne peux clôturer ces quelques mots sans mentionner le grand support de ma famille et de mon fiancé, depuis le Liban, durant ces années de thèse et antérieures. Merci ktir !

Résumé

Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons

La résistivité électrique est un paramètre sensible à différentes propriétés du béton, dont la teneur en eau qui est l'un des principaux indicateurs gouvernant sa durabilité. Dans cette étude, la problématique du suivi du profil de teneur en eau du béton sur toute son épaisseur est abordée en utilisant une méthode électrique à courant continu comme méthode de mesure. Cette problématique revêt une grande importance pour les structures de stockage en béton utilisées pour les déchets radioactifs et pour les applications nécessitant une résolution spatiale centimétrique de la mesure du profil de teneur en eau sur une grande épaisseur. L'objectif de cette thèse est de concevoir et de réaliser des capteurs multi-électrodes noyés dans des structures en béton pour évaluer le profil de résistivité dans leur épaisseur afin de remonter au profil de teneur en eau. L'étude porte sur la conception de deux capteurs (Echelle et Anneau) sous la forme de circuits imprimés, ce qui présente plusieurs avantages, en particulier la précision géométrique et la limitation de l'encombrement des câblages afin d'une part d'augmenter la durabilité des capteurs et d'autre part de réduire leur caractère invasif. Différentes configurations de mesure sont analysées et comparées. Une modélisation numérique de la réponse électrique des capteurs et de leur capacité à évaluer un profil de résistivité imposé est réalisée ainsi que l'influence des armatures métalliques sur la réponse des capteurs placés au centre de la maille d'armature. Des validations expérimentales à la fois dans des solutions salines de conductivité connue et sur des échantillons de béton soumis au séchage sont également mises en œuvre. Les résultats démontrent la capacité des capteurs à évaluer les profils de résistivité dans le béton avec une résolution centimétrique. Pour changer d'échelle et s'approcher des conditions de mesure sur des structures réelles, les capteurs sont intégrés dans deux dalles de béton armé de 30 cm d'épaisseur instrumentées par d'autres capteurs afin de comparer les résultats. Enfin, une calibration des mesures est réalisée pour remonter au profil de teneur en eau en tenant compte de la température. Les profils de degré de saturation obtenus avec les capteurs innovants développés dans cette thèse sont encadrés par les profils obtenus par des mesures de référence (capteurs thermohygrométriques THR et gammadensimétrie) et donnent des résultats cohérents avec l'évolution due au séchage du béton.

Mots clés : Capteurs noyés, teneur en eau, monitoring, résistivité électrique, structures en béton armé, modélisation par éléments finis.

Abstract

Design and validation of an embedded electrical resistivity sensor to monitor water content profiles in concrete

Electrical resistivity is a parameter sensitive to various properties of concrete, including water content, which is one of the key parameters governing concrete long-term durability. In this study, the problem of monitoring the concrete water content profile throughout the concrete structure thickness is addressed using a method based on DC-electrical resistivity measurements. This is of great importance for concrete repository structures used for radioactive waste and for applications requiring centimetric resolution of the water content profile over a thick structure. The aim of this thesis is to design and produce a novel multi-electrode embedded sensor for monitoring the resistivity profile over depth in order to estimate the water content profile. The study focuses on the design of two sensors based on printed circuit board (PCB), which brings several advantages, including geometric accuracy and mitigation of wiring issues, in order to increase the durability of the sensors and to reduce invasiveness. Different measurement configurations are analyzed and compared. In addition, numerical modeling of the sensor response and its ability to assess an imposed resistivity profile is carried out, as well as the influence of the steel reinforcement on the response of the sensors placed in the center of the reinforcement mesh. Experimental validations using saline solutions of known conductivity and concrete specimens subjected to drying are studied. The results demonstrate the capability of the sensor to evaluate resistivity profiles in concrete with centimetric resolution. To enlarge our scale and approach real structures, the sensors are embedded in two 30 cm thick concrete slabs instrumented by other sensors to compare the results. Calibration of the measurements is carried out to determine the water content profile taking the temperature into account. The saturation degree profiles obtained with the innovative sensors developed in this thesis are compared to the profiles obtained from reference measurements (thermohygrometric sensors and gammadensimetry) and give consistent results with the evolution of the concrete due to drying.

Keywords: Embedded sensors, water content, monitoring, DC-electrical resistivity, reinforced concrete structures, finite element modeling.

Table des matières

Remerciements	1
Résumé	3
Abstract	4
Chapitre 1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique et objectifs de recherche	2
1.3 Organisation du mémoire.....	3
Chapitre 2 Incidence de la teneur en eau du béton sur la durabilité des ouvrages	5
2.1 Hydratation et réactions pouzzolaniques	5
2.2 L'eau dans le béton	7
2.3 Durabilité des structures en béton armé.....	9
2.3.1 Corrosion des armatures	10
2.3.2 Carbonatation	11
2.3.3 Pénétration des ions chlorures	12
2.3.4 Réactions de gonflement interne.....	13
2.3.4.1 Réaction alcali-granulat RAG	13
2.3.4.2 Réaction sulfatique interne RSI.....	13
2.4 Conclusions.....	14
Chapitre 3 Caractérisation hydrique du béton par méthodes non destructives et capteurs noyés.....	15
3.1 Limites des méthodes destructives pour la caractérisation hydrique du béton	16
3.2 Méthodes de référence pour la caractérisation hydrique du béton	17
3.2.1 Sondes thermo-hygrométriques	18
3.2.2 Gammadensimétrie	18
3.3 Méthodes électromagnétiques pour la caractérisation hydrique du béton	19
3.3.1 Sondes capacitives	19
3.3.2 Méthode radar (Ground Penetrating Radar (GPR)).....	20
3.3.3 Réflectométrie temporelle.....	21
3.3.4 Cellule coaxiale cylindrique	22

3.4	Méthode électrique à courant continu	23
3.4.1	Base théorique de la résistivité électrique.....	23
3.4.2	Principe de mesure à courant continu	25
3.4.3	Techniques de mesure de la résistivité électrique.....	27
3.4.3.1	Cellule de caractérisation de la résistivité électrique en laboratoire	28
3.4.3.2	Méthodes de mesure surfaciques utilisées in situ.....	29
3.4.3.3	Techniques de mesure par des capteurs noyés	30
3.4.4	Sensibilité à des indicateurs de durabilité.....	32
3.4.4.1	Teneur en eau	32
3.4.4.2	Teneur en ions chlorures	33
3.4.4.3	Tortuosité et coefficient de diffusion	35
3.5	Facteurs d'influence sur la mesure de résistivité électrique	35
3.5.1	Effet des constituants du béton armé	35
3.5.1.1	Ciment et additions minérales	36
3.5.1.2	Armatures métalliques.....	36
3.5.1.3	Corrosion des armatures.....	38
3.5.2	Effet de la température	41
3.6	Conclusion	44
Chapitre 4	Développement d'un dispositif de mesures de profils de résistivité.....	45
4.1	Etude numérique préliminaire.....	46
4.1.1	Procédure de modélisation numérique.....	46
4.1.2	Modèle vrai choisi.....	47
4.1.3	Synthèse des dispositifs d'électrodes étudiés	49
4.1.4	Etude paramétrique pour le dimensionnement des dispositifs.....	51
4.1.4.1	Influence de la dimension des électrodes pour le dispositif Wenner	52
4.1.4.2	Influence de l'espacement entre les électrodes pour le dispositif Wenner	53
4.1.4.3	Influence des dimensions des plaques ou grilles métalliques du dispositif Barrette.....	53
4.1.4.4	Influence du support des électrodes pour le dispositif Barrette	56
4.1.4.5	Influence de la présence des armatures	57
4.1.5	Conclusion partielle	60
4.2	Etudes expérimentales préliminaires des dispositifs dans un béton	61
4.2.1	Dispositif Wenner	61

4.2.2 Dispositif Barrette	63
4.2.3 Conclusion partielle : limitations et choix des dispositifs	65
4.3 Réalisation et validation des dispositifs Echelle et Anneau.....	65
4.3.1 Choix du matériau.....	65
4.3.1.1 Matériaux constitutifs des électrodes	66
4.3.1.2 Matériau constitutif du support	67
4.3.2 Géométrie.....	67
4.3.2.1 Dispositif Echelle	67
4.3.2.2 Dispositif Anneau.....	68
4.3.3 Configurations de mesure	69
4.3.3.1 Dispositif Echelle	69
4.3.3.2 Dispositif Anneau.....	71
4.3.4 Reconstruction numérique du profil de résistivité.....	72
4.3.5 Validation en solution	75
4.3.5.1 Test des dispositifs en solution.....	76
4.3.5.2 Répétabilité, reproductibilité et sensibilité des dispositifs	77
4.3.6 Validation dans le béton.....	80
4.3.6.1 Test des dispositifs dans les éprouvettes cylindriques de béton.....	80
4.3.6.2 Répétabilité, reproductibilité et sensibilité des dispositifs	81
4.3.7 Vérification du contact électrique entre électrodes et béton	85
4.4 Conclusion	87
Chapitre 5 Programme expérimental	89
5.1 Méthode de détermination d'un profil de degré de saturation à partir de mesures de résistivité.....	89
5.2 Conception des expériences	91
5.3 Caractéristiques des bétons	92
5.3.1 Formulation des bétons	92
5.3.2 Répartition des corps d'épreuve.....	93
5.3.3 Propriétés et reproductibilité des bétons	95
5.4 Conception des dalles instrumentées	97
5.4.1 Instrumentation des dalles HA et FV	97
5.4.2 Nomenclature des dispositifs	101

5.4.3 Conditions d'exposition et échéances de mesure.....	102
5.4.4 Configurations de mesure	103
5.4.5 Facteurs géométriques	106
5.5 Résistivimètres et métrologie.....	110
5.6 Calibration de la résistivité	111
5.6.1 Protocole expérimental	111
5.6.2 Calibration avec la cellule cylindrique de résistivité	112
5.6.3 Calibration avec le dispositif Echelle	115
5.6.4 Comparaison des courbes de calibration.....	119
5.7 Calibration de la permittivité	120
5.8 Isothermes de désorption	122
5.9 Conclusion	125
Chapitre 6 Suivi du séchage par des profils de degré de saturation obtenus par les dispositifs noyés	127
6.1 Profils de résistivité apparente dans les éprouvettes cylindriques	127
6.2 Caractérisation des systèmes de mesure dans les dalles en béton armé	130
6.2.1 Répétabilité et reproductibilité des mesures avec le dispositif Echelle	130
6.2.1.1 Répétabilité du dispositif Echelle.....	130
6.2.1.2 Comparaison entre profils mesurés côté droit et côté gauche du dispositif Echelle.....	132
6.2.1.3 Reproductibilité entre les dispositifs Echelle côté droit et côté gauche de chaque dalle.....	134
6.2.2 Répétabilité et reproductibilité du dispositif Anneau	136
6.2.2.1 Répétabilité du dispositif Anneau	136
6.2.2.2 Reproductibilité du dispositif Anneau.....	137
6.2.3 Influence des armatures	139
6.2.4 Comparaison des différentes configurations de mesure du dispositif Echelle	140
6.2.5 Comparaison des résistivimètres.....	141
6.3 Profils de résistivité apparente des dispositifs Echelle en cure.....	144
6.4 Profils de résistivité apparente des dispositifs Echelle pendant le séchage	146
6.5 Monitoring du séchage.....	152

6.5.1 Profils de degré de saturation obtenus avec le dispositif Echelle dans les éprouvettes de béton.....	153
6.5.2 Profils de degré de saturation obtenus avec les dispositifs Echelle dans la dalle FV	154
6.5.3 Profils de degré de saturation obtenus par des mesures de référence	156
6.5.3.1 Mesures d’humidité relative avec les capteurs THR noyés dans les dalles de béton.....	156
6.5.3.2 Mesures de gammadensimétrie sur les éprouvettes	159
6.5.3.3 Comparaison des profils obtenus avec les capteurs THR et le gammadensimètre.....	160
6.5.4 Comparaison des profils de degré de saturation obtenus avec les dispositifs Echelle et les mesures de référence	161
6.6 Conclusions.....	165
Chapitre 7 Conclusions et perspectives.....	167
7.1 Principaux résultats obtenus et enseignements tirés	167
7.2 Perspectives.....	170
Bibliographie.....	173
Annexe A – (Badr et al., 2018).....	189
Annexe B	201
Annexe C	209
Annexe D	211
Annexe E - Liste des publications et communications réalisées au cours de la thèse	213

Liste des Figures

Figure 2-1 Schématisation des types d'eau associés aux C-S-H (Feldman and Sereda, 1968).....	8
Figure 2-2 Courbe-type de teneur en eau en fonction de l'humidité relative montrant l'hystérésis entre les isothermes de désorption et d'adsorption (Baroghel-Bouny, 1994) (RH = HR).....	9
Figure 2-3 Courbe-type de la corrosion des armatures en fonction du temps (Tuutti, 1982).....	11
Figure 2-4 Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures (Duval, 1992).....	12
Figure 3-1 Electrodes ponctuelles en surface d'un modèle homogène semi-infini : (a) utilisation d'une source de courant C_1 et représentation de la distribution des équipotentielles, (b) une configuration à 4 points (Telford et al., 1990).....	25
Figure 3-2 Illustration du principe de mesure de résistivité en transmission	28
Figure 3-3 Dispositif multi-anneaux développé dans la thèse de Du Plooy (2013).....	29
Figure 3-4 Schéma du principe des mesures de résistivité sur la surface par dispositif multi-électrodes de tomographie de résistivité électrique (TRE) (Du Plooy, 2013).....	30
Figure 3-5 Multi-ring electrodes MRE : (a) Vue du capteur, (b) Résistance mesurée en fonction du temps et de la profondeur (Bässler et al., 2000).....	31
Figure 3-6 Réseau de fils (électrodes) : (a) vue du capteur, (b) profils de conductivité mesurés en fonction des cycles de séchage et d'humidification (McCarter et al., 2001).....	32
Figure 3-7 Résistivité apparente en fonction du temps d'immersion dans l'eau de la	33
Figure 3-8 Relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau, pour différentes concentrations en ions Cl^- , dans les bétons (Saleem et al., 1996).....	34
Figure 3-9 Résistivité apparente mesurée sur dalles submergées dans de l'eau à différentes concentrations en NaCl (T1-T7 représente le temps d'immersion dans l'eau avec T1 étant	34
Figure 3-10 Effet de la présence d'armatures sur les mesures de résistivité apparente dans le béton armé pour différents âges du béton : 29 et 265 jours (r_1 est la distance entre l'électrode d'injection du courant et l'électrode de mesure du potentiel) (Nguyen et al., 2017).....	37
Figure 3-11 Comparaison entre la résistivité apparente expérimentale et numérique pour la dalle armée en fonction de l'espacement des électrodes à différentes échéances de temps. (avec $T_1=T_0+1h$, $T_2=T_0+4h$, $T_3=T_0+18h$ et $T_4=T_0+38h$) (Alhajj et al., 2019).....	38
Figure 3-12 Courbes-types de polarisation des systèmes de corrosion active et passive (Laurens et al., 2016).....	41
Figure 3-13 Variation de la résistivité électrique du béton avec sa température (Millard, 1991).....	41
Figure 3-14 Courbe de correction des effets de la température sur la résistance électrique du béton (Spencer, 1937) dans (Woelfl and Lauer, 1979).....	43
Figure 4-1 Organigramme présentant la méthodologie suivie dans ce chapitre.....	45
Figure 4-2 Procédure de simulation numérique	47

Figure 4-3 Profil de résistivité électrique dans le modèle numérique par une fonction de type Weibull en fonction de la profondeur.	48
Figure 4-4 Vue schématique des dispositifs : (a) Wenner, (b) Anneau, (c) Barrette.	49
Figure 4-5 Vues schématiques de la section (x, z) de la dalle dans le modèle numérique avec : (a) le Dispositif Wenner, (b) le Dispositif Anneau, (c) le Dispositif Barrette.	50
Figure 4-6 Profils de résistivité apparente simulée en fonction de la profondeur pour les dispositifs Anneau, Wenner et Barrette, superposés sur le profil « vrai » de résistivité.....	51
Figure 4-7 Profil de la résistivité apparente simulée en fonction de la profondeur pour le dispositif Wenner pour des électrodes ponctuelles et cylindriques par rapport au profil de résistivité vraie dans la dalle.	52
Figure 4-8 Variation de la résistivité apparente en fonction de la profondeur pour le dispositif Wenner pour différents espacements inter-électrodes par rapport au profil de résistivité vraie.	53
Figure 4-9 Schématisation de l'étude numérique des tailles de plaques ou grilles du dispositif Barrette avec les dimensions L et e variables : (a) vue 3D du modèle avec grilles, (b) tableau simplifié des paramètres variables.	54
Figure 4-10 Vue 2D de la répartition du potentiel électrique entre deux plaques de dimension L = 30 cm pour le Dispositif Barrette.....	55
Figure 4-11 Visualisation de lignes de courant dans le volume de la dalle :(a) injection du courant entre deux plaques de dimension L = 30 cm, (b) injection du courant entre deux électrodes ponctuelles.	55
Figure 4-12 Profil de la résistivité apparente en fonction de la profondeur : (a) pour différentes dimensions des plaques, (b) pour différentes dimensions des mailles de grilles.....	56
Figure 4-13 Géométrie et dimensions du support isolant pour le dispositif Barrette dans la simulation numérique.....	57
Figure 4-14 Profil de la résistivité apparente en fonction de la profondeur pour différentes dimensions du support isolant.	57
Figure 4-15 Détails géométriques de la simulation du dispositif Barrette (avec plaques) dans la dalle armée, avec un maillage d'armatures de 40 cm x 40 cm : (a) vue 3D oblique, (b) vue 3D de face (en perspective).	58
Figure 4-16 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur dans la dalle armée : (a) pour un maillage d'armatures de 40 cm x 40 cm, (b) pour un maillage d'armatures de 20 cm x 20 cm.....	59
Figure 4-17 Vue des 3 dispositifs Wenner respectivement à 2 cm, 6 cm et 10 cm de profondeur dans le récipient cubique dans lequel le béton a été coulé par la suite.	61
Figure 4-18 Profils de résistivité apparente mesurée en fonction du temps avec les dispositifs Wenner noyés à 2 cm, 6 cm et 10 cm dans le béton.	62
Figure 4-19 Dispositif Barrette : (a) plans avec ses dimensions (mm), (b) Photo.....	63

Figure 4-20 Dispositif Barrette et grille d'injection de courant : (a) Vue du dispositif Barrette dans une éprouvette 11x22 cm, (b) Plan de la grille métallique en acier inox avec ses dimensions (mm).....	64
Figure 4-21 Dispositif Echelle : (a) plan du dispositif, (b) photo du dispositif.....	68
Figure 4-22 Dispositif Anneau : (a) plan du dispositif, (b) photo du dispositif.	69
Figure 4-23 Schéma des configurations de mesure avec le dispositif Echelle : (a) configuration Transmission, (b) configuration Wenner.....	70
Figure 4-24 Calcul de sensibilité dans un milieu homogène: (a) configuration Transmission, (b) configuration Wenner.....	71
Figure 4-25 Schémas des différentes configurations d'interrogation d'électrodes pour le dispositif Anneau.	72
Figure 4-26 Modélisation numérique de la réponse des dispositifs à un profil de résistivité vraie avec une vue 3D des lignes de courant : (a) dispositif Echelle, (b) dispositif Anneau.....	73
Figure 4-27 Profils de résistivité apparente simulés et comparés au profil de résistivité vraie: (a) en utilisant les configurations Transmission et Wenner du dispositif Echelle, (b) en utilisant les configurations (Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre) du dispositif Anneau.....	74
Figure 4-28 Profils de résistivité apparente simulés et comparés au profil de résistivité vraie en utilisant les configurations (Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre) du dispositif Anneau.....	75
Figure 4-29 Photos des dispositifs testés dans une solution de NaCl : (a) dispositif Echelle, (b) dispositif Anneau.....	76
Figure 4-30 Profils de résistivité en fonction de la profondeur pour le dispositif Echelle (configurations Transmission et Wenner) et de la résistivité de la solution obtenue par la sonde de conductivité (l'incertitude de la sonde étant indiquée par une bande de couleur) : (a) solution 2, (b) solution 3, (c) solution 4, (d) solution 5.....	78
Figure 4-31 Profils de résistivité en fonction de la position azimutale de l'électrode C1 d'injection de courant du dispositif Anneau (configurations Wec_a2, Q_I12, Q_I16, Q_Carre) et de la résistivité obtenue par la sonde de conductivité (l'incertitude de la sonde étant mise en couleur) : (a) solution 2, (b) solution 3, (c) solution 4, (d) solution 5.....	79
Figure 4-32 Corrélation entre la résistivité mesurée avec la sonde de conductivité commerciale et la résistivité mesurée : (a) dispositif Echelle, (b) dispositif Anneau.	80
Figure 4-33 Photos des dispositifs dans les éprouvettes : (a) dispositif Echelle, (b) dispositifs Anneau.	81
Figure 4-34 Profil de résistivité apparente en fonction de la profondeur dans des conditions saturées : (a) en utilisant les configurations Transmission et Wenner pour le cylindre E1 du dispositif Echelle, (b) en utilisant les configurations (Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre) pour le cylindre An1 du dispositif Anneau.....	83

Figure 4-35 Profil de résistivité apparente en fonction de la profondeur dans des conditions saturées en utilisant: (a) la configuration Transmission du dispositif Echelle, (b) la configuration Wec_a2 du dispositif Anneau.....	84
Figure 4-36 Vues de l'éprouvette E7 de béton fendu : (a) vue générale du circuit imprimé et des grilles, (b) zoom sur les électrodes (en haut) et leurs empreintes dans le béton (en bas).....	86
Figure 5-1 Schéma de la méthodologie permettant d'obtenir un profil de degré de saturation à partir de mesures de résistivité apparente.....	90
Figure 5-2 Schéma de principe de la méthodologie utilisée dans ce travail pour obtenir un profil de degré de saturation à partir de mesures de résistivité apparente à cœur.....	91
Figure 5-3 Répartition des gâchées numérotées du bas vers le haut dans les dalles expérimentales : (a) dalle FV, (b) dalle HA.....	94
Figure 5-4 Schéma détaillé de la dalle FV (dimensions en cm).....	97
Figure 5-5 Vue des mailles d'armatures en fibre de verre (avant coulage) et du capteur TDR implémenté dans la dalle FV.....	98
Figure 5-6 Dispositif Echelle à 28 électrodes.....	98
Figure 5-7 Schéma des dimensions (mm) des grilles en acier inox noyées dans les dalles et servant d'électrodes d'injection de courant pour le capteur Echelle.....	99
Figure 5-8 Vue des dispositifs noyés dans les corps d'épreuve avec leur connecteur DB37 : (a) série de 4 dispositifs Anneau, (b) 1 dispositif Echelle à 28 électrodes.....	99
Figure 5-9 Vue de la face latérale de la dalle HA, recouverte de papier aluminium, montrant 5 capteurs THR (Honeywell) implantés dans la dalle.....	100
Figure 5-10 Vue des moules des dalles avant coulage, avec lits d'armatures et instrumentation : (a) dalle HA, (b) dalle FV.....	100
Figure 5-11 Annotation des dispositifs dans les dalles HA et FV.....	101
Figure 5-12 Vue de la dalle HA recouverte de papier aluminium pour la génération du profil unidirectionnel de teneur en eau.....	102
Figure 5-13 Historique de conservation des dalles FV et HA.....	103
Figure 5-14 Schéma des configurations de mesure avec le dispositif Echelle : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.....	105
Figure 5-15 Schémas des différentes configurations d'interrogation d'électrodes pour le dispositif Anneau.....	106
Figure 5-16 Géométrie 3D des dispositifs dans les dalles armées pour le calcul des facteurs géométriques sous COMSOL Multiphysics : (a) Dispositif Echelle, (b) Dispositifs Anneau.....	107
Figure 5-17 Facteur géométrique en fonction de la profondeur des électrodes interrogées pour le dispositif Echelle pour les configurations : (a) Trans, (b) Wen, Q_I12, Q_Crois et Q_I13.....	108

Figure 5-18 Facteur géométrique en fonction de la position angulaire (tous les 45°) de l'électrode C1 d'injection du courant pour le dispositif Anneau et pour les configurations : (a) Wec_a2, (b) Q_I12, (c) Q_I16, (d) Q_Carre, (e) Q_I19.....	109
Figure 5-19 Profil mesuré avec le dispositif Echelle FV_Ed au cours d'une période de 372 jours de séchage à 45°C en utilisant la configuration Transmission : (a) de la résistance électrique, (b) de la résistivité apparente.....	110
Figure 5-20 Courbe de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation pour le béton d'étude en utilisant différents résistivimètres : (a) SYSCAL Pro, (b) Terrameter LS, (c) TIGRE, (d) comparaison des moyennes sur toutes les gâchées pour les 3 appareils	113
Figure 5-21 Courbe de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation en comparant les trois résistivimètres pour différents bétons : (a) béton de référence, (b) comparaison entre béton de référence et béton d'étude.	114
Figure 5-22 Profils de la résistivité apparente en fonction de la profondeur avec le dispositif Echelle E1 à T = 20 °C pour les configurations : (a)(b) Trans, (c)(d) Wen.	116
Figure 5-23 Courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle à différentes températures en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.....	117
Figure 5-24 Courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle en comparant toutes les configurations : (a)(b) T = 20 °C, (c)(d) T = 45 °C.	118
Figure 5-25 Courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle à 20 °C et la cellule cylindrique de résistivité : (a) pour tous les degrés de saturation testés, (b) sans le degré de saturation le plus bas ($Sr= 34\%$).....	119
Figure 5-26 Courbes de calibration de la permittivité (33 MHz) en fonction du degré de saturation pour différents bétons : (a) béton d'étude, (b) béton de référence.	121
Figure 5-27 Courbes de calibration de la permittivité (950 MHz) en fonction du degré de saturation pour différents bétons : (a) béton d'étude, (b) béton de référence.	121
Figure 5-28 Vue d'un dessiccateur dans une enceinte à 45°C.....	123
Figure 5-29 Vue de quelques échantillons utilisées dans les isothermes de désorption.....	123
Figure 5-30 Courbes isothermes de désorption : (a) gâchées G1 à G7 à T = 20 °C, (b) moyenne des gâchées à T = 20 °C et T = 45 °C.....	124
Figure 5-31 Courbes expérimentales et numériques des isothermes de désorption à T = 20 °C et T = 45 °C.....	125
Figure 6-1 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur en utilisant la configuration Transmission au cours du séchage de l'éprouvette E6 : (a) à 20 ° C, (b) à 45 ° C.	128
Figure 6-2 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur en utilisant la configuration Wenner au cours du séchage de l'éprouvette E6 : (a) à 20 ° C, (b) à 45 ° C.	129

Figure 6-3 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur en utilisant le dispositif Anneau au cours du séchage de l'éprouvette An1 à 20 ° C.....	129
Figure 6-4 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec le dispositif Echelle en utilisant la configuration Transmission (droite et gauche du dispositif) :(a) Etat saturé, côté gauche de FV, (b)Etat non saturé, côté gauche deFV, (c) Etat saturé, côté droit de FV, (d)Etat non saturé, côté droit de FV.	133
Figure 6-5 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec le dispositif Echelle en utilisant la configuration Wenner (droite et gauche du dispositif) à différents degrés de saturation : (a) Etat saturé, côté gauche de FV, (b) Etat non saturé, côté gauche de FV, (c) Etat saturé, côté droit de FV, (d) Etat non saturé, côté droit de FV.	134
Figure 6-6 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec les dispositifs Echelle à droite et à gauche de la dalle FVen utilisant la configuration Transmission : (a) à l'état saturé, (b) aux états saturé et non saturé.....	135
Figure 6-7 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec les dispositifs Echelle à droite et à gauche de la dalle FV en utilisant la configuration Wenner : (a) à l'état saturé, (b) aux états saturé et non saturé.	135
Figure 6-8 Comparaison des résistivités apparentes mesurées avec les dispositifs Anneau A1, A2, A3 et A4 du côté gauche de la dalle FV en utilisant la configuration Wec_a2 : (a) à l'état saturé, (b) aux états saturé et non saturé.....	138
Figure 6-9 Comparaison des résistivités apparentes mesurées entre les Anneau A1/2, A2/3 et A3/4 du côté gauche de la dalle FV en utilisant la configuration Q_I19 : (a) à l'état saturé, (b) aux états saturé et non saturé.	139
Figure 6-10 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec les dispositifs Echelle dans les dalles HA et FV à l'état saturé : (a) Configuration Transmission, (b) Configuration Wenner.	139
Figure 6-11 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec les dispositifs Echelle Ed dans les dalles HA et FV aux états saturé et non saturé en utilisant toutes les configurations : (a) dalle HA à t0, (b) dalle HA à t'0+90jours, (c) dalle FV à t0, (d) dalle FV à t'0+372 jours.....	141
Figure 6-12 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur du dispositif Ed dans la dalle FV à t0+21jours en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.	142
Figure 6-13 Zoom sur les grilles d'injection : (a) dalle FV (grille affleurant en surface), (b) Eprouvette E4 (grille noyée en surface).....	143
Figure 6-14 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant la cure pour le dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois.....	144

Figure 6-15 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant la cure de l'éprouvette E1 du dispositif Echelle en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois.....	145
Figure 6-16 Evolutions des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant le séchage à 20 °C du dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.	147
Figure 6-17 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant le séchage à 20 °C du dispositif Ed dans la dalle HA en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.	148
Figure 6-18 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant le séchage à 45 °C du dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.	149
Figure 6-19 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant le séchage à 45 °C du dispositif Ed dans la dalle HA en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.	152
Figure 6-20 Evolution du profil de degré de saturation en fonction de la profondeur dans l'éprouvette E6 en configuration Trans pendant le séchage : (a) à 20 °C, (b) à 45 °C.....	153
Figure 6-21 Evolution du profil de degré de saturation en fonction de la profondeur dans l'éprouvette E6 en configuration Wen pendant le séchage : (a) à 20 °C, (b) à 45 °C.	154
Figure 6-22 Evolution du profil de degré de saturation en fonction de la profondeur pendant le séchage à 45 °C du dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.....	155
Figure 6-23 Variation du profil d'humidité relative obtenu avec les capteurs THR dans la dalle HA en fonction du temps de séchage aux températures : (a) T = 20 °C, (b) T = 45 °C	156
Figure 6-24 Variation du profil d'humidité relative obtenu avec les capteurs THR dans la dalle FV en fonction du temps de séchage aux températures: (a) T = 20 °C, (b) T = 45 °C	157
Figure 6-25 Variation du profil d'humidité relative obtenu avec les capteurs THR dans la dalle FV pendant les 7 premiers jours de séchage à 45 °C.....	157
Figure 6-26 Profils de degré de saturation obtenus par conversion des mesures d'HR au moyen des courbes de désorption pour la dalle HA et pour les températures de séchage: (a) T = 20 °C, (b) T = 45 °C.....	158
Figure 6-27 Profils de degré de saturation obtenus par conversion des mesures d'HR au moyen des courbes de désorption pour la dalle FV et pour les températures de séchage : (a) T = 20 °C, (b) T = 45 °C.....	158
Figure 6-28 Variation relative de densité en fonction de la profondeur lors du séchage de l'éprouvette γ_2 : (a) à 20 °C, (b) à 45 °C.....	160

Figure 6-29 Evolution du degré de saturation en fonction de la profondeur lors du séchage de l'éprouvette γ_2 : (a) à 20 ° C, (b) à 45 ° C.....	160
Figure 6-30 Comparaison entre les profils de degré de saturation obtenus avec les capteurs THR et le gammadensimètre lors du séchage de la dalle FV à t'0+232 jours.	161
Figure 6-31 Variation du degré de saturation en fonction de la profondeur lors du séchage de la dalle FV à t'0+232 jours.	162
Figure 6-32 Courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle à T = 45 °C en utilisant la configuration Trans : Moy, Min et Max.....	163
Figure 6-33 Comparaison des profils de degré de saturation (Moy, Min et Max) obtenus par mesures des résistivités apparentes du dispositif Echelle avec les profils obtenus avec le gammadensimètre et les capteurs THR pour la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.....	164

Liste des Tableaux

Tableau 3-1 Valeurs-types des paramètres électrochimiques de l'acier pour une zone active et une zone passive (Laurens et al., 2016).	40
Tableau 4-1 Ecart moyen entre les résistivités apparentes simulées dans les modèles avec armature et le modèle sans armature	59
Tableau 4-2 Valeurs des résistivités et des coefficients de dilatation pour différents métaux (extrait de : « Resistivity and temperature coefficient at 20 °C », http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/Tables/rstiv.html)	66
Tableau 4-3 Caractéristiques des cinq électrolytes utilisés	77
Tableau 4-4 Résistivité électrique mesurée avec la sonde de conductivité et avec les dispositifs Echelle et Anneau en configurations Transmission et Wenner pour les 5 solutions.	77
Tableau 4-5 Résistivité apparente mesurée avec le dispositif Anneau A1 en configurations Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre aux différentes profondeurs à l'état saturé.	83
Tableau 4-6 Calcul des incertitudes des mesures obtenues par les dispositifs Echelle et Anneau à l'état saturé pour toutes les configurations	84
Tableau 5-1 Formulations de référence et d'étude	92
Tableau 5-2 Liste des coulages réalisés	93
Tableau 5-3 Répartition des noms des éprouvettes utilisant les dispositifs Echelle et Anneau.	93
Tableau 5-4 Répartition des éprouvettes pour les essais de porosité, Rc et E, les isothermes, la gammadensimétrie et la calibration.....	94
Tableau 5-5 Caractéristiques des sept gâchées de béton du coulage 4	96
Tableau 5-6 Caractéristiques des bétons des six coulages différents	96
Tableau 5-7 Répartition des éprouvettes de calibration de la résistivité en utilisant la cellule cylindrique.....	112
Tableau 5-8 Coefficients des courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation pour les configurations Trans et Wen à T = 20 °C	115
Tableau 5-9 Coefficients des courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation pour différentes configurations.....	119
Tableau 5-10 Répartition des éprouvettes de calibration de permittivité.....	120
Tableau 5-11 Humidités relatives auxquelles sont soumis les échantillons (NFX 15.015)...	123

Tableau 6-1 Résistivités apparentes mesurées à l'état saturé t_0 avec les dispositifs Echelle pour toutes les configurations dans les dalles HA et FV.....	130
Tableau 6-2 Résistivités électriques apparentes mesurées à un état non saturé avec les dispositifs Echelle pour toutes les configurations dans les dalles HA et FV.	131
Tableau 6-3 Résistivités électriques apparentes mesurées à l'état saturé (à t_0) avec le dispositif A3 pour différentes configurations dans les dalles HA et FV.....	136
Tableau 6-4 Résistivités électriques apparentes mesurées à un état non saturé avec le dispositif A3 pour différentes configurations dans les dalles HA et FV.....	136
Tableau 6-5 Résistivités électriques apparentes mesurées avec le dispositif multi-électrodes surfaciques (peigne d'électrodes) (Du Plooy et al., 2013) sur les 2 faces de la dalle FV.....	151
Tableau 6-6 Durée de cure, de séchage à 20 °C et de séchage à 45 °C des éprouvettes γ_1 , γ_2 et de la dalle FV	159

Quelques notations et expressions

Porosité globale ϕ :

$$\phi = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}} = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{hydro})}$$

Taux de saturation S_r :

$$S_r = \frac{\text{volume d'eau}}{\text{volume des vides}} = \frac{(M_t - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sec})}$$

Teneur en eau massique w :

$$w = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse sèche}} = \frac{(M_t - M_{sec})}{M_{sec}}$$

Teneur en eau volumique W :

$$W = \frac{\text{volume d'eau}}{\text{volume total}} = \frac{(M_t - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{hydro})} = w \frac{\rho_{sec}}{\rho_{eau}} = \phi S_r$$

avec :

- M_{sec} la masse sèche,
- M_{sat} la masse saturée,
- M_t la masse à un instant t quelconque,
- M_{hydro} la masse par pesée hydrostatique.

Chapitre 1 Introduction

1.1 Contexte

La mission principale de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) est de gérer les déchets radioactifs français pour protéger les générations présentes et futures et leur environnement des nuisances potentielles de ces déchets. C'est donc une mission de développement durable. Pour cela, l'agence recense, collecte et assure le stockage définitif des déchets radioactifs. Pour les déchets à vie longue, l'Andra mène le projet Cigéo, Centre industriel de stockage en formation géologique profonde, pour assurer le confinement des déchets les plus dangereux sur le très long terme (<https://www.andra.fr/cigeo>). Le concept de stockage repose sur le principe de défense en profondeur, avec des barrières de confinement successives. Les déchets de Moyenne Activité à Vie Longue (MAVL) seront placés dans des conteneurs de colis de déchets en béton, puis dans des alvéoles de stockage en béton, dans un milieu géologique (argilite) sélectionné pour sa très faible perméabilité, son épaisseur (>100 m) et sa profondeur (>500 m). Ces ouvrages de stockage en béton seront soumis à des conditions environnementales différentes tout au long de leur durée de vie. En effet, certains déchets radioactifs sont exothermiques et génèrent une élévation de température pouvant atteindre une cinquantaine de degrés Celsius à l'intérieur des alvéoles de stockage. Au cours de l'exploitation, un système de ventilation sera mis en place, ensuite arrêté lorsque l'alvéole sera fermée. La ventilation provoquera un séchage du béton environnant générant ainsi un gradient de teneur en eau, qui conditionne le développement des principales détériorations des structures en béton armé entraînant des modifications dans la durabilité à long terme des structures. Suivre le gradient de teneur en eau du béton est donc primordial pour comprendre d'une part les transferts entre argilite et béton et pour conforter d'autre part la durabilité des structures de Cigéo.

La détermination de la teneur en eau de bétons en utilisant les méthodes non destructives (ND) a fait l'objet de plusieurs études (Balayssac and Garnier, 2017; Fares et al., 2018; Kaplanvural et al., 2018; Minagawa et al., 2017). Parmi ces méthodes ND, les méthodes électriques à courant continu, qui donnent accès à la résistivité électrique du matériau, sont particulièrement sensibles à la teneur en eau dans le béton.

Les méthodes électriques qui sont mises en œuvre à partir de la surface présentent des résolutions réduites vis-à-vis de l'épaisseur du béton des alvéoles MAVL, de l'ordre de 60 cm, quand la profondeur d'investigation ne dépasse généralement pas quelques centimètres. De plus, elles subissent des contraintes de mise en œuvre pouvant nuire à la pérennité du contact, en particulier.

Dans ce travail, nous abordons spécifiquement le moyen de mesurer le profil de teneur en eau du béton avec une résolution spatiale centimétrique, sur des épaisseurs pluridécimétriques de béton, sur des durées pluridécennales, sans possibilité d'accéder à l'ouvrage dès que les colis de déchets radioactifs sont en place, et avec des conditions environnementales sévères. Ces éléments ont motivé la conception d'un système de mesure dont la partie sensible, le capteur, serait noyé dans le béton.

1.2 Problématique et objectifs de recherche

La teneur en eau du béton étant un marqueur important de la durabilité de certains ouvrages de génie civil, la problématique principale de cette étude est de concevoir et de réaliser un système de mesure de la teneur en eau de structures épaisses en béton (cas de notre application : structures de stockage des déchets radioactifs de 60 cm d'épaisseur) pour estimer des gradients sur toute l'épaisseur et les suivre au cours du temps en utilisant une méthode de résistivité électrique. Pour répondre à cette problématique, nous fixons plusieurs objectifs scientifiques et de recherche.

Le premier objectif est de concevoir numériquement un dispositif noyé de mesure distribuée de la résistivité permettant de remonter à un profil de résistivité dans une structure en béton. Il s'agit de déterminer plusieurs géométries possibles (formes et positions des électrodes de potentiel et d'injection) pour sélectionner celles qui semblent les plus adaptées à l'application, du point de vue des volumes investigués et de la résolution spatiale souhaitée centimétrique (tous les 1 cm sur les cinq premiers centimètres puis un point tous les cinq centimètres). Il serait souhaitable que ces dispositifs permettent de s'affranchir de l'inversion pour convertir les mesures directement en profils de degrés de saturation pour une application industrielle directe. En outre, le développement de cette chaîne de mesure devra prendre en compte certaines contraintes liées au caractère plus ou moins invasif des dispositifs noyés dans la structure en béton, à la métrologie (l'influence de la longueur de câbles reliant les dispositifs

aux différents types de résistivimètres), à la création possible des chemins préférentiels d'infiltration d'eau depuis la surface, à la présence des armatures métalliques pouvant perturber les mesures.

Le deuxième objectif est de valider expérimentalement les dispositifs retenus par la modélisation numérique. Pour cela, la démarche retenue est itérative : (i) évaluer la chaîne de mesure en testant la réponse dans des solutions de conductivité connue (milieu homogène, valeur de résistivité maîtrisée), (ii) tester dans le milieu d'emploi, c'est-à-dire dans des éprouvettes en béton de petites dimensions dont le protocole de réalisation est maîtrisé, puis (iii) évaluer la variabilité des mesures, l'impact de la mise en œuvre et l'impact des armatures en instrumentant deux dalles en béton armé à l'échelle ½ (30 cm d'épaisseur), l'une armée avec des barres en acier carbone (HA), l'autre avec des barres en fibre de verre (FV). Ces tests réalisés sur milieux homogènes puis sur des corps d'épreuve présentant des gradients de teneur en eau, permettant de tester la sensibilité des capteurs en déterminant les profils de résistivité électrique en fonction de la profondeur. Les mesures ainsi acquises sont comparées aux modélisations, d'une part, et à d'autres technologies de mesure, d'autre part. Ces étapes progressives visent à cerner les performances et limites des systèmes conçus et développés.

Le troisième objectif est de proposer une méthodologie de calibration permettant de remonter aux profils de teneur en eau en fonction de la profondeur. En effet, au-delà des mesures brutes de résistivité, une qualification de la chaîne de mesure conçue nécessite d'atteindre le paramètre visé, l'indicateur de durabilité de l'ouvrage. La démarche retenue consiste en une comparaison des profils de teneur en eau obtenus avec des mesures de référence.

1.3 Organisation du mémoire

Ce mémoire est composé de 5 chapitres principaux.

Après ce premier chapitre introductif, le Chapitre 2 présente des éléments bibliographiques sur les paramètres de composition du béton ainsi que sur ses différentes pathologies. Les principales causes de dégradations des structures en béton armé affectant sa durabilité sont également présentées ainsi que l'impact de l'eau sur leurs évolutions.

Le Chapitre 3 introduit les différentes méthodes ND utilisées pour l'auscultation des ouvrages en béton armé, plus particulièrement la méthode électrique à courant continu, très sensible à la

teneur en eau, et retenue pour cette thèse. Ce chapitre se focalise sur l'effet des constituants du béton et l'effet de la température sur les mesures de résistivité électrique.

Le Chapitre 4 présente le développement d'un dispositif multi-électrodes permettant de suivre le profil de résistivité sur l'épaisseur de la structure en béton. La conception numérique du dispositif de mesure de résistivité électrique pour la caractérisation d'un profil de résistivité dans une structure en béton et les essais expérimentaux préliminaires associés sont détaillés. Ensuite, la conception de deux dispositifs retenus grâce à la modélisation numérique et réalisés en circuit imprimé est explicitée. Enfin, une double campagne expérimentale a été menée, tout d'abord par des essais dans des solutions homogènes de conductivité connue et ensuite par des essais sur des éprouvettes en béton pour vérifier la sensibilité des dispositifs proposés.

Le Chapitre 5 détaille la campagne expérimentale sur des maquettes à l'échelle $\frac{1}{2}$ qui a été menée dans le cadre de ce projet. Deux dalles armées d'épaisseur 30 cm sont réalisées, en noyant les capteurs de résistivité conçus dans le cadre de cette thèse, pour déterminer les profils de teneur en eau en fonction de la profondeur. Le principe des mesures et les méthodes d'interprétation sont présentés. En parallèle, la conversion du profil de résistivité en profil de teneur en eau nécessite une procédure de calibration sur éprouvettes. La méthodologie utilisée pour obtenir les courbes de calibration en fonction de la température et du degré de saturation du béton est détaillée.

Le Chapitre 6 présente les profils de résistivités apparentes mesurés sur les dalles par nos systèmes de mesure lors du séchage du béton, ainsi que les profils de degrés de saturation obtenus en utilisant les courbes de calibration établies dans le Chapitre 5. Ces profils sont comparés à des profils obtenus par des méthodes de référence (capteurs thermohygrométriques THR et gammadensimétrie).

Enfin le Chapitre 7 synthétise les principaux résultats et propose des perspectives concernant les capteurs, la calibration, la durabilité à long terme de la chaîne de mesure, l'inversion...

Chapitre 2 Incidence de la teneur en eau du béton sur la durabilité des ouvrages

Le béton est un matériau hétérogène ayant des propriétés physiques et chimiques qui peuvent être ajustées avec sa formulation. Ces propriétés physiques et chimiques sont le fruit des réactions chimiques qui accompagnent la prise du béton et sa maturation. Dans son état frais, le béton s'apparente à un fluide visqueux, mélange d'eau, de ciment et de granulats. Cependant, il est important de réaliser que la microstructure du béton durci est très complexe en raison de diverses réactions qui ont lieu au cours du temps. La microstructure évolue avec le degré d'hydratation du ciment donc avec le temps et les conditions environnementales.

La durabilité d'une structure en béton caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage du béton pour lesquelles il a été conçu. La durabilité n'est donc pas une propriété intrinsèque du béton, mais elle est plutôt associée au maintien de certaines propriétés du matériau, sur la durée de vie de la structure depuis sa conception, dans les conditions environnementales qui peuvent varier au fil du temps.

Comme l'objectif principal de notre travail est d'obtenir les profils de teneur en eau en fonction de la profondeur dans les structures en béton, nous nous intéressons au rôle de l'eau dans ces matériaux. En effet, la teneur en eau est un des principaux paramètres gouvernant, en particulier, la durabilité des ouvrages. Nous présenterons donc dans ce chapitre les paramètres de composition du béton ainsi que ses différentes pathologies. Nous discuterons également des principales causes de dégradations des structures en béton armé caractérisant la durabilité du béton et l'impact de l'eau sur ces évolutions.

2.1 Hydratation et réactions pouzzolaniques

Diverses réactions chimiques ont lieu au cours de la prise de béton et de sa maturation. À la suite de la réaction d'hydratation, il se forme une pâte de ciment durcie qui lie les agrégats entre eux formant ainsi le béton hydraulique (Neville, 1997). Le principal constituant du ciment Portland est le clinker, mélange de calcaire et d'argile, calciné à 1 500 °C, broyé et mélangé avec du gypse pour former le ciment de type CEM I. A ce ciment « Portland », on peut ajouter des composés minéraux plus ou moins réactifs pour aboutir à des ciments

possédant des propriétés différentes. On trouve des composés hydrauliques (laitier de hauts fourneaux) ou pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice ou plus rarement des pouzzolanes naturelles). Dans certains cas, des « fillers » siliceux ou calcaires peuvent aussi être ajoutés.

D'un point de vue élémentaire, les principaux constituants du clinker sont :

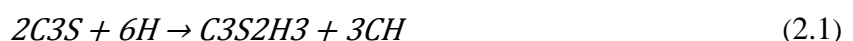
- oxyde de calcium CaO (noté C en utilisant la notation cimentaire),
- oxyde de silicium SiO_2 (noté S),
- oxyde d'aluminium Al_2O_3 (noté A),
- oxyde de fer Fe_2O_3 (noté F),
- eau H_2O (noté H).

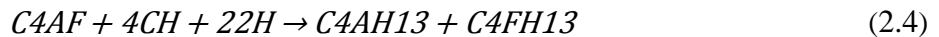
Lors de la cuisson en cimenterie, ces oxydes forment des composés dont les principaux sont :

- silicate tricalcique (noté C_3S) (60 à 65%),
- silicate bicalcique (noté C_2S) (20 à 25%),
- aluminat tricalcique (noté C_3A) (8 à 12%),
- aluminoferrite tétracalcique (noté C_4AF) (8 à 12%).

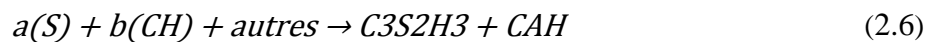
Lors de l'hydratation du ciment Portland ordinaire (OPC – CEM I selon les normes européennes ; EN197), les silicates de calcium dans le ciment réagissent avec l'eau (équations (2.1) et (2.2)) pour former les silicates de calcium hydratés ($C-S-H$) constituant la phase la plus importante dans le ciment (60 à 70% de la pâte cimentaire) et qui est responsable de l'essentiel des propriétés physiques. L'hydratation des silicates de calcium produit aussi une quantité importante de Portlandite (hydroxyde de calcium cristallisé (CH) - 20 à 30% de la pâte cimentaire). La dissolution des oxydes alcalins contenus dans le ciment génère un milieu très alcalin ($pH > 12,5$), nécessaire au développement des hydrates constitutifs du ciment hydraté.

L'alcalinité de la solution porale joue un rôle essentiel à la fois dans la stabilité chimique et physique du béton et dans le maintien des armatures en acier à l'état passif. Les hydroxydes de calcium réagissent encore avec les aluminates et les aluminoferrites (comme dans les équations (2.3) et (2.4)) pour former des produits qui ne contribuent pas de manière significative à la résistance mécanique, mais qui contribuent à réduire la porosité du ciment (Addis et al., 2001).





L'addition de laitiers de hauts fourneaux au ciment Portland peut augmenter la densité et la résistance mécanique du matériau et diminuer sa porosité, en augmentant la proportion de CSH formés.



avec $(C+S)$ les laitiers de hauts fourneaux, a et b des coefficients stœchiométriques.

2.2 L'eau dans le béton

Les trois principaux constituants du béton sont : le ciment, les granulats et l'eau. Les granulats constituent le squelette du béton. Leurs caractéristiques physiques les plus importantes sont la porosité, la forme et la texture qui influencent les propriétés du béton (Mehta and Monteiro, 2006). Le ciment et l'eau conditionnent sa microstructure complexe affectant les propriétés mécaniques du béton et sa durabilité. Une partie de l'eau prend part à l'hydratation du ciment et le reste se retrouve dans la solution interstitielle. L'eau dans le béton peut être classifiée de la manière suivante (Baroghel-Bouny, 1994; Feldman and Sereda, 1968) (Figure 2-1) :

- l'eau chimiquement liée aux hydrates (par exemple ions hydroxyles dans la portlandite),
- l'eau adsorbée à la surface des hydrates liée par des forces de type Van der Waals,
- l'eau « libre » présente dans les pores de taille supérieure à quelques dizaines de nm,
- l'eau capillaire présente dans un réseau plus large et située loin de la surface des pores pour ne pas être dans le champ d'influence des forces superficielles.

La porosité, comprenant tous les pores du matériau, est généralement supérieure à 10% pour un béton ordinaire (Baroghel-Bouny, 1994). On distingue trois types de pores :

- les pores interconnectés formant un espace connecté dans le milieu poreux et participant au transport de matière à travers le matériau,

- les pores aveugles interconnectés d'un seul côté et accessibles à un fluide extérieur sans participer au transport de matière,
- les pores isolés ne communiquant pas avec le milieu extérieur.

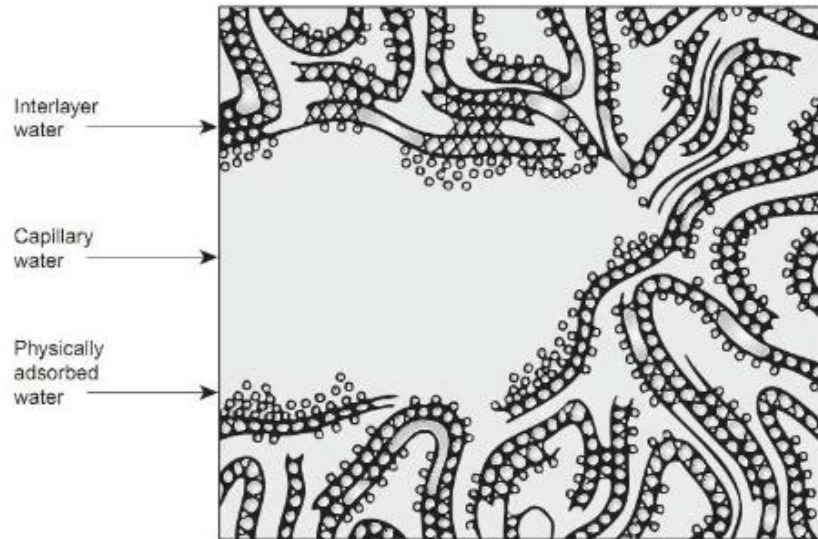


Figure 2-1 Schématisation des types d'eau associés aux C-S-H (Feldman and Sereda, 1968).

La porosité accessible (ou ouverte) rassemble les deux catégories de pores interconnectés et aveugles. Comme le volume des pores isolés est négligeable dans le béton hydraulique, on considère que la porosité globale ϕ est égale à la porosité accessible.

Les isothermes de désorption et d'adsorption sont caractéristiques de la microstructure poreuse du béton (Baroghel-Bouny, 1994). Elles traduisent l'équilibre entre la teneur en eau w et l'humidité relative (HR). La relation dépend de la température et elle est définie dans des conditions où l'humidité relative ambiante est en équilibre avec l'humidité relative dans les pores du béton. Cette relation dépendant d'une augmentation de l'humidité relative (isotherme d'adsorption) ou d'une diminution (isotherme de désorption) est marquée par une forte hystérésis comme le montre la Figure 2-2. C'est un phénomène complexe lié à une modification de la structure même du réseau poreux lors du séchage ou de l'humidification, avec des variations de tortuosité, de constrictivité et de connectivité.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons les principales causes de dégradations des structures en béton armé caractérisant la durabilité du béton.

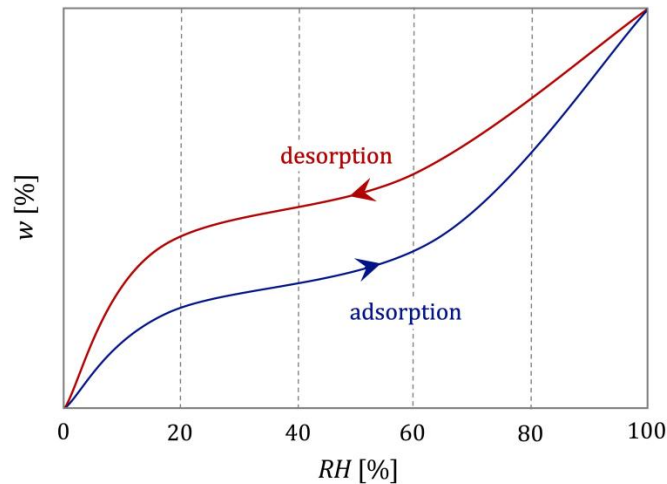


Figure 2-2 Courbe-type de teneur en eau en fonction de l'humidité relative montrant l'hystérésis entre les isothermes de désorption et d'adsorption (Baroghel-Bouny, 1994) ($RH = HR$).

2.3 Durabilité des structures en béton armé

Les agents agressifs pour le béton et les armatures pénètrent dans le béton par les pores. Cette pénétration est plus ou moins favorisée par leur taux de saturation S_r . Ainsi, si l'on veut prédire la dégradation du béton, il est important de mesurer la porosité ϕ et la teneur en eau massique w ou volumique W du matériau.

Pour une gestion optimisée d'un ouvrage, la durabilité physique garantissant une stabilité mécanique de l'ouvrage doit être prise en considération au cours de la conception du matériau, de l'exécution de l'ouvrage et du suivi de son état (Baroghel-Bouny, 2004). Les principales dégradations des structures en béton armé sont dues à la corrosion des armatures, elle-même déclenchée par les phénomènes de carbonatation, de pénétration des ions chlorures ainsi que par les réactions de gonflement interne, sachant que ces causes ne sont pas indépendantes. Les dégradations physiques en relation avec la corrosion des armatures sont dues à la dépassivation des aciers provoquée par une modification des conditions physico-chimiques à l'interface acier/béton, souvent liée au type d'exposition environnementale (température, humidité relative, sels de déverglaçage, eau de mer, etc.) (Sarja et al., 2004). Le paramètre conditionnant le développement de ces dégradations est la teneur en eau du béton.

2.3.1 Corrosion des armatures

Le principal facteur nécessaire à l'initiation de la corrosion est la teneur en eau. Les réactions chimiques ainsi que la pénétration des agents agressifs dans le béton nécessitent la présence d'eau. Par ailleurs, les produits issus de la corrosion (en particulier les oxydes et hydroxydes de fer) ont un volume supérieur à celui de l'acier sain. Par conséquent, les contraintes induites peuvent provoquer des fissurations dans le béton diminuant ainsi l'adhérence acier/béton, ainsi que provoquer l'éclatement du béton d'enrobage (Baron et al., 1992; Nguyen et al., 2007; Zhang et al., 2010). Les principales conséquences de la corrosion sont la perte de section de l'armature, de ductilité de l'acier et d'adhérence acier-béton qui vont conduire à une dégradation des propriétés physiques et mécaniques des matériaux et des dégâts sur l'ouvrage avec une perte de capacité portante. La corrosion de l'armature en acier est donc considérée comme la dégradation la plus importante du béton armé (Bertolini et al., 2013; Montemor et al., 2003; Rostam, 2005). Evaluer la teneur en eau dans le béton et son gradient permet donc de repérer les zones potentiellement à risque pour la corrosion et contribue donc à un meilleur diagnostic des ouvrages.

En général, la corrosion a lieu en deux phases, selon le modèle de Tuutti (1982) (Figure 2-3). La première phase est la phase d'amorçage (ou initiation) pendant laquelle des agents agressifs tels que les ions chlorures et le dioxyde de carbone pénètrent dans la couche de béton d'enrobage. Bien qu'il n'y ait pas de détérioration notable au cours de cette étape, le front de chlorures ou de carbonatation atteint finalement l'armature en acier. À la fin de cette période, la couche de passivation des aciers, composée principalement des hydroxydes et des oxydes de fer, est détruite et la corrosion passe en mode « actif » de corrosion avec un accroissement très important des cinétiques de corrosion. La deuxième phase est la phase de propagation pendant laquelle la corrosion se produit à une cinétique déterminée par la nature de la solution électrolytique des pores et par la quantité d'oxygène présente. L'état limite ultime de la structure est quasiment atteint lorsque les endommagements tels que l'écaillage, la fissuration et la perte de capacité structurelle due à la réduction de la section d'acier conduisant à la ruine, commencent à se produire. Dans la Figure 2-3, le point A marque la fin de la première phase d'amorçage et le point D marque la destruction de l'enrobage, à partir de laquelle l'acier se dégrade plus rapidement.

Pour la corrosion en relation avec la présence de chlorures en milieu aéré, la phase de propagation est souvent plus courte que la phase d'initiation. On peut donc supposer que la

durée de vie de la structure est déterminée par la durée de la période d'initiation qui est ensuite utilisée comme état limite ultime dans la conception probabiliste de structures en béton (Baroghel-Bouny et al., 2009).

En raison de la contribution significative des problèmes de corrosion à la durabilité, de nombreuses recherches ont été menées sur les mécanismes de transport facilitant la corrosion (Garboczi, 1990). Cela a conduit à l'élaboration d'indicateurs de durabilité liés à ces mécanismes (Baroghel-Bouny et al., 2009; Bertolini et al., 2013; Tuutti, 1982) afin de prévoir l'initiation de la corrosion (teneur en eau, teneur en ions chlorures, tortuosité et coefficient de diffusion...).

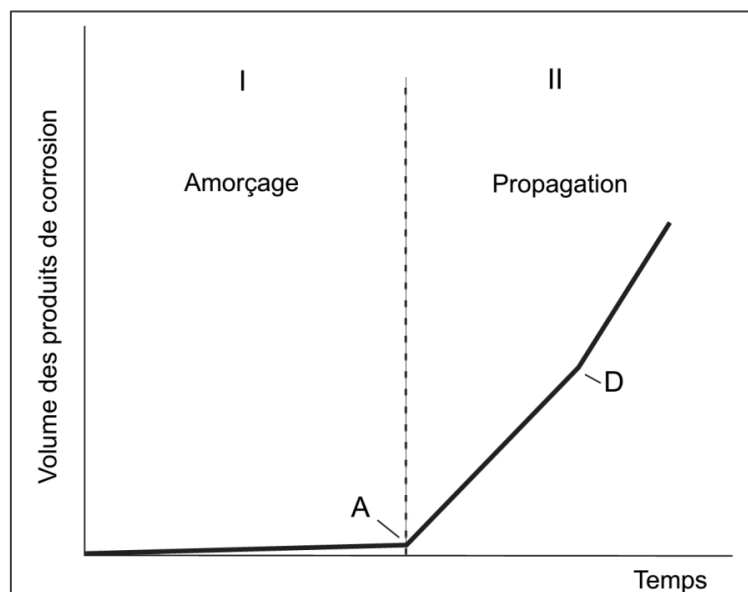


Figure 2-3 Courbe-type de la corrosion des armatures en fonction du temps (Tuutti, 1982).

2.3.2 Carbonatation

Le dioxyde de carbone CO_2 , présent sous forme gazeuse dans l'air, pénètre dans les pores du béton. Cette pénétration est d'autant plus rapide que le béton est poreux, perméable aux gaz et peu saturé en eau. Ce gaz se dissout dans l'eau interstitielle et réagit avec le ciment pour former des carbonates de calcium $CaCO_3$. La consommation de la portlandite et la formation des ions HCO_3^- et CO_3^{2-} abaissent la concentration ionique en ions OH^- et entraînent une diminution de la porosité due à la différence de volume molaire entre $Ca(OH)_2$ et $CaCO_3$ (Thierry, 2005). Cependant, les ions OH^- étant consommés pendant la réaction, le pH de la solution interstitielle du béton diminue, le film passif des aciers devient instable puis disparaît

et le risque de corrosion des armatures augmente. L'eau libérée par la réaction contribue également à créer un environnement favorable à la corrosion.



La vitesse de carbonatation dépend des caractéristiques du matériau (porosité, nature du ciment, etc.) mais aussi des conditions du milieu environnant (le taux de CO_2 dans l'air, l'humidité relative, la température). La réaction est maximale pour une humidité relative autour de 50%-70% (Wierig, 1984). Cette plage d'humidité est fortement dépendante de la formulation du matériau et de la nature du ciment (Baroghel-Bouny, 2004; Drouet, 2010).

2.3.3 Pénétration des ions chlorures

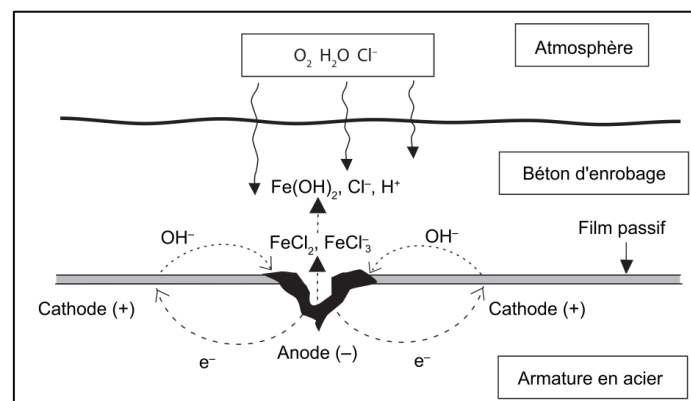


Figure 2-4 Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures (Duval, 1992).

La pénétration des ions chlorures dans le béton se fait par diffusion dans la zone saturée sous l'effet d'un gradient de concentration entre le milieu environnant et le béton. Une partie des ions chlorures se trouve sous forme ionique (libre) dans la solution interstitielle du béton et une autre partie « fixée » (ou liée) car elle a réagi avec les hydrates du ciment. L'ensemble constitue les chlorures totaux. On considère que seuls les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépasseivation et de corrosion des armatures. Les ions Cl^- réagissent avec certains produits de corrosion, déstabilisent les couches de produits de corrosion formés et peuvent activer la corrosion en mettant la surface du fer dans des conditions de corrosion active (Baroghel-Bouny, 2004; François et al., 2018). Dans certains

cas, ce type de corrosion se développe de manière très localisée et peut conduire à une réduction de section telle que l'acier est amené à se rompre (Baron et al., 1992) (Figure 2-4).

2.3.4 Réactions de gonflement interne

Les réactions de gonflement interne sont parmi les causes possibles de dégradation des ouvrages en béton. Parmi celles-ci figurent la réaction alcali-granulat RAG et la réaction sulfatique interne RSI. Cette dernière se distingue de la réaction sulfatique externe qui est provoquée par des apports extérieurs de sulfates alors que les sulfates internes proviennent du ciment.

2.3.4.1 Réaction alcali-granulat RAG

Les alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton peuvent réagir avec une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau, déclenchant ainsi le phénomène d'alcali-réaction (Baroghel-Bouny, 2004; Larive, 1997). En l'absence de précautions, cette pathologie peut apparaître dans les parties d'ouvrages les plus sévèrement exposées à l'humidité, en général au bout de quelques années (voire plusieurs dizaines d'années). Ce phénomène provoque la formation de nouveaux minéraux constitués essentiellement de gel de silice hydratée, composé amorphe, expansif qui augmente la pression à l'intérieur des pores ce qui cause ensuite des déformations et une microfissuration du matériau. Comme la plupart des réactions chimiques, cette réaction a besoin d'eau pour se produire. Trois conditions sont donc nécessaires pour amorcer et entretenir les réactions de ce phénomène exceptionnel : il faut que simultanément, l'environnement soit fortement humide, la teneur en alcalins solubles dans la solution interstitielle soit suffisamment élevée pour dépasser un seuil critique et qu'il existe dans le béton de la silice réactive en quantité suffisante (apportée par des granulats potentiellement réactifs). Le rôle fondamental de l'humidité (80 à 85% d'humidité relative moyenne) a été mis en évidence par de nombreux essais en laboratoire et par des constatations sur des ouvrages. Pour une humidité relative supérieure à 80%, il a été démontré que les effets d'expansion dus à l'alcali-réaction augmentent fortement (Carles-Gibergues and Cyr, 2002; Swamy, 1992).

2.3.4.2 Réaction sulfatique interne RSI

Cette pathologie a des conséquences assez similaires à celles de la réaction alcali-granulat ce qui explique qu'elle n'a été identifiée que depuis peu de temps (Heinz and Ludwig, 1987). Les

ions sulfates d'origine interne provenant du ciment et des autres constituants peuvent être dissous dans la solution interstitielle du béton dans certaines conditions, dans le cas de bétonnage en masse engendrant de fortes élévations de température pendant la prise. On peut alors amorcer, lors du refroidissement des éléments massifs, la formation de sulfo-aluminates (instables au-delà de 70-75 °C) qui sont des phases expansives générant des contraintes mécaniques internes en traction pouvant mener jusqu'à la rupture. Les réactions sulfatiques mettent en jeu ces ions sulfates présents dans la solution interstitielle et les aluminates du ciment, et peuvent conduire à la formation d'ettringite susceptible de provoquer de l'expansion dans le béton durci. Le phénomène de gonflement interne sulfatique peut se manifester par l'apparition à la surface du béton d'une fissuration multidirectionnelle à maille relativement large. La réaction sulfatique interne RSI est conditionnée par la présence et l'apport d'eau (Fasseu and Mahut, 2003; Godart et al., 2004). Lavaud *et al.* (2017) ont permis de mettre en évidence l'existence d'un seuil d'humidité relative à partir duquel la réaction sulfatique se développe, et pour laquelle la cinétique est d'autant plus rapide que le taux d'humidité est élevé.

2.4 Conclusions

Une présentation synthétique du matériau béton (ses constituants et sa physico-chimie) et des différentes pathologies qui affectent les structures en béton armé permet d'établir le constat que la teneur en eau est le catalyseur de l'ensemble des réactions de dégradation des structures. La teneur en eau est donc un paramètre clé pour la durabilité des ouvrages en béton armé.

Puisque la détermination du profil de teneur eau dans le béton est un des objectifs de ce travail, nous allons présenter dans le chapitre 3 l'ensemble des techniques non destructives disponibles pour caractériser la teneur en eau (sondes capacitatives, sondes TDR, radar et sondes de résistivité électrique) en détaillant le principe de la méthode choisie dans cette étude : la résistivité électrique.

Chapitre 3 Caractérisation hydrique du béton par méthodes non destructives et capteurs noyés

Il existe deux grandes familles de techniques pour caractériser l'évolution des structures : les Contrôles Non Destructif (CND) et les systèmes de mesure placés à demeure, les capteurs. Le CND regroupe une grande diversité de méthodes ayant pour but de contrôler certaines propriétés des matériaux et structures sans les altérer. Ces contrôles peuvent être effectués soit au cours de la construction, soit en cours de vie de l'ouvrage, soit dans le cadre de maintenances. L'auscultation du béton armé constitue un outil important pour l'ingénieur responsable de maintenir en service et de prolonger la durée de vie des structures. Plusieurs méthodes d'auscultation peuvent être appliquées suivant le but de l'inspection, la précision et le coût des méthodes. L'évaluation préliminaire repose essentiellement sur les inspections visuelles (Chen and Duan, 2003; Taillandier et al., 2013). Mais les inspections visuelles ne permettent pas de quantifier la teneur en eau. L'inspecteur peut alors s'aider des techniques d'auscultation non destructives pour cibler les zones de dégradation. En effet, l'identification des zones de dégradation permet de minimiser les prélèvements d'échantillons de béton, en localisant ces zones de façon judicieuse.

Plusieurs méthodes d'évaluation non destructive (END) d'ouvrages en béton ont été développées dans plusieurs projets de recherche (ANR-SENSO (Balayssac et al., 2012), ANR-EVADEOS (Balayssac et al., 2015), ORSI-APOS (Villain et al., 2016)) pour le suivi des ouvrages en béton armé et la mise en place du processus décisionnel permettant de prioriser les actions de maintenance et d'optimiser le suivi de l'ouvrage. Les méthodes non destructives (ND) sont des techniques et procédures menées sur des ouvrages pour ausculter leur état sans provoquer d'altérations. Elles présentent plusieurs avantages comme la rapidité de mise en œuvre et la possibilité d'ausculter les zones inaccessibles ou dangereuses. Ces méthodes sont sensibles aux différentes propriétés du matériau et se distinguent en fonction de la profondeur d'investigation (Breyse, 2012; Webster and Eren, 2014). Parmi les méthodes ND, on peut citer les méthodes acoustiques et ultrasonores basées sur la propagation des ondes mécaniques dans le matériau, les méthodes électromagnétiques (EM) comme les techniques radar (GPR, Ground Penetrating Radar), capacitives et de réflectométrie temporelle (TDR, Time Domain Reflectometry) basées sur la propagation et la

diffusion des ondes électromagnétiques et les méthodes électriques comme la méthode de résistivité électrique (à courant continu, CC) utilisée dans le cadre de ce travail, basée sur la diffusion d'un champ électrique. L'ensemble de ces méthodes permet une caractérisation rapide de certaines propriétés physiques du béton armé, qui va renseigner sur le risque de dégradation du béton. Toutes ces méthodes sont sensibles à la teneur hydrique et ionique du matériau.

Elles sont avantageusement complétées par des systèmes de mesure placés à demeure sur l'ouvrage, quand des mesures en continu sont nécessaires, quand l'accessibilité de la zone dégradée est très limitée. Pour la mesure de teneur en eau, différentes technologies de capteurs sont proposées commercialement, comme les TDR, les capteurs thermo-hygrométriques THR, les psychromètres (Moreau et al., 2010). Toutefois, pour caractériser un gradient il faut déployer un grand nombre de points de mesure. Le coût du système et son intrusivité peuvent rapidement exploser. C'est pourquoi, dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressée à l'adaptation d'une méthode CND à une mise en œuvre au cœur du matériau béton.

Dans ce chapitre, nous présentons les limites des méthodes destructives pour la caractérisation hydrique du béton. Nous discutons également des méthodes choisies comme référence dans cette thèse (les capteurs thermo-hygrométriques THR noyés dans le béton, et la gammadensimétrie réalisée sur des éprouvettes). Nous détaillons ensuite les différentes méthodes électromagnétiques utilisées pour l'auscultation des ouvrages en béton armé en se focalisant sur la méthode de résistivité électrique à courant continu, particulièrement sensible à la teneur en eau et que nous avons retenue dans cette thèse. Nous présentons en outre l'effet des constituants du béton ainsi que l'effet de la température sur les mesures de résistivité électrique. Nous concluons en montrant les limites de ces méthodes électriques d'auscultation.

3.1 Limites des méthodes destructives pour la caractérisation hydrique du béton

La mesure de la teneur en eau peut être réalisée en utilisant des méthodes destructives comme le carottage ou le forage en fournissant un échantillon de béton sur lequel il est également

possible de faire un examen visuel et des essais destructifs. Le calcul de la teneur en eau w ou W est fait sur carottes par pesée.

Parmi les limites de ces méthodes destructives, on peut citer la modification de la teneur en eau lors du prélèvement des échantillons se faisant par carottage le plus souvent sous eau. En outre, dans certains cas, ce prélèvement ne peut être réalisé pour des raisons de sécurité ou d'accessibilité de l'ouvrage. Par ailleurs, en absence d'information *a priori*, le prélèvement est réalisé probablement dans des zones non représentatives de l'ensemble de la structure auscultée : les informations sont locales et ne peuvent être généralisées. En outre, il est évident que l'échantillon ne reste pas dans le même état que celui qu'il avait sur site à cause de son conditionnement. De plus, les mesures au laboratoire sont généralement longues (temps de préparation et/ou de conditionnement des échantillons) et les coûts (liés au prélèvement, au transport, au stockage et aux essais de laboratoire) sont souvent plus élevés que ceux d'une campagne d'auscultation non destructive (Naar, 2006). Enfin l'évaluation de la variabilité de la mesure de la propriété recherchée nécessite de multiplier les prélèvements ce qui est souvent impossible pour des raisons évidentes de risque d'altération de l'intégrité de la structure et également pour des contraintes budgétaires.

Il existe donc un grand besoin de développer des méthodes d'essai non destructives ainsi que des systèmes de mesure placés à demeure sur l'ouvrage pour estimer et surveiller la durabilité du béton (Balayssac and Garnier, 2017; Moreau et al., 2010; Villain, 2012) afin de compléter ou même de remplacer les méthodes d'essai traditionnelles.

3.2 Méthodes de référence pour la caractérisation hydrique du béton

La mesure de la teneur en eau peut aussi être réalisée en utilisant des méthodes faiblement intrusives telles que les sondes thermo-hygrométriques (THR), noyées dans le béton, et la gammadensimétrie réalisée sur des éprouvettes. Ces éprouvettes sont soit coulées en même temps que la structure étudiée, soit carottées dans les structures anciennes.

Ces méthodes sont choisies comme méthodes de référence, dans cette thèse, afin de valider les profils de degré de saturations obtenus par les dispositifs conçus en profondeur dans le béton.

3.2.1 Sondes thermo-hygrométriques

Les sondes THR est la méthode de référence des laboratoires encadrant ce travail. Elles ont été utilisés dans plusieurs études (Baroghel-Bouny, 2004; Villain et al., 2015), noyées dans le béton pour suivre l'évolution de l'état d'humidité. Leur principe repose sur un système capacitif miniaturisé (Moreau et al., 2010). Elles sont calibrées par le constructeur en humidité relative HR qui est le rapport de pression de vapeur PV sur la pression de vapeur saturante PV_{sat} à une température donnée. Avant leur utilisation, la calibration des capteurs réalisée par le constructeur est contrôlée et corrigée le cas échéant en utilisant des solutions salines. Comme ces capteurs sont détériorés à saturation, les capteurs THR sont généralement utilisés dans des applications où la plage de mesure est inférieure à 100% d'humidité. Pour un emploi dans une structure en béton, ils peuvent être placés dans de petites cavités à différentes profondeurs dans le béton, c'est pourquoi elles sont faiblement intrusives. La mesure d'humidité relative dans une cavité, à l'état supposé d'équilibre, est donc entachée d'incertitude. Les courbes isothermes de désorption ou d'adsorption (présentées dans le chapitre 2) permettent de transformer l'humidité relative mesurée en degré de saturation S_r .

Des sondes thermohygrométriques (THR Honeywell) seront placées dans des cavités à différentes profondeurs dans les corps d'épreuve présentés au paragraphe 5.4.1.

3.2.2 Gammadensimétrie

La gammadensimétrie est une méthode semi non-destructive couramment utilisée pour contrôler la densité du béton (Villain et al., 2007; Villain and Thiery, 2006). Elle est également utilisée pour déterminer les profils de teneur en eau sur des carottes de béton (Villain and Thiery, 2006). Cette méthode est semi non-destructive car l'éprouvette ou la carotte peuvent être séchées, saturées et caractérisées à différentes échéances sans les détruire.

Le principe de la gammadensimétrie est basé sur l'absorption par le matériau étudié des rayons gamma émis par une source radioactive de Césium 137. L'éprouvette cylindrique de béton est mise en mouvement de rotation autour de son axe : la mesure correspond à la moyenne sur une tranche de béton d'épaisseur estimée à 10 mm. Une mesure est faite tous les 6 mm.

L'absorption des rayons gamma suit la loi de Lambert :

$$N = N_0 \cdot \exp(-\mu \rho l) \quad (3.1)$$

avec :

- N_0 le nombre de photons incidents dans l'air,
- N le nombre de photons ayant traversé l'éprouvette,
- l l'épaisseur de l'éprouvette [cm],
- ρ la masse volumique de l'éprouvette [g/cm^3],
- μ le coefficient d'absorption massique du matériau ausculté [cm^2/g].

La variation de la teneur en eau du béton modifie le coefficient global d'absorption du béton. On améliore la précision du paramètre en prenant en compte la perte en eau dans le calcul du coefficient d'absorption massique μ (Villain and Thiery, 2006). Il est donc possible de suivre l'évolution des profils de teneur en eau ou degré de saturation de manière précise (l'incertitude sur S_r en un point donné est de l'ordre de 0,5%) dans le béton en utilisant la méthode de gammadensimétrie.

3.3 Méthodes électromagnétiques pour la caractérisation hydrique du béton

L'objectif de ce paragraphe est de présenter les méthodes de mesure électromagnétiques utilisées pour évaluer les propriétés du béton hydraulique, en particulier la teneur en eau. Un aperçu rapide des techniques capacitives, GPR, TDR et cellule coaxiale cylindrique est présenté ci-dessous. Ces méthodes sont sensibles à la permittivité diélectrique du milieu, elle-même très influencée par la teneur en eau (Fares et al., 2015; Leucci, 2012). Une présentation plus détaillée de la méthode de résistivité électrique CC est donnée dans le paragraphe 3.4.

3.3.1 Sondes capacitives

Le principe de cette technique non destructive est basé sur la mesure de la fréquence de résonance d'un circuit oscillant entre deux électrodes métalliques, posées sur le matériau ausculté, constituant avec le matériau environnant un condensateur dont la capacité dépend de la géométrie des électrodes et de la valeur de la constante diélectrique du matériau. Plusieurs géométries d'électrodes sont utilisées avec des profondeurs d'investigation différentes afin

d'étudier l'évolution de la constante diélectrique en fonction de la profondeur :des patins d'électrodes de dimensions variables (5 x 70 mm, 10 x 70 mm et 40 x 70 mm) dont les volumes de couplage concernent des épaisseurs respectivement autour de 3-4 mm, 1-2 cm et 6-7 cm sont utilisées. La fréquence de résonance varie en fonction de la constante diélectrique du matériau qui dépend de la teneur en eau.

Les méthodes capacitives sont utilisées par ailleurs pour mesurer la teneur en eau dans le sol (Bell et al., 1987; Robinson and Dean, 1993; Tran and Ambrosino, 1972) et dans le béton (Dérobert et al., 2008; Du Plooy et al., 2015; Fares, 2015; Sbartai et al., 2007).

Notons que les sondes capacitives permettent de déterminer une permittivité apparente, un processus d'inversion est donc nécessaire pour obtenir les profils de permittivité « vraie » en fonction de la profondeur (Fares et al., 2015).

3.3.2 Méthode radar (Ground Penetrating Radar (GPR))

La méthode radar (radio detection and ranging) est une méthode non destructive basée sur un appareil qui émet des impulsions électromagnétiques. Son principe général est décrit dans de nombreux ouvrages (Balayssac and Garnier, 2017; Daniels, 2004; Hamrouche, 2011). L'application la plus commune en génie civil consiste à utiliser le signal réfléchi sur les barres d'acier pour obtenir les informations sur la profondeur de l'acier (Hugenschmidt and Kalogeropoulos, 2009). Le radar se compose d'une antenne émettrice et d'une antenne réceptrice. Le principe de la mesure radar consiste à émettre une impulsion électromagnétique par l'antenne émettrice qui va se propager en s'atténuant dans le milieu ausculté et à enregistrer l'ensemble des signaux (directs ou réfléchis) avec l'antenne réceptrice. Lorsque l'onde interagit avec une interface entre deux zones présentant un contraste de permittivité diélectrique, une partie de l'énergie émise par la source va être réfléchie. Ces réflexions sont enregistrées par le récepteur pendant un intervalle de temps prédéfini par l'opérateur et constituent ainsi un radargramme montrant l'amplitude du signal reçu en fonction du temps. La vitesse de propagation de l'onde est déterminée par un processus d'étalonnage de la mesure détaillé dans Dérobert (2003) et est liée, ainsi que son amplitude, aux propriétés du matériau.

Le radar est employé par ailleurs pour caractériser différents paramètres du béton tels que la teneur en eau et la salinité de la solution interstitielle (Dérobert et al., 2009; Ihamouten, 2011; Klysz et al., 2004; Laurens et al., 2002; Leucci, 2012; Robert, 1998; Sbartai, 2005).

Cette méthode n'a pas été retenue pour cette thèse car la résolution spatiale n'était pas adaptée aux dimensions des corps d'épreuve et à la résolution recherchée. Les mesures de surface nécessitent une procédure d'inversion complexe pour évaluer les profils hydriques (Xiao et al., 2017).

3.3.3 Réflectométrie temporelle

La méthode TDR (Time Domain Reflectometry) est une technique électromagnétique initialement utilisée pour déterminer l'emplacement spatial des défauts des câbles électriques. Elle a ensuite été adaptée pour mesurer la teneur en eau de matériau, en transformant le guide d'onde, le câble coaxial initial, en une sonde de mesure.

Le principe de la méthode TDR consiste à émettre une impulsion électromagnétique et à mesurer le signal rétrodiffusé par le câble coaxial et/ou la sonde de mesure, noyée dans le matériau à caractériser. Le temps de retour et l'amplitude de tous les signaux réfléchis (écho) sont extrêmement dépendants aux propriétés des matériaux constitutifs du câble, de la sonde et de son environnement, notamment leurs permittivités, donc leur teneur en eau. En effet, la permittivité de l'eau vaut environ 80 quand celle des sols ou du béton est de l'ordre de 20. La forme de la sonde et les propriétés du milieu à caractériser modifient les volumes investigués, qui restent toutefois faibles (pluri-centimétriques). Le spectre fréquentiel de l'impulsion propagée est large, d'environ 20 kHz à environ 1,5 GHz. Comme la permittivité du béton varie sur cette plage fréquentielle (phénomène de dispersion) d'une part, comme le matériau béton est hétérogène dans le volume investigué d'autre part, les mesures par TDR fourniront une permittivité relative apparente, reliée à la grandeur d'intérêt, dans notre cas la teneur en eau du béton, par calibrations expérimentales.

Depuis 1980, cette méthode a été un succès industriel dans le domaine de l'agriculture et du génie civil pour évaluer la teneur en eau dans le sol (Hoekstra and Delaney, 1974; Topp et al., 1980). Les sondes TDR ont été utilisées avec succès par l'Andra en France pour la surveillance de la saturation dans les argiles (<https://www.andra.fr>). Plus récemment, des études ont porté sur l'adaptation de cette technique aux milieux cimentaires (Bore et al., 2016;

Courtois et al., 2015; Farhoud et al., 2013). Courtois *et al.* (2015) et Yu and Liu (2010) montrent que le système de capteur TDR peut estimer les propriétés du béton, telles que la teneur en eau, la densité, et la résistance mécanique.

Dans le cadre de cette thèse, une adaptation récente de cette technique a été implémentée dans nos corps d'épreuve en béton (paragraphe 5.4.1) afin d'évaluer les performances, simultanément avec nos dispositifs. Une méthode de l'université de Queensland (Australie) utilisant les capteurs innovants (« flat cable ribbon ») permet d'obtenir le profil de teneur en eau dans le béton (Scheuermann et al., 2010) et non plus seulement un point de mesure correspondant à une valeur moyenne sur la sonde.

3.3.4 Cellule coaxiale cylindrique

Afin de remonter au profil de teneur en eau, une calibration des mesures électromagnétiques est nécessaire pour relier la permittivité (paramètre mesuré) à l'indicateur degré de saturation (Villain et al., 2014). Cette calibration s'appuie sur des mesures en laboratoire réalisées sur un certain nombre de carottes prélevées sur l'ouvrage ausculté.

Une cellule coaxiale cylindrique a été développée par Adous (2006) pour déterminer la permittivité diélectrique des matériaux au laboratoire (sols et bétons) en fonction de la fréquence dans une gamme fréquentielle correspondant à celle des radars (50-1200 MHz) sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 75 mm et de hauteur 70 mm. Cette cellule constitue un outil de calibration de la constante diélectrique en utilisant le modèle de Joncher (Ihamouten et al., 2011) permettant d'extrapoler les résultats aux basses fréquences pour déduire la constante diélectrique à 33 MHz (fréquence de résonance de la sonde capacitive) (Fares et al., 2015; Villain et al., 2015) et aux hautes fréquences pour déduire la permittivité sur une bande correspondant au spectre des mesures radar (1 GHz). La cellule coaxiale permettra également de calibrer les mesures fournies par la technique TDR qui mesure la même propriété intrinsèque du béton qui est la permittivité relative sur des fréquences aux alentours de 1 GHz.

Le principe de cette méthode est basé sur la mesure des coefficients de réflexion et de transmission à travers l'échantillon testé puis à procéder à une inversion (méthode de Newton-Raphson) pour estimer la valeur de la permittivité diélectrique complexe supposée

constante dans le volume de l'échantillon (Filali et al., 2006; Adous, 2006; Dérobert et al., 2009).

L'étalonnage de la cellule comprend une mesure court-circuitée, une avec un porte-échantillon vide (dans l'air) et une avec un matériau étalon qui est le Téflon (PTFE). Pour valider l'étalonnage, on effectue des mesures sur le PVC dont on connaît déjà la permittivité (~ 2.95).

Dans notre étude nous utiliserons la cellule coaxiale pour caractériser des éprouvettes de béton conditionnées à différentes saturations en eau. La courbe de calibration entre la permittivité et la teneur en eau sera donc établie (paragraphe 5.7).

3.4 Méthode électrique à courant continu

Dans ce paragraphe, nous présentons la base théorique de la méthode de résistivité électrique à courant continu (CC), le principe de mesure, les différentes techniques de mesure et la sensibilité de la résistivité électrique aux différents indicateurs de durabilité tels que la teneur en eau et en chlorures, la tortuosité et le coefficient de diffusion. Rigoureusement, cette méthode est également une méthode électromagnétique. Cependant, elle est concernée par une gamme de fréquences très différente et est sensible à une autre propriété que la permittivité. Par ailleurs, son rôle est central dans ce travail. Nous la présentons donc séparément.

3.4.1 Base théorique de la résistivité électrique

La résistivité électrique (ρ) est la capacité du matériau à s'opposer au passage du courant électrique. C'est une grandeur intrinsèque à un matériau, contrairement à la résistance électrique. Elle s'exprime en Ohm.mètre [$\Omega.m$] dans le système international. L'inverse de la résistivité est la conductivité électrique (σ) en Siemens par mètre [S/m] décrivant la capacité d'un matériau à laisser circuler les charges électriques libres sous l'influence d'un champ électrique externe. La diffusion du courant électrique dans les matériaux suit différents modes à savoir principalement la conduction électronique et la conduction électrolytique. Dans les métaux, ces charges se rapportent aux électrons libres des atomes, tandis que dans les fluides et les matériaux poreux comme le béton, elles sont représentées par les charges portées par les anions et les cations en solution (par exemple, Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-}).

La loi d'Ohm est une relation constitutive qui décrit la relation, dans la matière, entre le champ électrique et la densité de courant. La conduction du courant électrique dans les matériaux est décrite dans l'équation 3.2.

$$J_c = \sigma E = \frac{1}{\rho} E \quad (3.2)$$

avec :

- J_c la densité de courant de conduction [A/m²],
- E le champ électrique [V/m].

La conduction électrolytique correspond au déplacement des charges électriques portées par les ions qui circulent dans l'électrolyte sous l'effet de la différence de potentiel. Dans le cas du béton, la conduction est supportée par les solutions interstitielles et dépend des caractéristiques de cette solution (degré de saturation, concentration en sels et nature des ions dissous) et de la capacité de ces charges à circuler (porosité et tortuosité). Ces facteurs sont repris dans une loi empirique proposée pour les roches (et sols), la loi d'Archie (Archie, 1942) qui définit la résistivité électrolytique comme suit:

$$\rho = a \rho_w \phi^{-m} S_r^{-n} \quad (3.3)$$

avec :

- ρ_w la résistivité de la solution interstitielle [$\Omega \cdot m$],
- ϕ la porosité du matériau,
- S_r le degré de saturation en eau,
- a un paramètre de calage,
- m le facteur de cimentation,
- n le facteur de saturation.

Les paramètres a , m et n dépendent du matériau. Le facteur a , appelé facteur de lithologie, augmente généralement quand la porosité diminue et varie entre 0,02 et 1 dans les bétons et peut atteindre 7 dans les mortiers ou pâtes de ciment (Balayssac and Garnier, 2017). Le facteur de cimentation m traduit l'effet de la tortuosité du réseau poreux, la valeur de m augmente quand la tortuosité du réseau poreux augmente et elle est comprise entre 2 et 7 (Balayssac and Garnier, 2017). Le facteur de saturation n dépend de la nature du fluide et de ses interactions avec la matrice, la valeur de n est généralement comprise entre 2 et 2,6 (Balayssac and Garnier, 2017).

La résistivité électrique cible la conductivité électrique du milieu (σ) (transport de charges), alors que la Polarisation Provoquée (PP) cible la polarisation du milieu (séparation et réorientation de charges) qui est observée à partir de la dispersion de la résistivité complexe des matériaux contenant deux types de conceptions (électronique et ionique). Dans le cadre de notre étude, le phénomène de polarisation provoquée n'est pas pris en compte, notre objectif étant de développer un capteur noyé dans le béton permettant de suivre l'évolution du gradient de teneur en eau. La prise en compte du phénomène de polarisation provoquée sera traitée en perspectives.

3.4.2 Principe de mesure à courant continu

Lorsqu'un courant continu est injecté via des électrodes ponctuelles à la surface d'une structure, le courant circule librement dans le milieu. S'il est homogène, semi-infini et isotrope, des surfaces équipotentielles hémisphériques sont tracées perpendiculairement aux lignes de courant (Figure 3-1 (a)) avec un rayon qui augmente lorsqu'on s'éloigne de l'électrode d'injection (Han, 2004; McCarter et al., 1981; Polder, 2001).

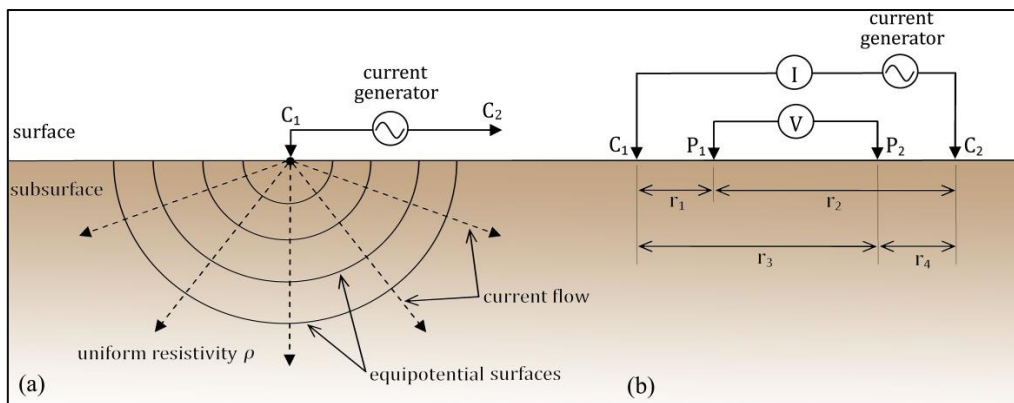


Figure 3-1 Electrodes ponctuelles en surface d'un modèle homogène semi-infini : (a) utilisation d'une source de courant C_1 et représentation de la distribution des équipotentielles, (b) une configuration à 4 points (Telford et al., 1990).

Le potentiel mesuré en un point r [m] d'un milieu de résistivité ρ lié à une injection ponctuelle de courant I peut être exprimé comme suit :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (3.4)$$

où r [m] est la distance à la source.

Pour réaliser une mesure de résistivité électrique, au moins deux électrodes d'injection de courant sont utilisées créant une distribution symétrique du potentiel décrit par l'équation (3.5) :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.5)$$

où r_1 [m] et r_2 [m] sont les distances entre le point où le potentiel V est déterminé et les points C_1 et C_2 les points d'injection de courant.

Une mesure de potentiel n'est théoriquement pas réalisable. La mesure nécessite une différence de potentiel formant ainsi un quadripôle : le courant est injecté par l'intermédiaire des deux électrodes (C_1 et C_2) et le potentiel est mesuré entre les deux autres électrodes (P_1 et P_2). r_1 à r_4 [m] sont les distances entre électrodes définies dans la Figure 3-1 (b) :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (3.6)$$

D'une manière générale, la configuration de mesure de la résistance à quatre points (configuration quadripôle) est la plus couramment utilisée dans la littérature pour une inspection sur site (technique initialement développée pour la prospection du sous-sol). Des études précédentes ont montré qu'une configuration de mesure à quatre points donne des résultats plus fiables qu'un système à deux électrodes (ou configuration dipôle) (Du Plooy et al., 2013; Gowers and Millard, 1999; Wenner, 1915). Différentes versions de la configuration quadripôle ont été utilisées comme méthodes d'essais non destructifs (le quadripôle carré (Sirieix et al., 2002), la configuration Wenner (Wenner, 1915)), mais pour une application sur du béton, la configuration Wenner est plus largement utilisée dans la littérature (Andrade et al., 2007; Du Plooy, 2013; Fares, 2015; Polder, 2001; Presuel-Moreno et al., 2010). Pour cette configuration, les électrodes sont disposées en ligne et séparées par une distance constante, le courant est injecté entre les électrodes externes et la différence de potentiel est mesurée sur les électrodes internes. Généralement, le courant injecté est alternatif à très basse fréquence (autour de 1 Hz) et composé d'une alternance de créneaux carrés positifs et négatifs pour limiter les problèmes de polarisation des électrodes (Hughes et al., 1985; Polder, 2001).

Dans le cas d'un milieu homogène et isotrope (y compris les conditions homogènes de saturation en eau), la résistivité est liée à la résistance (rapport de la tension mesurée à l'intensité du courant injecté) par un facteur géométrique G qui dépend de la géométrie, de la position et de la taille des électrodes interrogées ainsi que de la géométrie de la structure

auscultée (Loke, 1999). Dans le cas d'un milieu hétérogène, on mesure une résistivité « apparente » (ρ_a) qui dépend de la distribution de résistivité réelle du matériau et de la géométrie du dispositif de mesure. La résistivité apparente est définie selon Loke (1999) comme étant la résistivité d'un milieu homogène qui donnera la même résistance que celle du milieu hétérogène pour le même arrangement d'électrodes (équation 3.7).

$$\rho_a = G \frac{\Delta V}{I} \quad (3.7)$$

Le calcul du facteur géométrique se base sur un calcul en éléments finis (EF) (dans notre cas, nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics) dans un milieu homogène, mais dont la géométrie finie reproduit bien la réalité. Pour chaque configuration d'électrodes, une différence de potentiel ΔV_0 est simulée à partir du modèle homogène. L'approche proposée par Marescot *et al.* (2006) du calcul du facteur géométrique est traduite par l'équation 3.8 :

$$G = \rho_0 \frac{I_0}{\Delta V_0} \quad (3.8)$$

où ρ_0 , ΔV_0 et I_0 sont respectivement la résistivité du matériau homogène, la différence de potentiel calculée et l'intensité de courant injectée pour la configuration d'électrodes en question.

3.4.3 Techniques de mesure de la résistivité électrique

Différentes techniques de mesure électrique existent en laboratoire et sur site.

En laboratoire, pour caractériser des carottes, on utilise des cellules de mesure, soit en configuration à deux électrodes (mesure en transmission en utilisant deux plaques métalliques d'injection et de mesure du courant de part et d'autre de l'échantillon), soit en configuration quadripôle en utilisant le dispositif multi-anneaux de Du Plooy *et al.* (2013).

Pour faire une mesure sur site, on peut procéder soit à une mesure en surface à partir de laquelle on peut évaluer la résistivité à cœur, soit à une mesure à cœur par un dispositif noyé. Notons que ces mesures développées pour le site peuvent également être utilisées en laboratoire.

3.4.3.1 Cellule de caractérisation de la résistivité électrique en laboratoire

Des cellules de mesure sont utilisées en laboratoire pour caractériser la résistivité électrique de carottes de matériaux comme le béton.

Une méthode de mesure en laboratoire est la mesure en transmission (Figure 3-2) qui consiste à imposer un courant électrique entre deux plaques métalliques sur les deux faces opposées d'une éprouvette et à mesurer la différence de potentiel entre ces mêmes plaques. Afin d'assurer un bon contact entre les plaques et l'éprouvette, des éponges humides sont généralement utilisées. Dans le cas d'un échantillon cylindrique avec injection du courant par les faces planes, le facteur géométrique G est égal à l'aire A de la surface d'injection du courant divisée par la hauteur L de l'échantillon, $G = A/L$ (Figure 3-2).

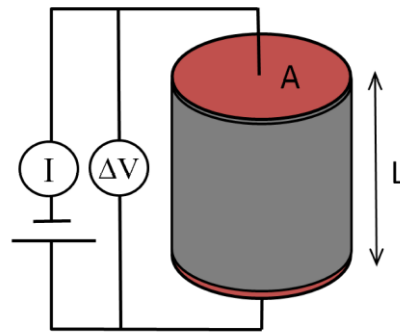


Figure 3-2 Illustration du principe de mesure de résistivité en transmission

Cette méthode à deux électrodes a été largement appliquée dans des conditions de laboratoire pour la détermination de la résistivité globale de bétons homogènes (Castellote et al., 2002; Han, 2004; McCarter et al., 1981; Telford et al., 1990).

Un autre dispositif de mesure en laboratoire est le dispositif multi-anneaux composé de cinq électrodes sous forme d'anneaux uniformément écartés sur la hauteur totale de l'échantillon, développé par Du Plooy *et al.* (2013) pour effectuer des mesures de résistivité (Figure 3-3). Le dispositif est composé de deux demi-cylindres en PVC qui peuvent contenir une éprouvette de béton de diamètre de 75 mm et de hauteur de 70 mm. Le contact entre les électrodes et l'éprouvette est assuré par des éponges humides. Le courant est injecté sur deux plaques en surface et les différences de potentiel sont mesurées entre des paires d'électrodes annulaires. Le facteur géométrique G est théoriquement égal à l'aire A de la surface d'injection du courant divisée par la distance entre les électrodes de mesure du potentiel. Un

calcul d'une autre approche est obtenu par modélisation EF (sous COMSOL Multiphysics), en reproduisant la géométrie exacte du problème (éprouvette et électrodes).

Cette configuration de mesure est une configuration à 4 électrodes (quadripôle) où les électrodes d'injection de courant sont différentes des électrodes de mesure de potentiel.

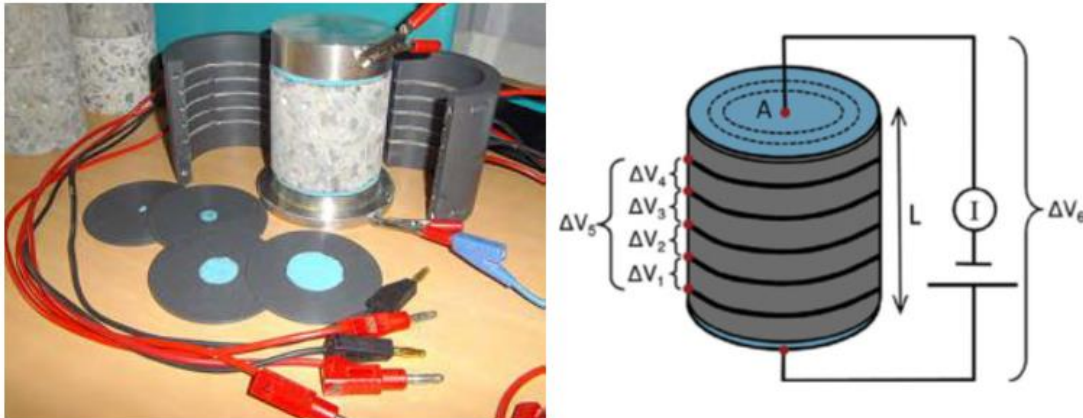


Figure 3-3 Dispositif multi-anneaux développé dans la thèse de Du Plooy (2013).

Dans ce travail, le dispositif multi-anneaux est utilisé pour caractériser des éprouvettes de béton conditionnées à différents teneurs en eau selon la méthode de Villain *et al.* (2018). Ainsi, les courbes de calibration des mesures électriques sont établies entre notre observable ND, la résistivité électrique, et l'indicateur degré de saturation (paragraphe 5.6) en supposant que les cylindres de béton sont homogènes et que la résistivité apparente mesurée est assimilée à la résistivité vraie du matériau.

3.4.3.2 Méthodes de mesure surfaciques utilisées in situ

L'utilisation d'électrodes ponctuelles en surface pour déterminer la résistivité électrique est courante en géophysique depuis plusieurs décennies (Telford *et al.*, 1990). Plusieurs dispositifs multi-électrodes de tomographie de résistivité électrique (TRE) ont été développés initialement pour la surveillance géophysique et la cartographie de structures cachées sous la surface du sol (Chrétien *et al.*, 2014; Fargier *et al.*, 2014; Marescot *et al.*, 2006; Stefanescu *et al.*, 1930; Wenner, 1915). Ensuite, le principe de la TRE est appliqué pour les structures en béton armé pour la détection et la localisation de défauts, de fissures ou d'orientation de fibres (Chouteau *et al.*, 2002; Lataste *et al.*, 2003a). Enfin, la TRE a été utilisée pour évaluer les gradients de teneur en eau ou d'agents ioniques agressifs dans le béton d'enrobage (Du Plooy *et al.*, 2013; Fares *et al.*, 2015; Lecieux *et al.*, 2015; Villain *et al.*, 2015). En plus de son aspect totalement non destructif, la résistivité par électrodes « ponctuelles » présente un avantage

dans la simplicité de sa mise en œuvre. A chaque valeur d'espacement correspond une profondeur d'investigation qui augmente avec l'espacement (Figure 3-4). Il s'agit de combiner plusieurs mesures pour différents espacements d'électrodes et donc différents volumes d'investigation pour reconstituer un pseudo profil vertical des résistivités électriques apparentes du matériau. Ces mesures de résistivité apparente sont intégrantes et un calcul d'inversion est donc nécessaire pour estimer le profil de résistivité réelle en fonction de la profondeur (Fares, 2015; Fargier, 2011; Loke, 1999).

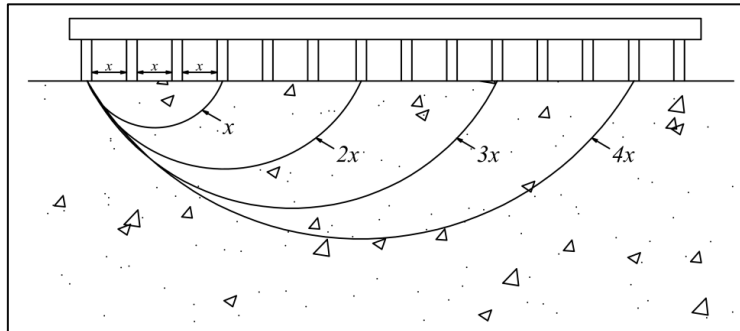


Figure 3-4 Schéma du principe des mesures de résistivité sur la surface par dispositif multi-électrodes de tomographie de résistivité électrique (TRE) (Du Plooy, 2013).

3.4.3.3 Techniques de mesure par des capteurs noyés

Plusieurs dispositifs destinés à être noyés dans le béton sont mentionnés dans la littérature (Bässler et al., 2000; McCarter et al., 2001), principalement pour évaluer les gradients de résistivité dans le béton d'enrobage. Ces dispositifs permettent de déterminer quantitativement les caractéristiques du béton proche de la surface afin d'évaluer la pénétration de gaz et/ou de liquides contenant des contaminants dissous et d'étudier les réponses à court et long terme du béton soumis à des conditions d'exposition différentes. Les différents systèmes peuvent fournir des informations sur la conductivité électrique du béton dans la zone d'enrobage, la conductivité apportant des informations sur l'activité des armatures. Ces travaux ont également souligné l'importance d'une surveillance régulière du béton d'enrobage en fonction du temps et de la profondeur.

Multi-ring électrodes (MRE)

Un des dispositifs les plus connus est le « multi-ring electrodes » (MRE) (Bässler et al., 2000) (Figure 3-5 (a)), qui est constitué d'un empilement de huit électrodes annulaires de 20 mm de diamètre, de 2,5 mm d'épaisseur et espacées de 2,5 mm. La résistance est mesurée entre chaque paire d'anneaux ; ce qui permet de tracer un gradient de résistance en profondeur.

Comme il s'agit d'une configuration à deux électrodes (injection du courant et mesure du potentiel par les mêmes électrodes), des problèmes de polarisation des électrodes sont à prendre en compte. L'utilisation d'un signal électrique alternatif peut réduire ces effets.

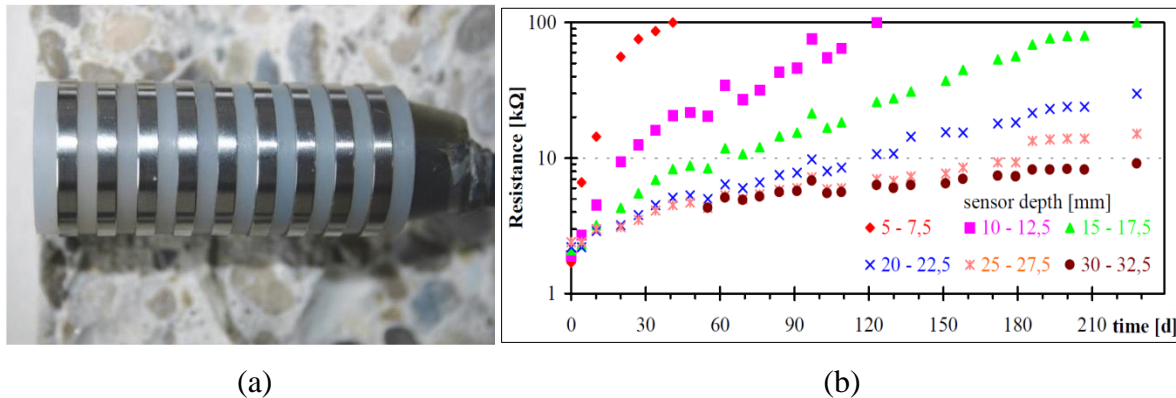


Figure 3-5 Multi-ring electrodes MRE : (a) Vue du capteur, (b) Résistance mesurée en fonction du temps et de la profondeur (Bässler et al., 2000).

Bässler *et al.* (2000) étudient la variation de la résistance mesurée en fonction du temps avec le capteur MRE noyé dans une éprouvette de béton soumise à un séchage à la température ambiante de 20 °C (Figure 3-5 (b)). L'augmentation de la résistance mesurée entre les parois d'anneaux du capteur reflète le séchage de l'échantillon, les anneaux plus profonds révélant un séchage plus lent que ceux qui sont plus proches de la surface.

Réseau de fils d'électrodes

McCarter *et al.* (2001) développent une autre forme de capteur qui consiste à intégrer un réseau de fils (électrodes) espacées de 5 mm dans le béton d'enrobage et à mesurer la conductivité entre chaque paire d'électrodes (Figure 3-6 (a)). Le capteur est noyé dans une dalle de béton soumise à différents cycles de séchage et d'imbibition. Les profils de conductivité sont tracés dans la Figure 3-6 (b) montrant qu'à la fin de chaque période de séchage, la conductivité diminue en surface ce qui reflète la diminution du degré de saturation dû au séchage. Après l'imbibition, la pénétration du front d'eau est détectée par l'augmentation de la conductivité en surface par rapport à la valeur avant imbibition. Le matériau étant hétérogène, il s'agit d'une conductivité apparente et non d'une conductivité « vraie ».

Pour cette forme de capteur, les fils présentent un caractère intrusif dans le béton. Pour limiter significativement ce problème, nous avons conçu nos capteurs (présentés dans le chapitre 4) sous forme de circuit imprimé.

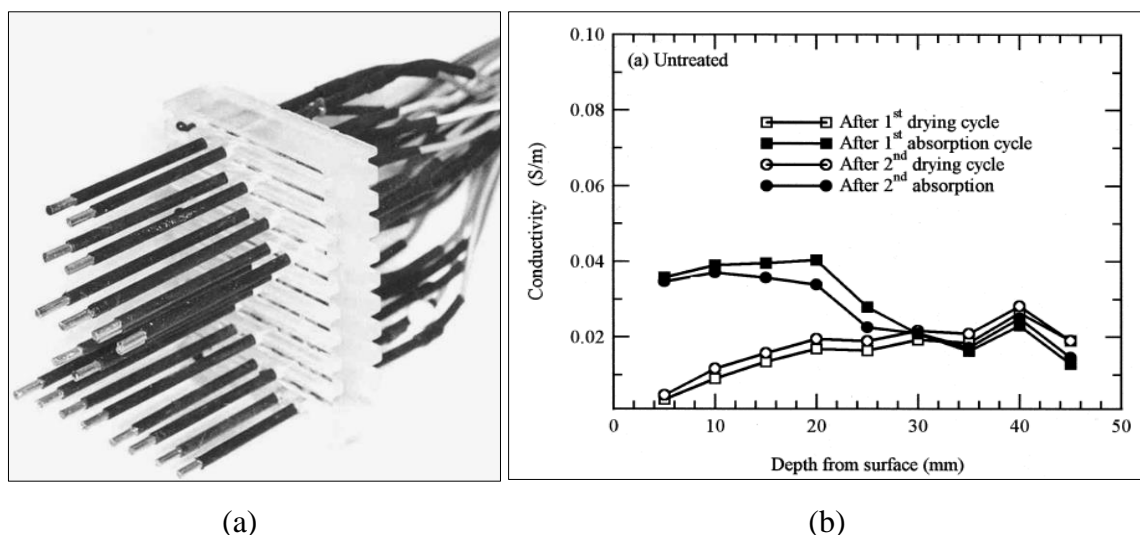


Figure 3-6 Réseau de fils (électrodes) : (a) vue du capteur, (b) profils de conductivité mesurés en fonction des cycles de séchage et d'humidification (McCarter et al., 2001).

3.4.4 Sensibilité à des indicateurs de durabilité

La résistivité électrique est sensible aux différents indicateurs de durabilité du béton armé tels que la teneur en eau et en chlorures, la tortuosité et le coefficient de diffusion.

3.4.4.1 Teneur en eau

La résistivité électrique est caractérisée par la mobilité des ions présents dans la solution interstitielle, elle est donc fortement influencée par le liquide présent dans l'espace poral du béton. Plus la porosité du béton est élevée, plus sa phase liquide est en quantité importante et par conséquent sa résistivité faible. La relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau du béton est déjà justifiée par de nombreux travaux dans la littérature (Du Plooy, 2013; Fares et al., 2015; Feliu et al., 1996; Hornbostel et al., 2013; Lataste, 2002; Millard, 1991; Naar, 2006; Østvik, 2006; Rajabipour et al., 2004; Sriravindrarah and Swamy, 1982; Villain et al., 2015).

La majorité des études (Gjørsv et al., 1977; Larsen et al., 2006; Lopez and Gonzalez, 1993; Saleem et al., 1996; Sbartaï et al., 2007) montre que la résistivité augmente, selon une loi de puissance, quand le degré de la saturation diminue. Cela correspond bien à la relation entre la résistivité et le degré de saturation suggéré par Archie dans l'équation (3.3).

Fares *et al.* (2015) utilisent un dispositif multi-électrodes (Figure 3-4) avec différents écartements d'électrodes (2 ; 4 ; 6 et 8 cm) dans le but de suivre l'évolution du profil de la

résistivité du béton à différentes échéances après son immersion dans 1 cm d'eau. Des mesures de surface sont réalisées sur la face opposée à la face immergée dans l'eau. La Figure 3-7 représente la variation de la résistivité apparente en fonction du temps d'immersion pour différentes profondeurs d'investigation. Le graphe montre que la résistivité apparente diminue en fonction du temps révélant le phénomène d'absorption d'eau par capillarité dans la dalle de béton.

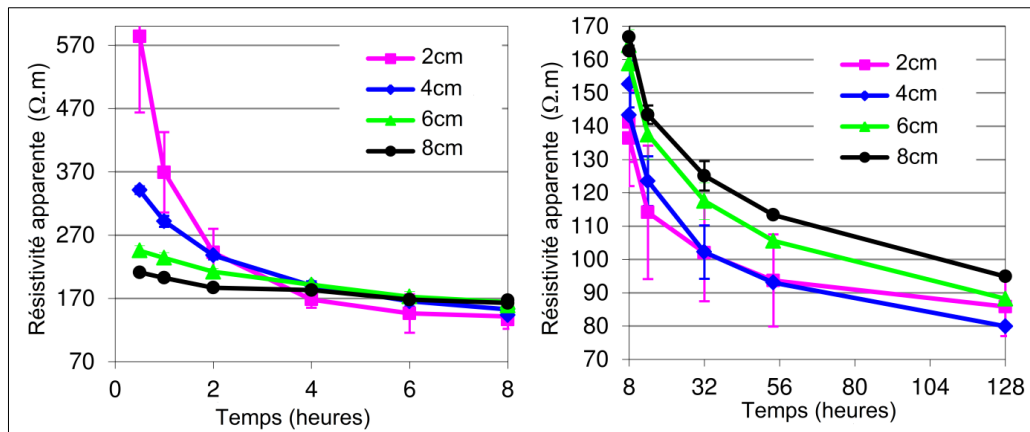


Figure 3-7 Résistivité apparente en fonction du temps d'immersion dans l'eau de la dalle en béton, pour des mesures de type Wenner à différents espacements inter-électrodes (Fares et al., 2015).

Dans le cadre du projet de recherche collaboratif français ANR-EVADEOS, une campagne de mesures similaires (Villain et al., 2015) utilisant le dispositif multi-électrodes (Figure 3-4) montre que la résistivité apparente diminue avec la pénétration de l'eau dans une dalle de béton immergée dans 1 cm d'eau.

Un processus d'inversion (Fargier, 2011; Loke, 1999) est nécessaire pour obtenir les profils de résistivité « vraie » en fonction de la profondeur. Une calibration des mesures électriques, nécessitant une connaissance *a priori* des matériaux, (en utilisant le dispositif multi-anneaux paragraphe 3.4.3.1) est nécessaire pour remonter aux profils de teneur en eau (Fares et al., 2015; Villain et al., 2015).

3.4.4.2 Teneur en ions chlorures

Plusieurs équipes de recherche, par exemple Enevoldsen *et al.* (1994) et Fares *et al.* (2018), ont réalisé des campagnes de mesures de résistivité sur des bétons et des mortiers contenant différentes concentrations en chlorures. Il a été montré que l'augmentation de la teneur en ions Cl^- et l'augmentation de la teneur en eau induisent une diminution de la résistivité électrique. Ceci est dû à l'augmentation de la mobilité des ions, et/ou l'augmentation du

nombre de charges libres dans la solution électrolytique, qui favorisent la circulation du courant. De même, les travaux de Saleem *et al.* (1996) sur des bétons avec différents niveaux de concentration en Cl^- ont montré que la résistivité du béton baisse avec l'accroissement de la teneur en eau et la concentration en chlorures (Figure 3-8).

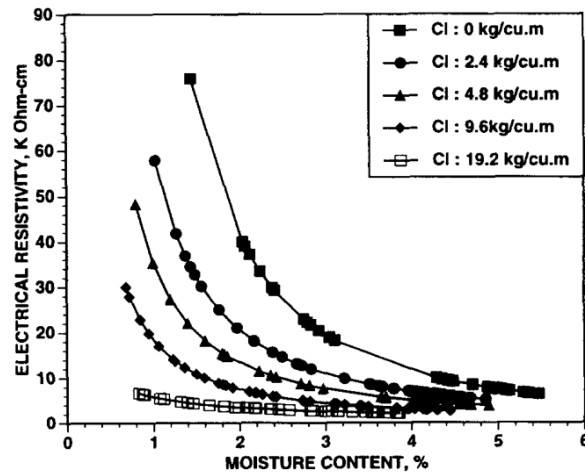


Figure 3-8 Relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau, pour différentes concentrations en ions Cl^- , dans les bétons (Saleem *et al.*, 1996).

De même, le travail de Du Plooy *et al.* (2015) sur des corps d'épreuve immergés dans 2 cm d'eau chlorée à différentes concentrations (0 ; 15 et 30 g/l NaCl), montre une diminution de la résistivité apparente en fonction du temps avec l'accroissement de la concentration en ions chlorures (Figure 3-9).

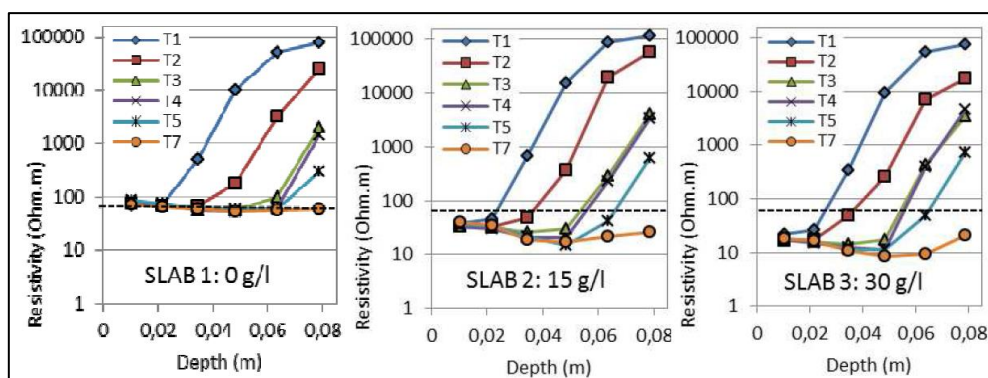


Figure 3-9 Résistivité apparente mesurée sur dalles submergées dans de l'eau à différentes concentrations en NaCl (T1-T7 représente le temps d'immersion dans l'eau avec T1 étant 0,1 jour et T7 étant 23,2 jours) (Du Plooy *et al.*, 2015).

Pour un béton saturé en eau soumis à un essai de diffusion des ions Cl^- , Fares *et al.* (2018) ont déterminé des profils de teneur en chlorures libres grâce à des mesures de résistivité apparente avec la cellule cylindrique de résistivité (Figure 3-3). Un processus d'inversion des résistivités

apparentes a été nécessaire pour obtenir les profils de résistivité « vraie » en fonction de la profondeur.

3.4.4.3 Tortuosité et coefficient de diffusion

L'interconnexion des pores d'une structure peut être exprimée par des paramètres tels que la connectivité (continuité du réseau poreux), la tortuosité (« linéarité » du réseau poreux) et le coefficient de diffusion. Ces paramètres influencent la capacité de circulation des électrolytes dans la matrice et les propriétés de transfert dans le milieu poreux et permettent donc de considérer que la résistivité est un bon indicateur de durabilité du matériau (Andrade, 2010; Baroghel-Bouny, 2004; Lakshminarayanan et al., 1992). La dépendance de la résistivité à l'interconnexion des pores est exprimée par la présence du facteur a dans la loi d'Archie (équation 3.3) (Archie, 1942) pour les roches et confirmée par les études de (Baroghel-Bouny et al., 2011) sur le béton.

3.5 Facteurs d'influence sur la mesure de résistivité électrique

Plusieurs facteurs peuvent affecter les mesures de résistivité électrique parmi lesquels on peut citer l'hétérogénéité du béton, la présence des armatures métalliques et la variation de l'environnement de mesure (Gowers and Millard, 1999). Nous abordons dans ce paragraphe l'effet des constituants du béton armé, en soulignant l'effet des armatures métalliques, ainsi que l'effet de la température puisqu'il est prévu d'accélérer l'établissement du gradient de teneur en eau dans le béton en accroissant la vitesse du séchage par une augmentation de la température. Une étude détaillée portant sur l'effet de la température sur les valeurs de résistivité électrique (chapitre 5) sera donc complémentaire.

3.5.1 Effet des constituants du béton armé

Plusieurs constituants du béton influencent les mesures de résistivité électrique. Nous présentons tout d'abord l'effet du ciment (nature et rapport E/C) et des additions minérales. Nous détaillons ensuite l'effet des armatures métalliques afin de proposer des prescriptions sur le positionnement des capteurs dans les structures de l'Andra et réduire, si possible, les éventuelles perturbations de la mesure par le ferrailage (chapitre 4).

3.5.1.1 Ciment et additions minérales

La fraction de pâte de ciment dans le béton a une influence significative sur ses propriétés électriques puisque la solution interstitielle dans la pâte de ciment facilite la conduction et conduit à la plus grande partie de la polarisation. McCarter (1994) montre que la résistivité est, dans une large mesure, régie par la fraction volumique de pâte de ciment. Pour des bétons fabriqués avec différents ciments, les valeurs de résistivité électrique changent (Neville, 2000). La présence de fumée de silice ou de cendres volantes augmente considérablement la résistivité électrique du béton du fait d'un raffinement de la porosité et d'un abaissement important du diamètre moyen des pores (Cabrera and Ghoddoussi, 1994; Naar, 2006). Un effet similaire est observé pour les ciments contenant du laitier de haut fourneau et de la pouzzolane (Medeiros-Junior and Lima, 2016). Ainsi plus la part de ciment substituée par du laitier augmente, plus la résistivité augmente. L'ajout d'adjuvants et d'additions minérales dans le béton influence plusieurs propriétés du béton et peuvent modifier sa microstructure et donc affecter sa résistivité électrique (Cabrera and Ghoddoussi, 1994; Lakshminarayanan et al., 1992).

En outre, une relation entre la résistivité et le rapport eau sur ciment (E/C) est observée. Le rapport E/C est un paramètre de mélange fondamental qui régit la microstructure de la pâte de ciment et les propriétés de sa solution interstitielle. Quand le rapport E/C augmente, le rayon moyen des pores et la connectivité des pores augmente (Hunkeler, 1996). Il a été démontré par de nombreuses études (Hughes et al., 1985; Lataste, 2002; Monfore, 2019) que quand le rapport E/C augmente, la porosité augmente et la résistivité de la pâte de ciment diminue.

3.5.1.2 Armatures métalliques

La présence d'acier, même dans son état passif, peut perturber les mesures de résistivité électrique, l'acier étant un bien meilleur conducteur électrique que la phase liquide dans le béton, la résistivité apparente mesurée au voisinage des armatures est plus faible que la résistivité réelle du béton ausculté. Différents auteurs ont cité l'importance de l'influence de l'acier sur la mesure de résistivité électrique dans une structure en béton armé (Millard, 1991; Gowers & Millard, 1999; Polder *et al.*, 2000; Bungey *et al.*, 2006; Reichling *et al.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2017). Lataste *et al.* (2003b) ont rapporté que les barres d'acier influencent la mesure de résistivité et recommandent d'effectuer la mesure loin de l'armature pour réduire le plus possible son impact ; un éloignement de 2 fois l'espacement entre électrodes donne des erreurs inférieures à 5%, et un éloignement de 3,5 fois permet de négliger l'effet du biais.

Pour réduire l'influence des armatures, Sengul and Gjørsv (2008) proposent d'effectuer la mesure en diagonale à l'intérieur des mailles d'acier. Les études numériques de Presuel *et al.* (2013) ont confirmé que l'effet de barres d'armature dans une structure en béton est important et peut conduire à une mesure de résistivité plus faible. La densité de ferrailage est donc un paramètre influant sur la mesure de la résistivité. Les études de Lataste (2002) ont conclu que la résistivité apparente est d'autant plus faible que le volume d'armature dans le volume étudié est important.

D'autres auteurs ont montré que l'influence des armatures sur les mesures de résistivité apparente sur du béton varient en fonction de l'épaisseur d'enrobage des aciers (Carino, 2001; Millard, 1991). Salehi (2013) a confirmé que le diamètre des barres d'acier a un effet plus faible sur la résistivité apparente que l'effet de l'emplacement du dispositif de mesure par rapport à la position de l'acier. Nguyen *et al.* (2017) ont utilisé le dispositif quadripôle pour effectuer des mesures électriques sur du béton armé avec une épaisseur d'enrobage de 2 et de 4 cm. Ils ont observé une diminution importante de la résistivité apparente mesurée due à l'effet de « court-circuit » en présence d'armatures et ont confirmé que l'épaisseur du béton d'enrobage a un impact sur l'effet de court-circuit. Les valeurs de résistivité apparente sont légèrement plus élevées pour l'acier à 4 cm que pour celui à 2 cm, ainsi plus l'épaisseur d'enrobage est faible, plus la chute de résistivité apparente causée par cet effet est élevée (Figure 3-10).

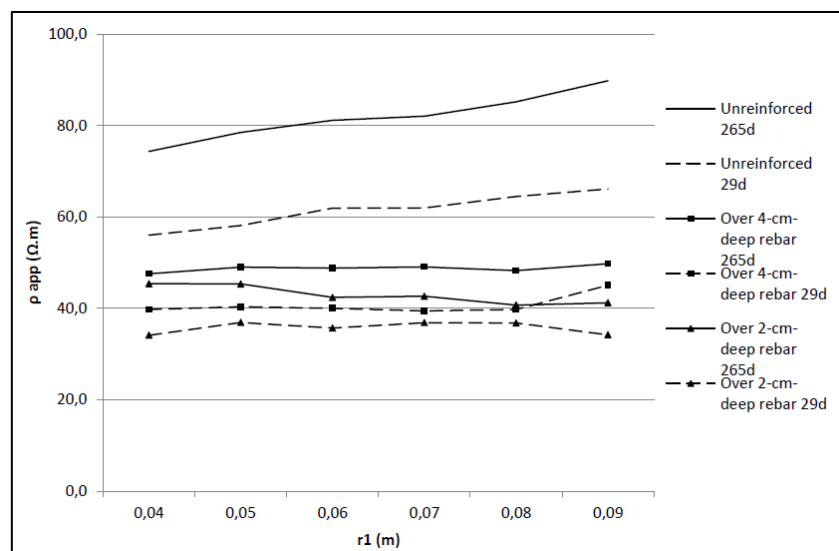


Figure 3-10 Effet de la présence d'armatures sur les mesures de résistivité apparente dans le béton armé pour différents âges du béton : 29 et 265 jours (r_1 est la distance entre l'électrode d'injection du courant et l'électrode de mesure du potentiel) (Nguyen *et al.*, 2017).

La résistivité électrique « vraie » du béton ne dépend pas de la présence des armatures métalliques. Les études de Alhadj *et al.* (2019) ont montré qu'il était possible de quantifier par un modèle éléments finis l'influence des armatures sur les mesures de résistivités apparentes. En effet, cette étude consiste à simuler numériquement les mesures expérimentales de résistivité apparente faites sur deux dalles de mêmes dimensions, formulation du béton, âge et conditionnement du béton (imbibition dans l'eau salée par la surface). La seule différence entre ces deux dalles est que l'une est armée et l'autre ne l'est pas. Le profil de résistivité électrique en fonction de la profondeur est obtenu par l'inversion des résistivités apparentes dans la dalle non armée en utilisant le logiciel Res1D (Loke, 2001) qui ne peut prendre l'effet des armatures en compte. Les deux dalles de béton ont subi le même protocole d'imbibition, le profil de résistivité électrique « vraie » est donc le même dans ces 2 dalles. Par suite, les résistivités apparentes pour la dalle armée ont été simulées en utilisant le profil de résistivité « vraie » obtenu par Res1D pour la dalle non armée. Les résultats montrent que les données simulées sont très proches des données mesurées pour la dalle armée (Figure 3-11) (NRMSE < 30%).

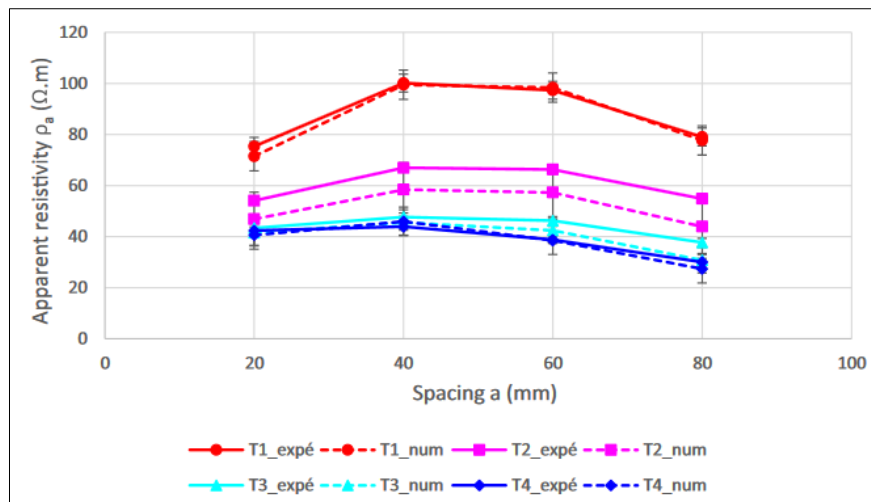


Figure 3-11 Comparaison entre la résistivité apparente expérimentale et numérique pour la dalle armée en fonction de l'espacement des électrodes à différentes échéances de temps. (avec $T1=T0+1h$, $T2=T0+4h$, $T3=T0+18h$ et $T4=T0+38h$) (Alhadj *et al.*, 2019).

3.5.1.3 Corrosion des armatures

La méthode de résistivité électrique a été utilisée pour détecter et localiser les zones favorables à la corrosion des armatures en étant sensible à l'eau et aux sels (Carino, 1999; Gowers and Millard, 1999; Morris *et al.*, 1996; Polder *et al.*, 2000). Le lien entre résistivité du béton et risque de corrosion a été étudié dans plusieurs travaux de recherche. Carino (1999) examine à la fois le risque et la vitesse de corrosion en utilisant des mesures combinées de

potentiel de corrosion et de résistivité électrique. Dans la plupart des cas, une faible résistivité indique un risque élevé de corrosion (Morris et al., 2002). Ces derniers ont avancé que la résistivité électrique est un paramètre important pour évaluer le risque de corrosion de l'acier, indépendamment de la formulation du béton et des conditions qu'il subit.

D'autres études notamment (Samson et al., 2018) permettent de développer une nouvelle méthodologie d'évaluation de la résistivité du béton d'enrobage en utilisant la réponse instantanée de polarisation de l'armature métallique.

Dans ce travail, deux méthodes de modélisation des armatures métalliques seront testées dans le chapitre 4 :

- la « conduction », l'armature étant modélisée par un matériau plein conducteur avec une résistivité de l'acier de l'ordre $10^{-6} \Omega.m$ (Reichling et al., 2015; Alhajj et al., 2019),
- la condition de « Butler-Volmer » (expliquée ci-dessous) qui permet de rendre compte des phénomènes électrochimiques dus à la corrosion et où les barres d'acier sont simulées comme des tubes creux, à la surface desquels la densité de courant est contrôlée par l'équation de Butler-Volmer (équation 3.10) (Laurens et al., 2016).

La corrosion de l'acier dans le béton est traduite par un transfert de charges à l'interface acier-béton. L'acier et l'électrolyte forment une pile électrochimique. Le modèle de Butler-Volmer permet de prendre en compte les échanges à l'interface acier-béton dans les simulations numériques (Laurens et al., 2016). Les barres d'armature intégrées dans un environnement électrolytique uniforme présentent un état électrochimique uniforme (actif ou passif) et par conséquent un taux de corrosion uniforme. Dans ce cas, les surfaces anodiques et cathodiques apparaissent comme des microcellules de corrosion immédiatement adjacentes sur la surface en acier. Par conséquent, en raison de la résistivité de l'électrolyte, la chute ohmique entre les microcellules anodique et cathodique est négligeable et chaque électron, produit par une réaction anodique, est consommé localement par une réaction cathodique. À l'échelle macroscopique, les microcellules anodiques et cathodiques ne sont pas dissociées, il n'y a pas de courant dans le volume de béton et le champ de potentiel apparaît uniforme.

Le comportement de polarisation de tels systèmes uniformes peut être modélisé par l'équation de Butler-Volmer (équation 3.9), pour des aciers actifs ou passifs, utilisant des paramètres électrochimiques appropriés.

$$i = i_{corr} \left[\exp\left(\frac{E - E_{corr}}{\beta_a}\right) - \exp\left(-\frac{E - E_{corr}}{\beta_c}\right) \right] \quad (3.9)$$

avec :

- E_{corr} potentiel de corrosion libre du système de corrosion uniforme à l'équilibre [V_{ref}],
- i densité de courant traversant l'interface électrolyte-métal du système uniforme forcé au potentiel E (impliquant une polarisation par rapport au potentiel d'équilibre E_{corr}) [A/m^2],
- i_{corr} densité de courant de corrosion correspondant à l'échange de densité de courant du système de corrosion uniforme [A/m^2],
- β_a et β_c coefficients de Tafel respectivement anodique et cathodique du système électrochimique [V].

L'équation (3.9) sera utilisée dans la suite du travail (chapitre 4) pour prendre en compte l'effet des armatures métalliques dans le corps d'épreuve. Elle permet de décrire pour les systèmes électrochimiques le comportement de l'acier en corrosion uniforme sachant que les paramètres électrochimiques (i_{corr} ; E_{corr} ; β_a ; β_c) dépendent de l'état de dépassivation de l'acier (Sohail et al., 2015) et sont choisis d'après le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 Valeurs-types des paramètres électrochimiques de l'acier pour une zone active et une zone passive (Laurens et al., 2016).

Paramètres	Zone active	Zone passive
i_{corr} [A/m^2]	0,1	10^{-4}
E_{corr} [V_{ref}]	-0,7	-0,1
β_a [V/dec]	0,06	0,4
β_c [V/dec]	0,16	0,16

La Figure 3-12 représente les formes typiques de la réponse de polarisation par rapport à des systèmes de corrosion active et passive. Les caractéristiques électrochimiques sont distinguées de la manière suivante (les indices «a» et «p» faisant référence à la corrosion active et passive respectivement) :

- $i_{corr,a} \gg i_{corr,p}$
- $E_{corr,a} < E_{corr,p}$
- $\beta_{a,a} \ll \beta_{a,p}$
- $\beta_{c,a} \approx \beta_{c,p}$

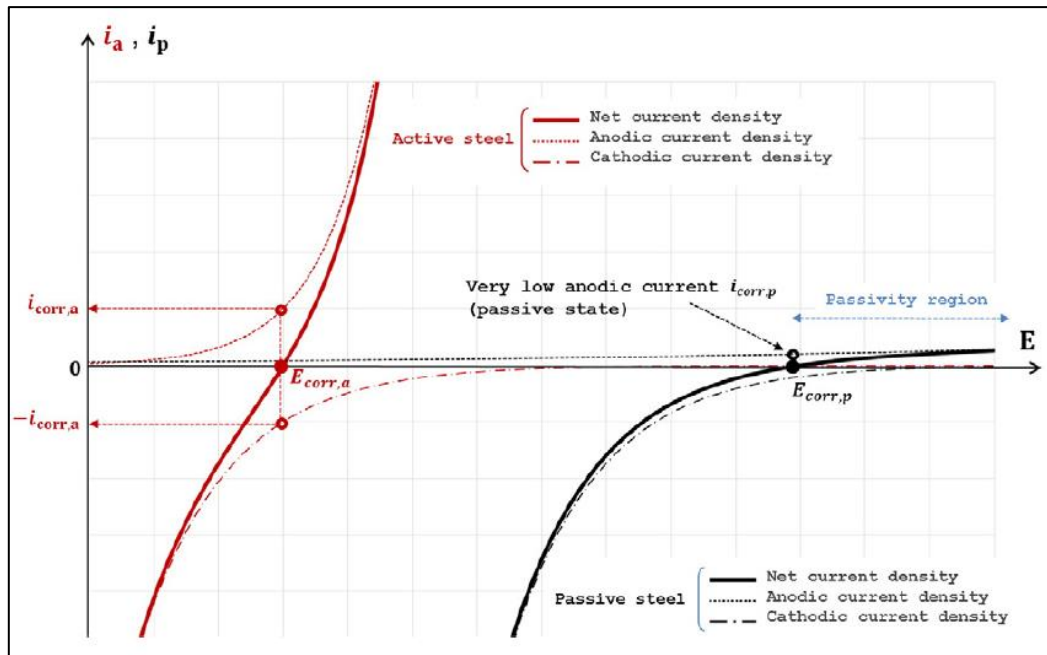


Figure 3-12 Courbes-types de polarisation des systèmes de corrosion active et passive (Laurens et al., 2016).

3.5.2 Effet de la température

L'influence de la température du matériau est notable sur sa résistivité. La température du béton influence la concentration et la mobilité des ions et aussi les interactions ion-ion et ion-solide (Castellote et al., 2002) et donc la résistivité mesurée. Pour une humidité relative constante, une augmentation de la température du béton implique une diminution de la résistivité (Figure 3-13) en raison d'une augmentation de la mobilité des ions dans la solution des pores et donc de leur capacité de transporter le courant (RILEM TC 154-EMC) (Polder, 2001).

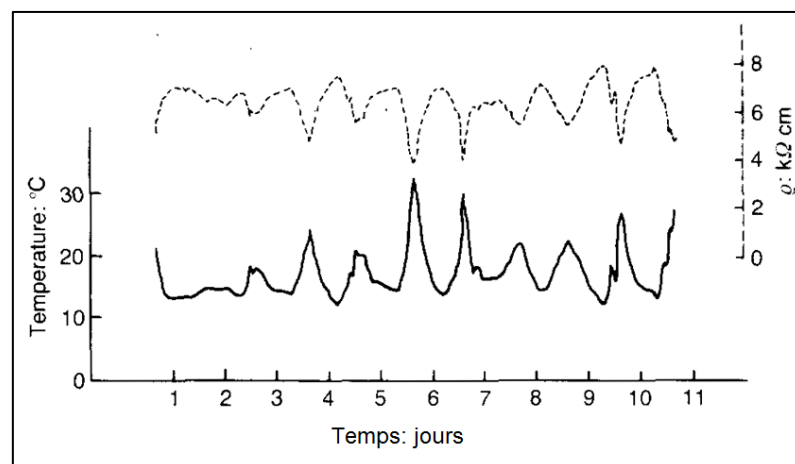


Figure 3-13 Variation de la résistivité électrique du béton avec sa température (Millard, 1991).

Dans une première approche, la relation d'Arrhenius peut être utilisée pour décrire l'effet de la température sur la conductivité électrique :

$$\sigma_{T_i} = \sigma_{T_0} \times \exp(b[T_0^{-1} - T_i^{-1}]) \quad (3.10)$$

avec :

- σ la conductivité du matériau [$1/\Omega.m = S/m$],
- T_0 la température de référence [K],
- T_i la température de mesure [K],
- b un facteur empirique dépendant du type de béton étudié [K]. b est pris égal à 2130 K, une valeur moyenne d'après (Gowers et al., 1993).

En conditions d'état d'équilibre, b varie dans l'intervalle allant de 1500 K à 4500 K en :

- augmentant avec la diminution de l'humidité relative pour une pâte de ciment, un mortier ou un béton donné,
- diminuant avec l'augmentation du rapport E/C du mélange pour une humidité relative donnée.

La dépendance de la conductivité de la solution poreuse à la température diffère considérablement de celle de la pâte de ciment ou du mortier ayant la même concentration en ions dans les pores. Ceci est dû à de fortes interactions ion-solide avec la pâte de ciment et aux mobilités électriques en solution en fonction de la température (Castellote et al., 2002).

L'effet de la température varie suivant l'état hydrique du béton (Polder, 2001). L'influence de l'humidité sur la dépendance en température peut s'expliquer par le fait qu'à faible HR, la solution interstitielle devient plus concentrée et plus présente dans des pores de petites dimensions, de sorte que le rapport de la surface de la paroi des pores au liquide augmente et par conséquent le degré d'interaction entre les ions et le solide augmente. Ces interactions peuvent être différentes pour des ciments de composition chimique différente (laitier, cendre volante). La composition du béton et la teneur en eau influencent à la fois la résistivité et sa dépendance à la température. Pour simplifier, on peut supposer que, dans la plage de 0 °C à 40 °C, la résistivité est doublée pour une diminution de la température de 20 °C ou que la résistivité varie de 3% à 5% par degré (Polder et al., 2000) (RILEM TC 154-EMC).

Il est donc nécessaire d'apporter des corrections dans les cas où des mesures de résistivités s'accompagnent de variations de température (par exemple exposition au soleil). Trois types de corrections sont abordées par Lataste (2002) :

- la correction proposée par Spencer (1937) et Woelfl and Lauer (1979) qui présentent une relation graphique (Figure 3-14) reliant la résistivité à la température par un terme correctif qui permet de trouver la valeur de la résistivité électrique à 70 °F (21 °C) (avec °C = (°F - 32) (5/9)),

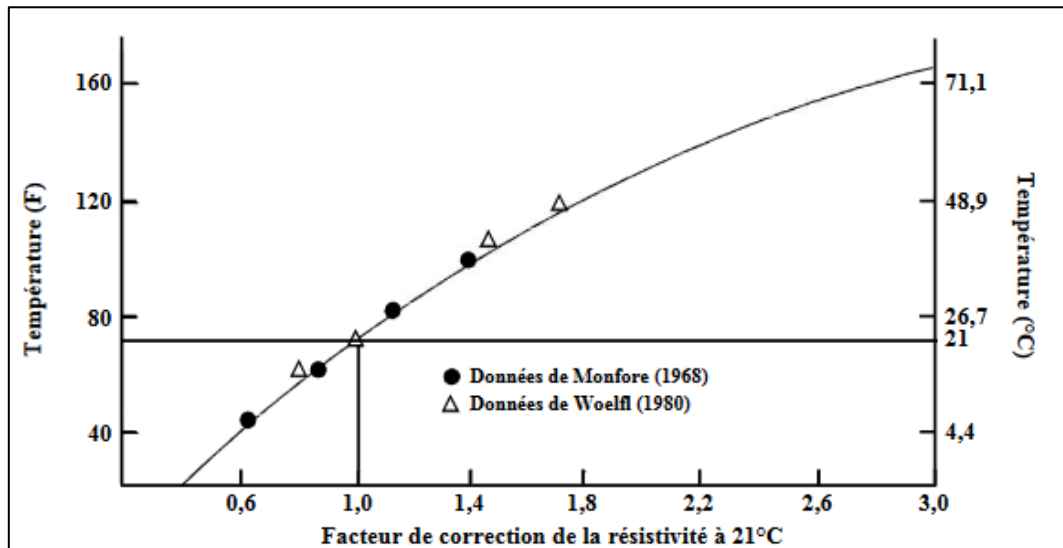


Figure 3-14 Courbe de correction des effets de la température sur la résistance électrique du béton (Spencer, 1937) dans (Woelfl and Lauer, 1979).

- la correction basée sur la relation d'Arrhenius (éq. 3.10) initialement développée pour l'étude des matériaux réfractaires, reliant la résistivité électrique à la température de mesure.

Cette relation est suggérée par le groupe de travail de la RILEM (Polder et al., 2000) pour la correction des effets thermiques sur la mesure de résistivité électrique.

- la correction à l'aide d'une expression utilisée surtout pour la résistivité des roches en géologie :

$$\rho_t = \frac{\rho_\theta}{[1 + \alpha \cdot (t - \theta)]} \quad (3.11)$$

avec :

- t la température de mesure [°C],
- θ la température de référence [°C],
- ρ_t et ρ_θ les résistivités respectives du matériau aux températures t et θ [$\Omega \cdot m$],
- α le coefficient de température du matériau [°C⁻¹] (degré centigrade). α est pris égal à 0.022 °C⁻¹ pour les bétons d'après Whittington *et al.* (1981).

3.6 Conclusion

Après une présentation rapide de l'ensemble des techniques non destructives disponibles pour caractériser la teneur en eau (sondes capacitives, GPR et sondes TDR), nous avons détaillé le principe de la méthode de résistivité électrique à courant continu en abordant les différentes techniques de mesure : cellules de laboratoire, mesures en surface et à cœur du matériau en utilisant des capteurs noyés, ces dernières pouvant être utilisées *in situ*. L'intérêt majeur de l'utilisation de la résistivité électrique dans cette thèse vient de sa très grande sensibilité à la teneur en eau qui conditionne la durabilité des bétons armés. Nous avons également étudié l'ensemble des facteurs influençant la résistivité électrique comme les constituants du béton armé et la température.

Dans ce travail, nous abordons spécifiquement le besoin de surveiller le profil de teneur en eau du béton sur toute l'épaisseur de la structure par mesure de résistivité électrique. Pour cela, nous disposons de plusieurs méthodes de mesure détaillées dans le paragraphe 3.4.3. Cependant, parmi les limites des méthodes surfaciques (TRE), on peut citer l'exploitation indirecte des résultats qui doivent être inversés pour remonter aux caractéristiques du matériau. Ces méthodes sont donc exclues car leur profondeur d'investigation ne dépasse généralement pas quelques centimètres (signaux atténués) et leur résolution est intrinsèquement dégradée avec la profondeur. Divers problèmes (irrégularités de surface, variabilité des matériaux, ségrégation d'agréats, etc.) génèrent une variabilité des mesures et pénalisent l'accès à des informations plus profondes. De plus, il y a nécessité de mouiller les surfaces des électrodes pour éviter la perte de contact avec le béton, ce qui n'est pas optimal pour le monitoring, d'où le besoin de développer un capteur noyé dans le béton. Parmi les capteurs existants, on peut citer le capteur MRE (paragraphe 3.4.3) interrogé en configuration à deux électrodes (électrodes d'injection confondues avec les électrodes de mesure) générant ainsi des problèmes de polarisation des électrodes, qui à leur tour perturbent la mesure. Quant au réseau des fils d'électrodes (paragraphe 3.4.3), on se confronte au problème des câbles invasifs dans le béton.

Dans la suite de notre travail, nous allons développer d'autres formes de capteurs destinés à être noyés dans le béton afin d'obtenir les profils de teneur en eau tout en limitant le caractère intrusif des câbles. Nous proposons, dans le chapitre 4, deux formes de capteur en circuit imprimé comme solution possible pour répondre à nos besoins et exigences.

Chapitre 4 Développement d'un dispositif de mesures de profils de résistivité

Dans le chapitre 3, nous avons souligné l'importance de l'évaluation non destructive pour l'inspection et le suivi de l'état de dégradation des structures. Dans le contexte des ouvrages de l'Andra, pour la mesure de la teneur en eau dans le béton (Chapitre 2), nous avons retenu la méthode de la résistivité électrique. Ce chapitre présente le développement d'un dispositif multi-électrodes noyé permettant de surveiller le profil de résistivité sur la profondeur afin de mieux anticiper les pathologies du béton. Nous présentons tout d'abord la conception numérique du dispositif et les essais expérimentaux préliminaires associés. Nous détaillons ensuite la conception de deux dispositifs retenus par la modélisation numérique et réalisés en circuit imprimé (CI). L'étude numérique montrera notamment la réponse de ces deux dispositifs à un profil de résistivité imposé. Enfin, une validation expérimentale, tout d'abord en solution puis dans le béton sera proposée.

La Figure 4-1 illustre la méthodologie suivie dans ce chapitre. L'outil numérique s'avère être un outil performant pour la conception et le développement d'un dispositif.

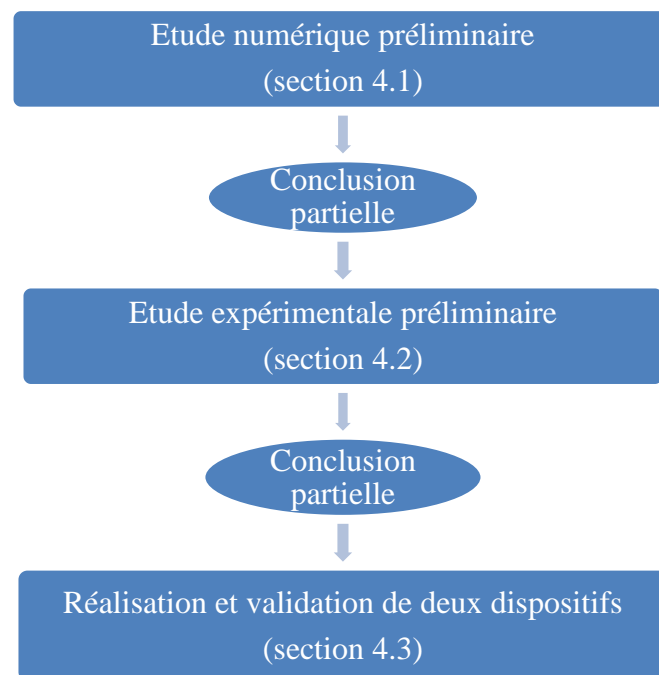


Figure 4-1 Organigramme présentant la méthodologie suivie dans ce chapitre.

4.1 Etude numérique préliminaire

L'objectif de ce paragraphe est de s'appuyer sur des modélisations numériques directes pour concevoir et tester différents dispositifs de mesure de la résistivité. Le but est de choisir les meilleures solutions possibles pour optimiser le nombre et la géométrie des électrodes (forme, position).

La résolution de la mesure spatiale souhaitée (en fonction de la profondeur dans le béton) pour l'application de l'ANDRA consiste en une valeur en plusieurs points dans le béton d'enrobage, idéalement tous les 1 cm sur les cinq premiers centimètres, puis un point tous les 5 cm. Cette résolution est déterminante pour optimiser les géométries des dispositifs et les espacements entre les électrodes.

4.1.1 Procédure de modélisation numérique

La simulation numérique est menée en utilisant une formulation électrostatique en trois dimensions d'espace (3D) dans le module AC/DC intégré à COMSOL Multiphysics[®], logiciel commercial de simulation de phénomènes physiques couplés utilisant la méthode des éléments finis.

Nous avons modélisé la diffusion du courant injecté en utilisant l'équation de Poisson (éq. 4.1) pour déterminer le champ scalaire de potentiel électrique V pour une distribution de résistivité électrique donnée ρ .

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V \right) = -I_s \delta(r - r_s) \quad (4.1)$$

où I_s est l'intensité de courant au niveau d'une source ponctuelle S dans r_s , δ une distribution tridimensionnelle de Dirac et r la position de tout point de l'espace.

En outre, les conditions aux limites aux extrémités du domaine sont des flux sortants nuls pour simuler une isolation parfaite.

La Figure 4-2 illustre la procédure de simulation numérique suivie.

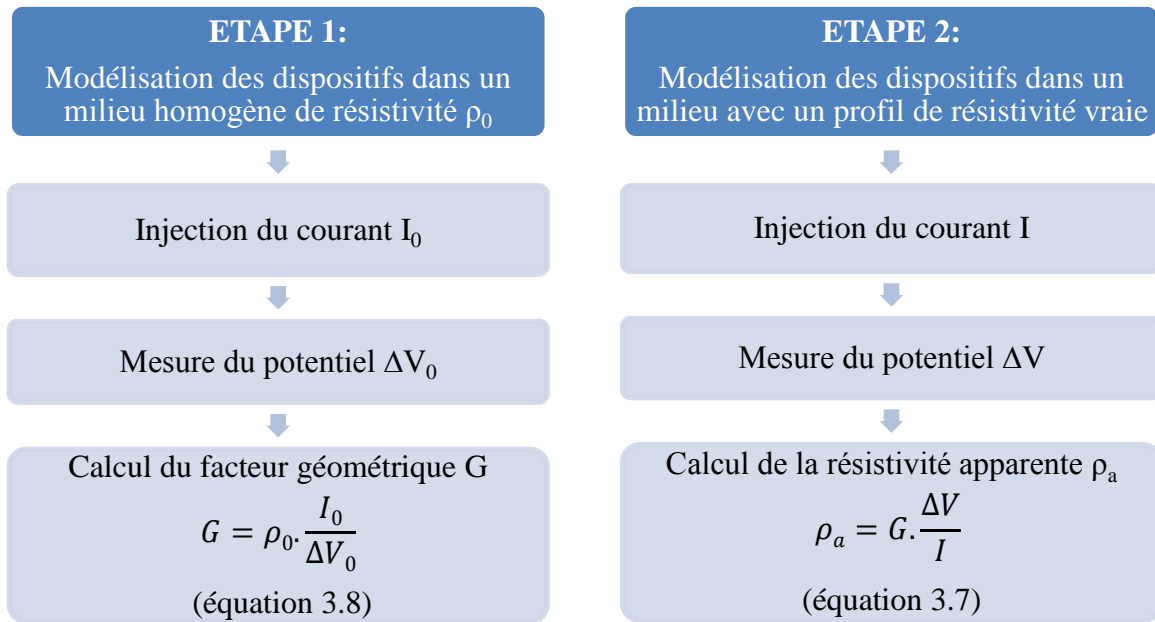


Figure 4-2 Procédure de simulation numérique

Notons que les phénomènes de polarisation aux interfaces entre le béton et les électrodes du dispositif ne sont pas pris en compte dans la modélisation numérique (McCarter et al., 2015).

4.1.2 Modèle vrai choisi

Une dalle de $60 \times 60 \times 30 \text{ cm}^3$ est modélisée ; 30 cm d'épaisseur au lieu de 60 cm prévue pour la maquette à l'échelle 1/2 de l'ANDRA car le temps de conditionnement pour imposer un gradient dans 60 cm d'épaisseur est important. Le maillage en éléments finis utilisé est fortement raffiné avec une dimension maximale des éléments tétraédriques égale à 0,5 mm sur l'ensemble du modèle.

Le profil imposé (« vrai ») choisi est une fonction de type Weibull, fonction classique en ouvrages d'art correspondant aux profils de pénétration d'eau dans le béton (Fares et al., 2015). Dans un souci de simplification, on considère, dans un premier temps, que cela pourrait être étendu à la résistivité. La forme générale de la fonction de distribution Weibull en fonction de la profondeur z [m] est donnée dans l'équation 4.2 :

$$F(z, k, \lambda, \rho_{max}, \rho_{min}) = (\rho_{max} - \rho_{min}) * e^{-\left(\frac{z}{\lambda}\right)^k} + \rho_{min} \quad (4.2)$$

Cette fonction a 4 paramètres : k [-] le paramètre de forme (raideur du gradient), λ [m] le paramètre d'échelle (profondeur du point d'inflexion du gradient) et deux paramètres ρ_{min} et ρ_{max} [$\Omega \cdot m$] qui modifient le minimum et le maximum de la fonction.

Pour proposer un modèle synthétique réaliste nous imposons ρ_{min} et ρ_{max} dans la gamme de résistivité électrique pour différents bétons (Polder et al., 2000). Pour un béton formulé avec un ciment Portland ordinaire CEM I, la résistivité varie entre 50 et 200 $\Omega.m$ dans des conditions humides, et entre 100 et 400 $\Omega.m$ dans des conditions naturelles à l'extérieur sans carbonatation. Il a été estimé que cette plage de valeurs de résistivité ne serait pas dépassée dans l'application cible, l'évolution phénoménologique des alvéoles de stockage en béton de déchets radioactifs à vie longue et moyenne activité. Ainsi, nous proposons dans la simulation numérique une variation de résistivité exponentielle comprise entre $\rho_{max} = 400 \Omega.m$ en surface ($z = 0 \text{ m}$) et $\rho_{min} = 50 \Omega.m$ en profondeur ($z = 0,3 \text{ m}$). Les paramètres de forme et d'échelle $k = 3$ et $\lambda = 1/13 \text{ m}$ sont déterminés afin d'obtenir une diminution de résistivité plus importante dans la première moitié de l'épaisseur de la dalle qu'à cœur (Figure 4-3). Ainsi l'équation de la variation de résistivité ρ en fonction de la profondeur z imposée dans le modèle numérique est donnée dans l'équation 4.3 :

$$\rho(z) = 350e^{-(13z)^3} + 50 \quad (4.3)$$

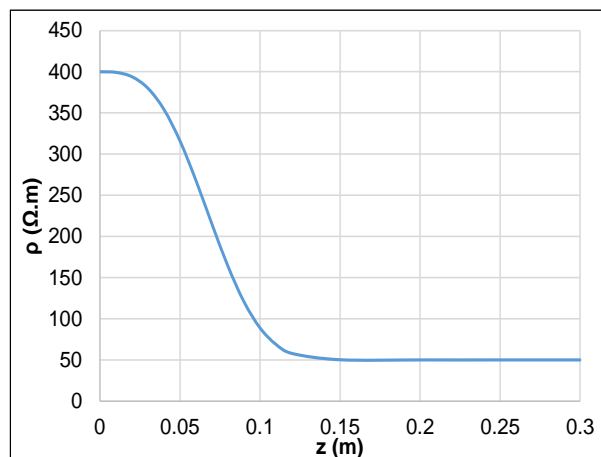


Figure 4-3 Profil de résistivité électrique dans le modèle numérique par une fonction de type Weibull en fonction de la profondeur.

Les meilleures configurations de mesure sont déterminées en calculant l'écart entre la résistivité vraie du milieu (imposée) et la résistivité apparente « mesurée » (simulée, dans notre cas). Des calculs préliminaires ont permis de vérifier les convergences et l'importance du raffinement du maillage autour des électrodes, de même que l'importance de la configuration d'interrogation des électrodes.

4.1.3 Synthèse des dispositifs d'électrodes étudiés

Trois dispositifs multi-électrodes sont étudiés : Wenner, Anneau et Barrette. Dans ce paragraphe, nous simplifions le maillage en modélisant des électrodes ponctuelles. L'influence de la dimension des électrodes sur la mesure est traitée dans le paragraphe 4.1.4.

Le premier dispositif conçu est le dispositif de type Wenner, constitué de 4 électrodes régulièrement espacées par une distance « a » et réparties sur une ligne placée à une profondeur donnée parallèlement à la surface (Figure 4-4 (a)). L'influence de l'espacement « a » entre les électrodes est illustrée dans le paragraphe 4.1.5. Le courant est injecté sur les électrodes externes et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes internes. Les électrodes sont à la même profondeur ce qui permet *a priori* des mesures qui concentrent l'information sur cette profondeur. Le volume d'investigation est une forme allongée le long de l'alignement d'électrodes et aplatie dans la direction perpendiculaire (parallèle à z) (Dahlin and Zhou, 2004; Loke, 1999).

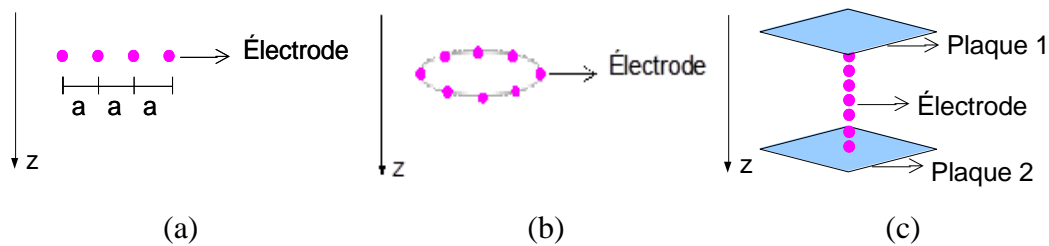


Figure 4-4 Vue schématique des dispositifs : (a) Wenner, (b) Anneau, (c) Barrette.

Le deuxième dispositif conçu est le dispositif Anneau, constitué de huit électrodes réparties tous les 45° sur un cercle de diamètre 10 cm, placé à une profondeur donnée parallèlement à la surface (Figure 4-4 (b)). En pratique, ce dispositif favorise le passage des granulats au moment du coulage et offre la possibilité de moyennner plusieurs valeurs obtenues en interrogeant plusieurs combinaisons de quatre électrodes autour du cercle et ainsi d'analyser la variabilité (anisotropie) de la mesure dans le plan (x, y) (quadripôle carré (Lataste, 2002)). Plusieurs configurations d'interrogation des électrodes (détaillées dans le paragraphe 4.5) sont étudiées et une moyenne arithmétique est considérée. Comme le dispositif Anneau est parallèle à la surface (donc perpendiculaire à z), nous supposons que les combinaisons (quatre électrodes) autour du cercle devraient donner une valeur identique de résistivité apparente.

Cependant, puisque la résolution spatiale souhaitée est centimétrique, la mise en place de ces dispositifs dans le béton avec un espacement d'un centimètre dans la profondeur peut s'avérer

problématique. Nous avons donc proposé une troisième solution, le dispositif Barrette, constitué de plusieurs électrodes (le nombre d'électrodes dépend de la profondeur auscultée) régulièrement espacées de 1 cm de façon rectiligne et perpendiculairement à la surface. Le dispositif est placé entre deux grilles métalliques carrées reposant sur les faces supérieure et inférieure du modèle (Figure 4-4 (c)). L'influence de la géométrie des grilles est étudiée dans le paragraphe 4.1.4.3. Le principe est le suivant : on injecte du courant entre les 2 grilles métalliques et on mesure la différence de potentiel généré sur deux électrodes consécutives de la barrette. Cette configuration génère des lignes de courant parallèles entre les grilles (principe de résistivité par transmission (Figure 3-3)). Nous supposons que la forme du champ électrique permet un volume étudié faible concentré entre la paire d'électrodes utilisée pour la mesure de la différence de potentiel. Cette configuration de mesure est nommée « configuration Transmission » pour la suite de notre travail.

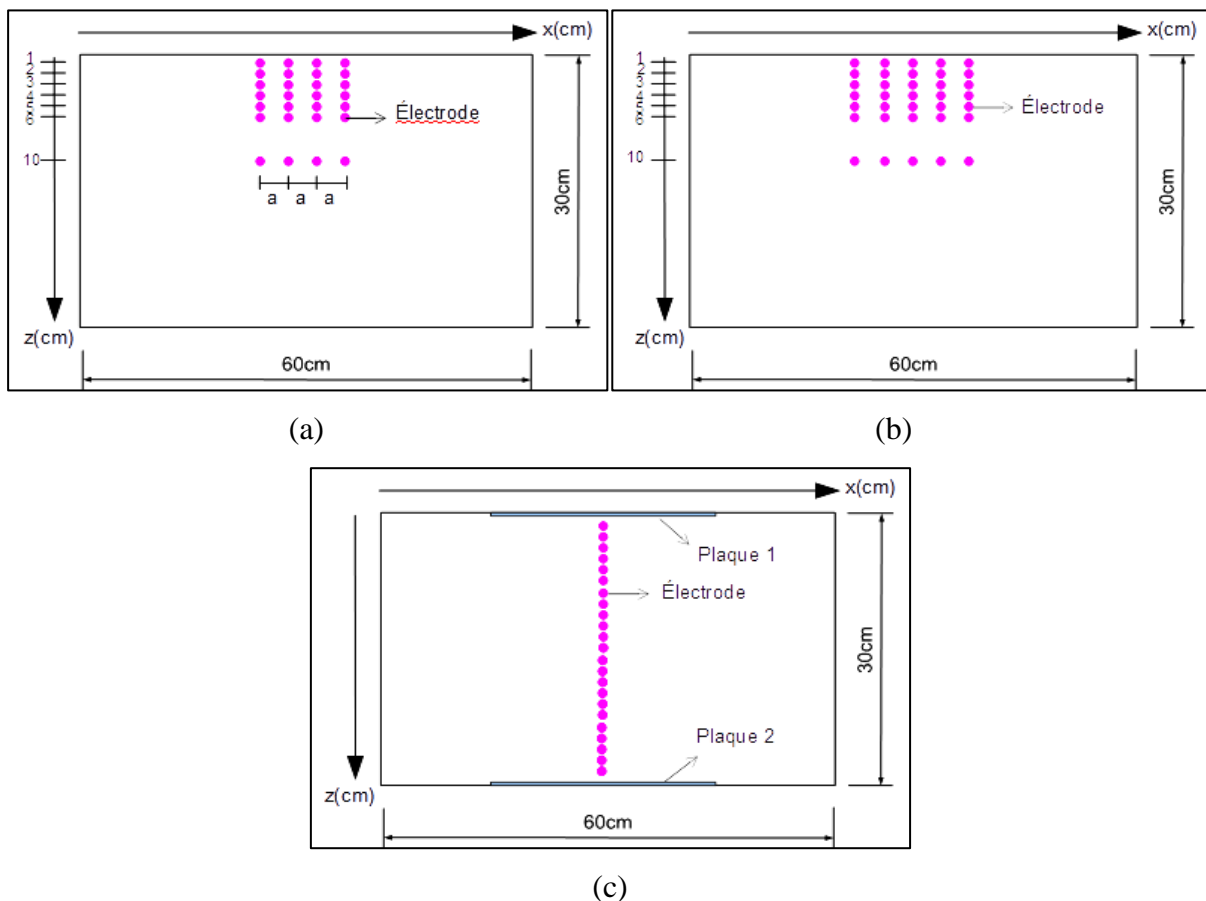


Figure 4-5 Vues schématiques de la section (x, z) de la dalle dans le modèle numérique avec : (a) le Dispositif Wenner, (b) le Dispositif Anneau, (c) le Dispositif Barrette.

Afin de pouvoir comparer les réponses des dispositifs avec le profil de résistivité vraie dans le modèle (équation 4.3), nous avons modélisé sept dispositifs Wenner ($a = 1$ cm) (Figure 4-5 (a)) et sept dispositifs Anneau (Figure 4-5 (b)) à des profondeurs différentes ($z = 1$ cm, 2 cm,

3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm et 10 cm) dans la dalle de dimensions $60 \times 60 \times 30 \text{ cm}^3$. Pour le dispositif Barrette, deux grilles métalliques carrées de côté $L = 30 \text{ cm}$ sont modélisées sur les surfaces du modèle, une rangée de 29 électrodes ponctuelles espacées de 1 cm et alignées suivant la direction z (Figure 4-5 (c)) sont aussi modélisées sur l'axe de l'éprouvette.

Nous avons tracé sur la Figure 4-6 les profils de résistivité apparente simulés en fonction de la profondeur pour les trois dispositifs : Anneau, Wenner et Barrette.

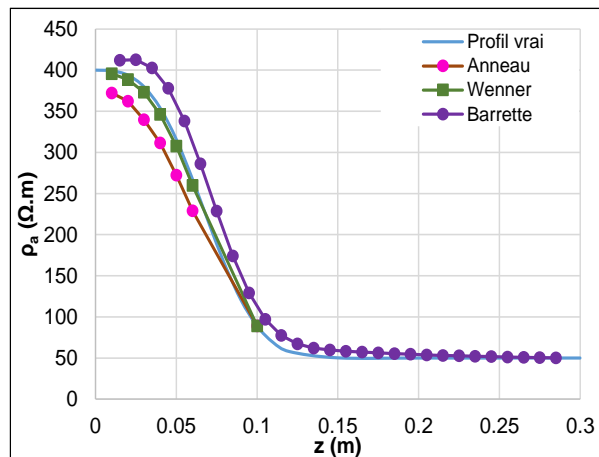


Figure 4-6 Profils de résistivité apparente simulée en fonction de la profondeur pour les dispositifs Anneau, Wenner et Barrette, superposés sur le profil « vrai » de résistivité.

Il ressort de la Figure 4-6 que l'écart entre la résistivité vraie du matériau et la résistivité apparente simulée est faible pour le dispositif Wenner et plus élevé pour les dispositifs Anneau et Barrette. L'écart moyen de résistivité est de 9,3% pour le dispositif Anneau, 1,7% pour le dispositif Wenner et 12,2% pour le dispositif Barrette. Ces écarts dépendent de la géométrie des dispositifs dans le milieu ainsi que de la forme du profil de résistivité vraie.

4.1.4 Etude paramétrique pour le dimensionnement des dispositifs

Dans cette phase de conception préliminaire, nous étudions l'influence de différents paramètres dans le modèle numérique :

- la dimension des électrodes,
- l'espacement entre les électrodes,
- la géométrie des plaques (grilles) métalliques du dispositif Barrette,
- le support des électrodes,
- la présence d'armatures métalliques.

4.1.4.1 Influence de la dimension des électrodes pour le dispositif Wenner

Chaque dispositif est constitué d'un certain nombre d'électrodes individuelles, reliées entre elles par un matériau isolant. Ce paragraphe montre l'influence de la dimension des électrodes sur la capacité du dispositif à la détection du profil de résistivité (pour savoir si nous pouvons simuler des électrodes cylindriques par des points ou si leur taille réelle doit être prise en compte). Les formes possibles des électrodes étudiées par modélisation numérique sont :

- électrodes ponctuelles : représentées par des points pour simplifier le maillage numérique,
- électrodes sphériques/cylindriques : représentées par des sphères/cylindres de dimensions faibles vis-à-vis de la distance entre électrodes (l'espacement inter-électrodes a été choisi cinq fois supérieur à la dimension des électrodes (Gowers and Millard, 1999)).

Nous avons choisi le dispositif Wenner ($a = 1$ cm) avec deux dimensions d'électrodes : ponctuelles (modélisées par un point sous COMSOL Multiphysics) et cylindriques (modélisées par un cylindre de diamètre 0,2 cm et de longueur 0,2 cm). Nous avons tracé sur la Figure 4-7 le profil de résistivité apparente en fonction de la profondeur pour les deux dimensions d'électrode.

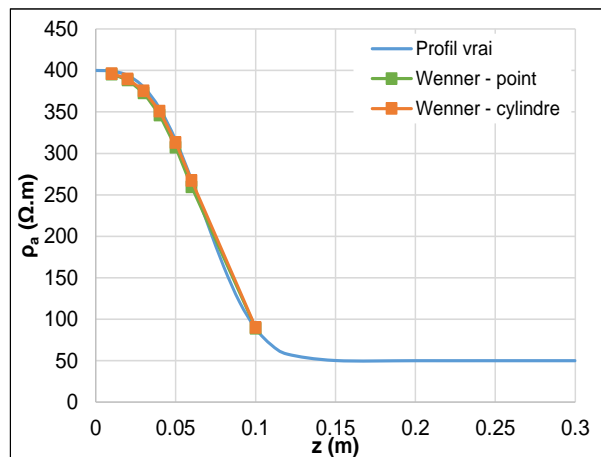


Figure 4-7 Profil de la résistivité apparente simulée en fonction de la profondeur pour le dispositif Wenner pour des électrodes ponctuelles et cylindriques par rapport au profil de résistivité vraie dans la dalle.

Il ressort de la Figure 4-7 que les écarts relatifs entre la variation de résistivité vraie et les résistivités apparentes simulées sont relativement faibles (environ 1,7% en moyenne sur les sept profondeurs). L'écart relatif entre les résistivités apparentes simulées pour les deux dimensions d'électrodes (ponctuelles et cylindriques) est de 3,1% en moyenne. Par conséquent, pour la suite de ce travail, les électrodes ponctuelles seront retenues, ce qui nous

permet de nous affranchir des contraintes de maillage au niveau des électrodes cylindriques qui ont un très faible volume par rapport au volume de la dalle. Ceci concerne uniquement cette phase d'optimisation numérique des sondes (section 4.1). Pour la validation des capteurs (dans l'eau ou le béton) on prendra en compte la géométrie exacte des électrodes.

4.1.4.2 Influence de l'espacement entre les électrodes pour le dispositif Wenner

Cette section met en évidence l'influence de l'espacement entre les électrodes sur la réponse du dispositif Wenner. Trois espacements différents sont considérés: $a = 1$ cm, 2 cm et 5 cm. On peut voir sur la Figure 4-8 que lorsque la distance entre les électrodes diminue, la différence entre les profils de résistivité apparente et le profil de résistivité « vraie » (ou imposé) dans le milieu diminue. En effet, Millard (1991) a recommandé de faire les mesures avec un espacement entre électrodes suffisamment petit pour se rapprocher de la valeur de résistivité réelle du milieu (le volume d'investigation étant plus faible). Cependant, la mesure réalisée avec une distance inter-électrodes inférieure à 1 cm risque d'être trop faible face au volume élémentaire représentatif du béton ($VER > 3D_{max}$) et donc très variable en fonction de la position de mesure y compris dans un milieu sans gradient. Ainsi, pour le reste de notre travail, une distance de 1 cm sera retenue.

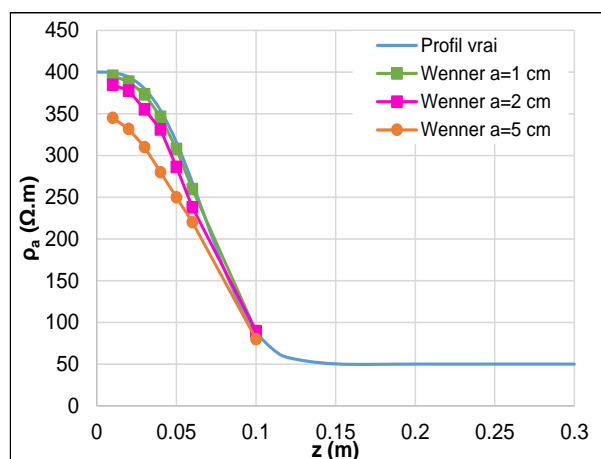
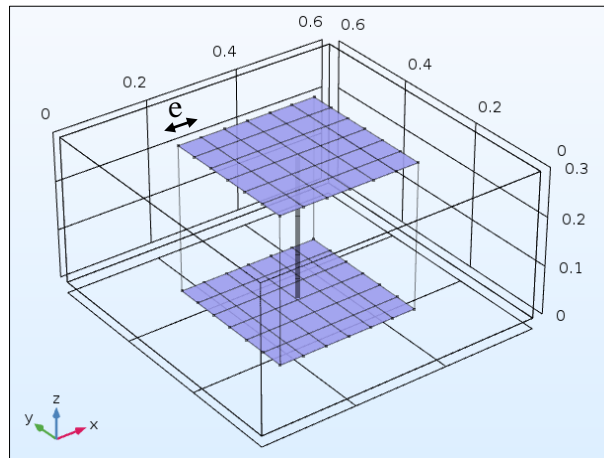


Figure 4-8 Variation de la résistivité apparente en fonction de la profondeur pour le dispositif Wenner pour différents espacements inter-électrodes par rapport au profil de résistivité vraie.

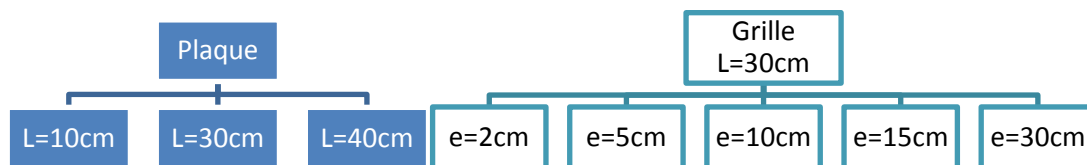
4.1.4.3 Influence des dimensions des plaques ou grilles métalliques du dispositif Barrette

Concernant le dispositif Barrette, l'influence des dimensions des plaques ou grilles métalliques d'injection du courant sur la réponse du dispositif est étudiée pour voir si nous pouvons modéliser une plaque à la place d'une grille pour simplifier notre modèle numérique.

En réalité, des grilles sont conçues pour faciliter le coulage du béton frais et permettre les échanges d'eau en surface pendant le séchage.



(a)



(b)

Figure 4-9 Schématisation de l'étude numérique des tailles de plaques ou grilles du dispositif Barrette avec les dimensions L et e variables : (a) vue 3D du modèle avec grilles, (b) tableau simplifié des paramètres variables.

Tout d'abord, trois dimensions de plaques carrées de côté $L = 10$ cm, 30 cm et 40 cm sont étudiées pour évaluer l'impact de la variation de leurs dimensions sur le confinement des lignes de courant et donc sur la mesure de la résistivité apparente. Ensuite, plusieurs dimensions de mailles des deux grilles métalliques $e = 2$ cm à 30 cm ($e = 30$ cm est équivalent à un carré vide) sont étudiées pour évaluer l'effet sur le confinement des lignes de courant (Figure 4-9). Les grilles sont modélisées comme un quadrillage de fils sans épaisseur avec une conductivité de l'acier de l'ordre 10^6 S.m⁻¹. Un courant de 1 mA est injecté entre les grilles métalliques et la différence de potentiel est mesurée entre deux électrodes consécutives de la Barrette. Pour des plaques de dimension $L = 30$ cm, on visualise la répartition du potentiel électrique sur la Figure 4-10 et les lignes de courant sur la Figure 4-11 (a). Nous remarquons une distribution symétrique du potentiel allant de $+1$ V à -1 V et des lignes de courant parallèles concentrées plus ou moins à l'intérieur des deux plaques d'injection du courant (Figure 4-11 (a)). Notons que si le courant est injecté entre deux électrodes ponctuelles à la place des plaques (Figure 4-11 (b)), les lignes de courant sont plus réparties

dans le volume de la dalle. D'où l'intérêt de l'utilisation des plaques pour mieux confiner les lignes de courant dans la zone du dispositif.

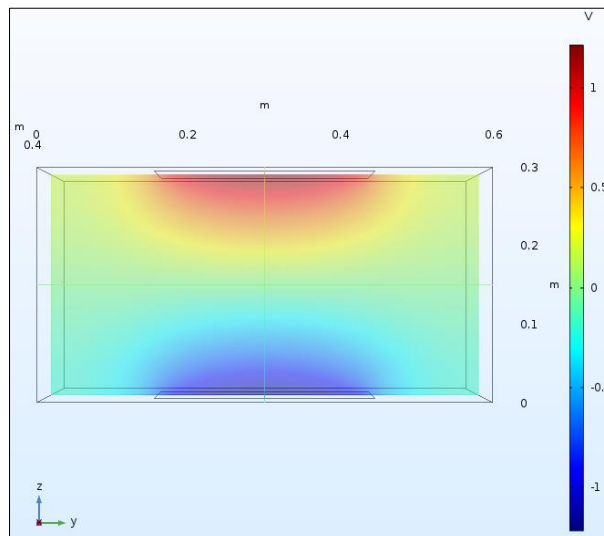


Figure 4-10 Vue 2D de la répartition du potentiel électrique entre deux plaques de dimension $L = 30\text{ cm}$ pour le Dispositif Barrette.

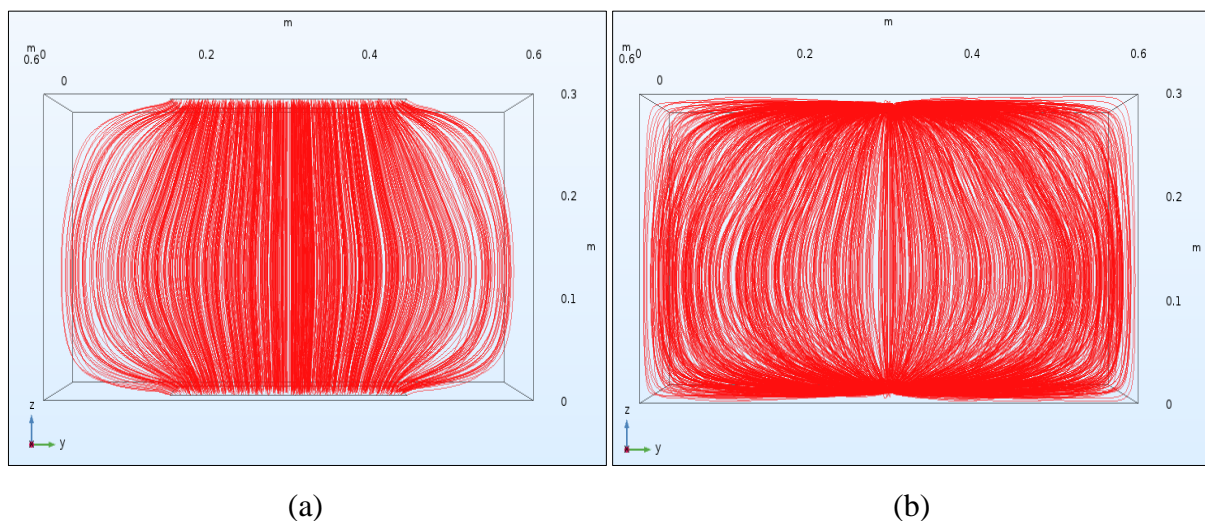


Figure 4-11 Visualisation de lignes de courant dans le volume de la dalle :(a) injection du courant entre deux plaques de dimension $L = 30\text{ cm}$, (b) injection du courant entre deux électrodes ponctuelles.

Le profil de résistivité apparente simulée en fonction de la profondeur pour les plaques de différentes dimensions est illustré dans la Figure 4-12.

Il ressort de la Figure 4-12 (a) que lorsque la longueur L du côté de la plaque d'injection augmente, l'écart moyen entre la résistivité apparente simulée et la résistivité « vraie » du milieu diminue. En effet, pour une plaque de 10 cm de côté, l'écart moyen est de 21% , en revanche pour une plaque de 40 cm de côté, l'écart moyen est de $7,7\%$.

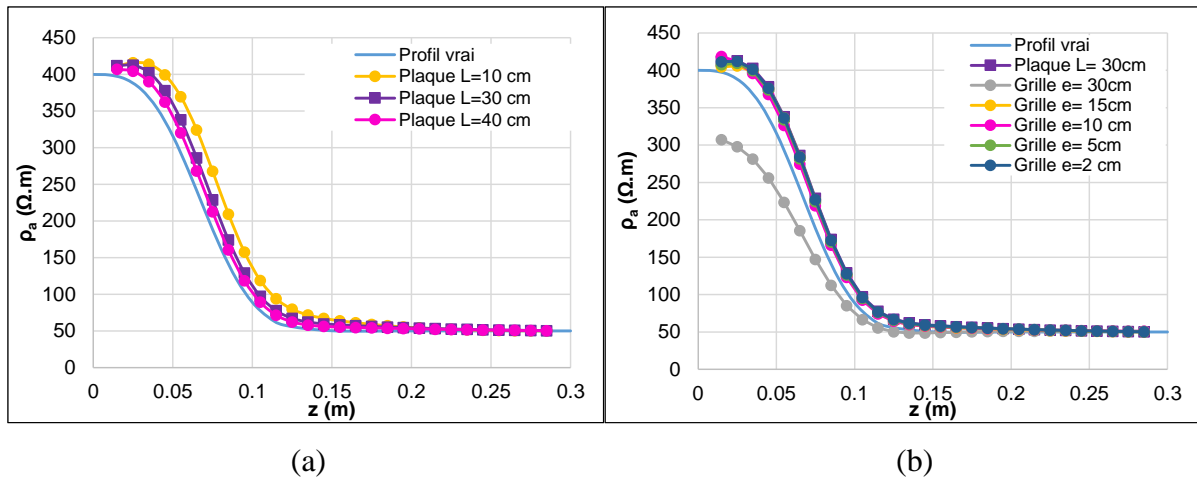


Figure 4-12 Profil de la résistivité apparente en fonction de la profondeur : (a) pour différentes dimensions des plaques, (b) pour différentes dimensions des mailles de grilles.

Lorsque la grille d'injection est constituée d'une maille unique de 30 cm de côté ($e = 30$ cm), un écart relatif important est observé (25%) entre les gradients réel et mesuré dû au trop faible confinement des lignes de courant. Il est montré dans la Figure 4-12 (b) qu'il suffit d'ajouter deux lignes au centre de la grille ($e = 15$ cm) pour que la mesure se rapproche du profil vrai.

Ainsi, pendant la conception numérique préliminaire du dispositif, nous pouvons modéliser une plaque à la place d'une grille pour nous affranchir des problèmes de maillage numérique possibles et simplifier notre modèle.

4.1.4.4 Influence du support des électrodes pour le dispositif Barrette

Dans ce paragraphe, le dispositif Barrette est formé de deux plaques métalliques de côté $L = 30$ cm. Nous étudions la mise en place d'un support isolant (avec une conductivité de l'ordre 10^{12} S.m⁻¹) reliant les électrodes ponctuelles avec deux épaisseurs différentes, $e_p = 1$ mm et 3mm (pour une longueur et une largeur identiques du support) (Figure 4-13). La Figure 4-14 montre que la présence d'un support isolant dans le modèle a très peu d'influence sur la valeur de la résistivité apparente simulée (moins de 2,8% d'écart en moyenne entre les profils avec et sans support).

Ainsi, pendant la conception numérique préliminaire du dispositif, nous pouvons simplifier notre modèle en évitant de modéliser le support des électrodes.

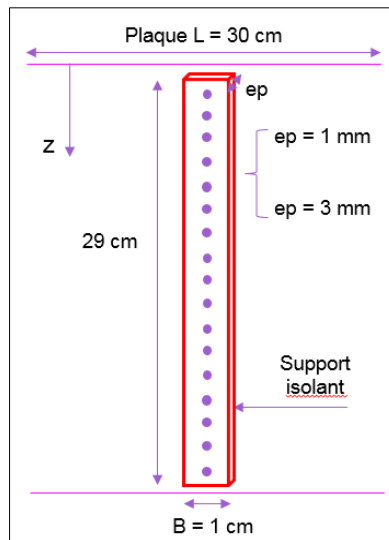


Figure 4-13 Géométrie et dimensions du support isolant pour le dispositif Barrette dans la simulation numérique.

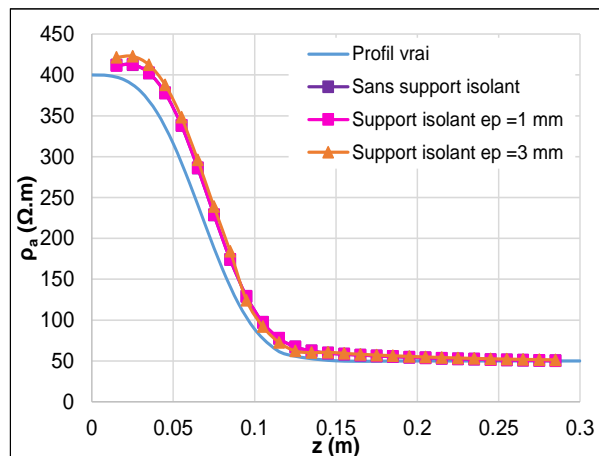


Figure 4-14 Profil de la résistivité apparente en fonction de la profondeur pour différentes dimensions du support isolant.

4.1.4.5 Influence de la présence des armatures

La présence d'acier est susceptible de perturber les mesures de résistivité électrique (Millard, 1991; Nguyen et al., 2017; Polder, 2001). L'acier étant un matériau significativement plus conducteur que la solution interstitielle du béton, la résistivité apparente est plus faible au voisinage des armatures que la résistivité du béton (Garzon et al., 2014; Presuel et al., 2013). Ainsi, la présence du ferrailage dans la structure est étudiée pour déterminer comment elle modifie la sensibilité de la mesure du profil de résistivité dans le béton.

Le dispositif Barrette, avec une plaque d'injection de longueur $L = 30$ cm, est retenu dans cette partie de l'étude. Le courant est injecté entre les plaques à la surface du modèle et les potentiels sont mesurés sur les points espacés de 1 cm situés entre les deux plaques. Des armatures de 12 mm de diamètre sont placées à une distance 4 cm de chacune des deux

surfaces de la dalle (enrobage). De plus, 4 épingles de 12 mm de diamètre placées à l'intersection de deux barres d'acier permettent de relier les 2 lits d'armatures (Figure 4-15). Notons que les armatures longitudinales, transversales et les épingles s'interpénètrent (axe à la même hauteur). L'influence des armatures sur la mesure de résistivité est modélisée, pour deux dimensions de mailles d'armatures différentes : 40 cm x 40 cm et 20 cm x 20 cm. L'ensemble de cette étude permettra de proposer des prescriptions sur le positionnement des capteurs noyés dans la structure afin de diminuer efficacement les éventuelles perturbations de la mesure par le ferrailage.

Deux méthodes de modélisation des aciers sont testées dans ce paragraphe : la « conduction » et la condition de « Butler-Volmer » (paragraphe 3.5.1.3).

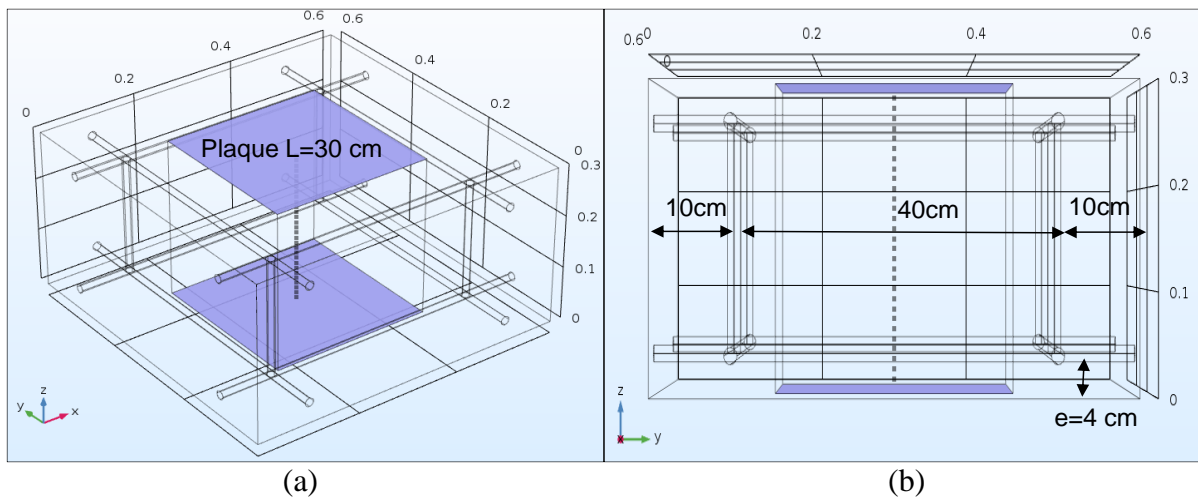


Figure 4-15 Détails géométriques de la simulation du dispositif Barrette (avec plaques) dans la dalle armée, avec un maillage d'armatures de 40 cm x 40 cm : (a) vue 3D oblique, (b) vue 3D de face (en perspective).

Le profil de la résistivité apparente en fonction de la profondeur est illustré sur la Figure 4-16 pour les deux dimensions de maillage d'armatures. Les deux graphes montrent que la valeur de résistivité apparente simulée varie en fonction de l'espacement entre les armatures d'une part, et en fonction de la méthode de modélisation des armatures (conduction ou Butler-Volmer) d'autre part. L'écart moyen entre les résistivités apparentes simulées dans les modèles avec armature et le modèle sans armature est résumé dans le Tableau 4-1. Il ressort qu'un écart non négligeable (35%) existe entre le profil du modèle sans armature et le profil du modèle avec un maillage restreint de 20 cm x 20 cm en condition de Butler-Volmer avec acier actif. En revanche, avec un maillage de 40 cm x 40 cm ou un maillage de 20 cm x 20 cm en condition de Butler-Volmer avec acier passif, l'écart moyen avec le profil du modèle sans armatures est très faible, variant de 1 à 6% suivant la profondeur. Ainsi lorsque la dimension

de la maille d'armatures augmente, l'influence des armatures diminue. Ceci a été confirmé dans les études de Polder et Sengul (Polder et al., 2000; Sengul and Gjrv, 2008) qui ont recommandé d'effectuer la mesure de résistivité loin des armatures pour réduire le plus possible leur impact. Par ailleurs, l'acier présent en état passif (cas de notre étude) perturbe moins les mesures de résistivité électrique qu'un acier présent en état actif. Il est intéressant de voir aussi qu'en condition de Butler-Volmer pour un acier passif, la taille de la maille d'armatures influence très peu la valeur de résistivité apparente. En revanche, pour un acier actif, la taille de cette maille influence plus la valeur de la résistivité apparente.

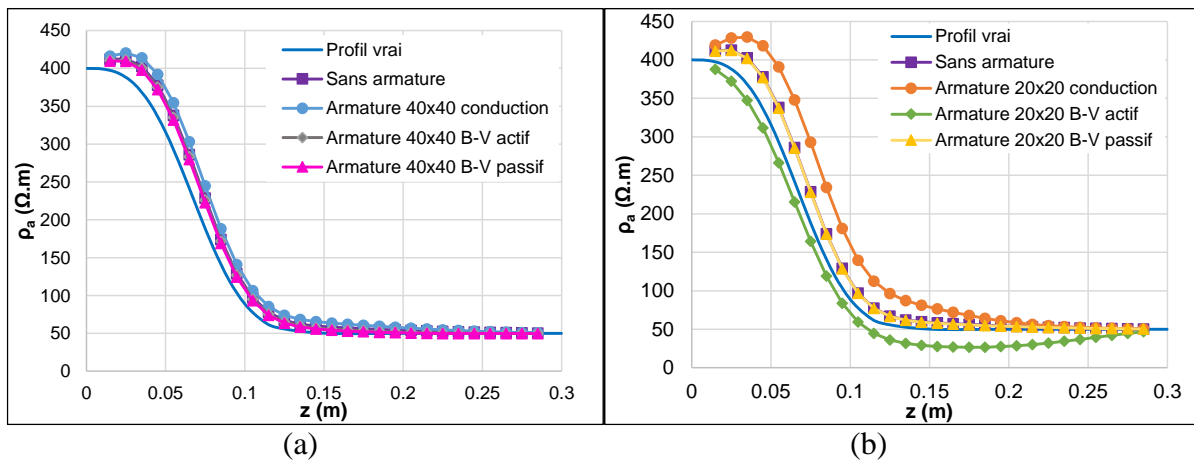


Figure 4-16 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur dans la dalle armée : (a) pour un maillage d'armatures de 40 cm x 40 cm, (b) pour un maillage d'armatures de 20 cm x 20 cm.

Tableau 4-1 Ecart moyen entre les résistivités apparentes simulées dans les modèles avec armature et le modèle sans armature

		Maillage 40 cm x 40 cm	Maillage 20 cm x 20 cm
Conduction		6%	20%
Butler-Volmer	Actif	4%	35%
	Passif	1%	2%

Au final, pour le dispositif Barrette noyé dans une épaisseur de 30 cm de béton, la présence des armatures en état passif n'a pas une influence très forte sur les mesures de résistivités apparentes. Ce résultat, très encourageant pour l'application visée, est toutefois très surprenant au regard de la littérature qui précise que les méthodes résistives sont très sensibles au ferrailage (Lataste, 2002; Polder et al., 2000; Sengul and Gjrv, 2008). On rappelle que ces résultats sont obtenus avec le modèle du dispositif Barrette choisi qui confine fortement

les lignes de courant. Nous proposons alors de positionner les dispositifs au centre des mailles d'armatures afin de réduire les éventuelles perturbations de la mesure par le ferrailage.

4.1.5 Conclusion partielle

Dans cette première partie, nous nous sommes appuyée sur des modélisations numériques directes pour concevoir et tester différents dispositifs de mesure de la résistivité électrique. Trois dispositifs multi-électrodes sont étudiés : Wenner, Anneau et Barrette. La réponse de chaque dispositif est comparée à celle d'un profil de résistivité « vraie » (imposée) dans des modèles sous COMSOL Multiphysics. Plusieurs études paramétriques sont également réalisées. En résumé, lors de cette phase de conception numérique préliminaire du dispositif et dans le but de nous affranchir des éventuels problèmes de maillage, nous avons pu montrer qu'il est possible, sans impacter significativement les résultats de simulations numériques,

- de modéliser les électrodes par des points,
- de modéliser une grille par une simple plaque,
- d'éviter de modéliser le support isolant des électrodes.

Ceci n'est vrai que pour ce travail d'optimisation des sondes. Pour la partie expérimentale (dans l'eau ou le béton) on prendra en compte la géométrie exacte des électrodes et du support dans la modélisation numérique et dans le calcul du facteur géométrique G .

En outre, nous avons montré qu'une distance inter-électrodes de 1 cm est optimale pour le dispositif Wenner et que, pour le dispositif Barrette positionné au centre de la maille d'armatures, la présence des armatures en état de corrosion passif n'a pas une influence significative sur les mesures de résistivités apparentes.

Tenant compte de toutes ces informations, une étude expérimentale préliminaire des dispositifs Wenner et Barrette réalisée dans le béton, va permettre d'optimiser davantage la géométrie et le choix des matériaux.

4.2 Etudes expérimentales préliminaires des dispositifs dans un béton

Des expériences préliminaires dans un béton sont réalisées avec le dispositif Wenner et le dispositif Barrette. Le béton utilisé dans cette étude est à base de ciment de type 1 (CEM I) avec un rapport E/C de 0,59 et une porosité accessible à l'eau de $15,0\% \pm 0,9\%$. L'appareil de mesure utilisé est le résistivimètre TIGRE (Terrascan) du LMDC. La formulation du béton et les appareils de mesure sont présentés en détail dans les paragraphes 5.3.1 et 5.5.

4.2.1 Dispositif Wenner

Trois plaquettes en backélite (Figure 4-17) de dimensions $5 \times 1 \times 0,2 \text{ cm}^3$ sont placées à des profondeurs différentes $z = 2 \text{ cm}$, 6 cm et 10 cm dans un récipient cubique de dimensions $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$. Chaque plaquette est percée par 4 électrodes en acier inox espacées de 1 cm .



Figure 4-17 Vue des 3 dispositifs Wenner respectivement à 2 cm, 6 cm et 10 cm de profondeur dans le récipient cubique dans lequel le béton a été coulé par la suite.

Après coulage, le cube de béton instrumenté est placé en cure sur des cales dans un contenant fermé et avec une hauteur de 5 cm d'eau. Après 28 jours, le cube en béton, sorti de sa cure, est étanchéifié par du papier aluminium sur les faces latérales et sur la face inférieure, ainsi seule la face supérieure est en contact avec l'air pour assurer un séchage unidirectionnel. On se rapproche ainsi des conditions de séchage des éléments *in situ*. Le cube est placé dans une salle maintenue à une température $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nous rappelons que le principe de mesure repose sur la configuration Wenner pour laquelle le courant d'intensité I est injecté par les deux électrodes métalliques externes et la différence de

potentiel (ΔV) est mesurée entre les deux électrodes internes. Nous obtenons alors 3 mesures de résistances de transfert à différentes profondeurs du cube instrumenté : 2 cm, 6 cm et 10 cm. La modélisation numérique du cube contenant les dispositifs Wenner nous permet de calculer les coefficients géométriques correspondant à chaque dispositif à une profondeur donnée.

La variation du profil de résistivité apparente en fonction du temps, avec t_0 marquant le début du séchage, est illustrée dans la Figure 4-18. On remarque une augmentation des valeurs de résistivité apparente au cours du temps révélant l'évolution du séchage du béton. L'eau s'évapore par la face au contact de l'air en créant un gradient de teneur en eau entre les deux faces opposées du cube. La résistivité apparente à 2 cm de profondeur augmente plus rapidement au cours du temps que celles à 6 cm et 10 cm de profondeur, le béton étant plus sec en surface lors d'un séchage unidirectionnel (1D). De plus, le volume d'investigation de ces dispositifs étant allongé dans l'axe du quadripôle mais beaucoup moins dans la direction z de séchage (les dimensions de ce volume sont environ 3 cm dans l'axe du quadripôle et 0.5 cm dans la direction z), nous estimons que ces résistivités apparentes offrent une bonne estimation des valeurs de résistivité vraie aux 3 profondeurs considérées, et donc qu'elles offrent une bonne observable pour suivre la teneur en eau (ou le degré de saturation) à ces 3 profondeurs.

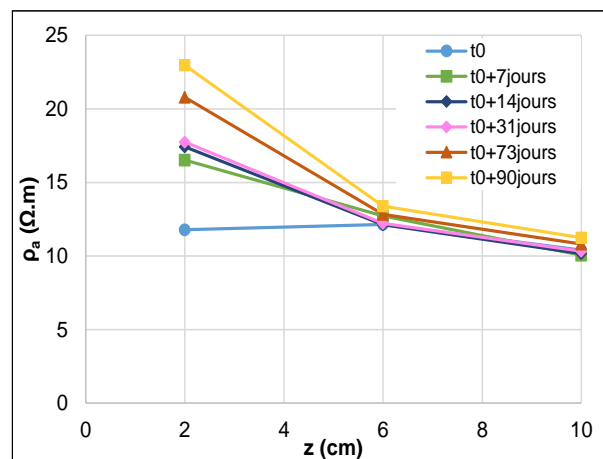


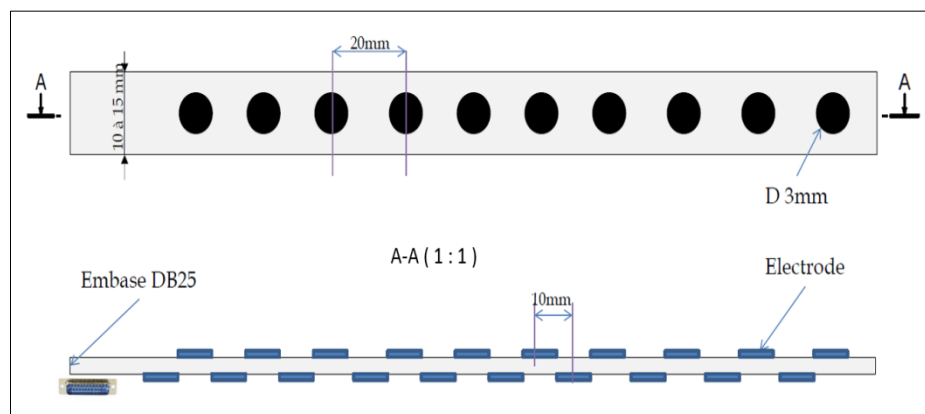
Figure 4-18 Profils de résistivité apparente mesurée en fonction du temps avec les dispositifs Wenner noyés à 2 cm, 6 cm et 10 cm dans le béton.

Les résultats du dispositif Wenner sont donc prometteurs. Cependant, parmi les désavantages de ce système, on peut citer l'encombrement occasionné par les fils risquant de générer un éventuel obstacle au passage des granulats lors de la mise en œuvre, au moment du coulage.

Pour plus de détails sur les résultats avec le dispositif Wenner, voir annexe A (Badr et al., 2018).

4.2.2 Dispositif Barrette

Afin d'éviter l'encombrement de la sortie des fils et de minimiser le caractère invasif du dispositif, une barrette en circuit imprimé (Figure 4-19 (a)) de dimensions 28x1,5x0.15 cm³ est placée dans une éprouvette 11x22 cm (Figure 4-20 (a)). Le choix du matériau de ce capteur est expliqué en détail dans la section 4.3.1. La barrette est constituée de 20 électrodes de diamètre 3 mm placées en quinconce sur les deux faces du circuit et reliées par un isolant pour la tenue mécanique au coulage. L'espacement entre les électrodes est de 2 cm sur chaque face (1 cm en prenant en compte les deux faces) (Figure 4-19 (b)). Une prise (connecteur standard DB25) permet de relier les électrodes à l'appareil de mesure. Deux grilles métalliques en acier inox de 10 cm de diamètre et 0,2 cm d'épaisseur (Figure 4-20 (b)), pour l'injection du courant, sont placées sur les surfaces externes du béton, noyées dans le béton à 5 mm de profondeur. Les grilles avec des trous de 12 mm sont conçues pour faciliter le coulage du béton frais (le diamètre maximum des granulats est $D = 12$ mm) et pour permettre les échanges d'eau pendant les processus de séchage. Les conditions de cure et de séchage sont identiques à celles de l'éprouvette cubique de béton contenant les dispositifs Wenner (paragraphe 4.2.1).



(a)



(b)

Figure 4-19 Dispositif Barrette : (a) plans avec ses dimensions (mm), (b) Photo.

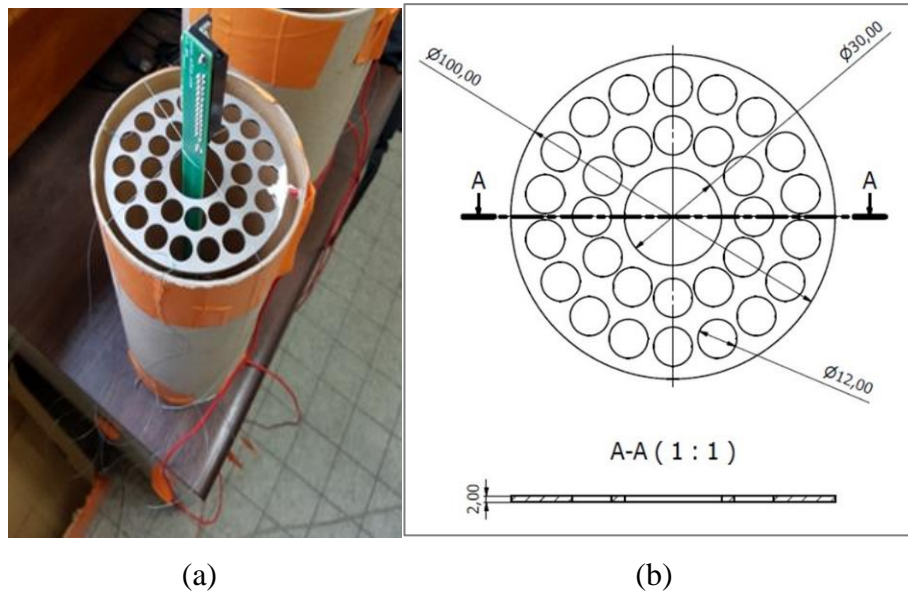


Figure 4-20 Dispositif Barrette et grille d'injection de courant : (a) Vue du dispositif Barrette dans une éprouvette 11x22 cm, (b) Plan de la grille métallique en acier inox avec ses dimensions (mm).

Ce système est basé sur la configuration Transmission (paragraphe 4.1.3). Dans cette configuration, le courant d'intensité I est injecté par les deux grilles métalliques. Les différences de potentiel (ΔV) sont ensuite mesurées entre les paires d'électrodes consécutives (espacées de 2 cm) sur chaque face du capteur Barrette. La mesure est influencée par un certain volume d'investigation. Ce volume est relativement concentré autour des deux électrodes de mesure de potentiel (cf. figure de sensibilité Figure 4-24 (b) expliquée dans le paragraphe 4.3.3.1). C'est pourquoi nous décidons de représenter chaque mesure de résistivité apparente à une profondeur z correspondant au milieu de la paire d'électrodes de potentiel correspondante. Nous obtenons donc neuf mesures de résistivité apparente en fonction de la profondeur.

Avec ce dispositif, une autre configuration, de type Wenner (alignement des électrodes perpendiculairement à la surface exposée au séchage) peut aussi être interrogée, sans utiliser les grilles d'injection. Dans cette configuration, quatre électrodes consécutives sur le même côté de la barrette sont interrogées. La profondeur de mesure de la résistivité est estimée être au milieu des électrodes de mesure de potentiel. Nous obtenons donc sept mesures de résistivité apparente en fonction de la profondeur.

Des essais en solution sont réalisés avec le dispositif Barrette (Annexe B). En revanche, dans le béton, les mesures donnent une évolution du profil de résistivité dans le temps non conforme aux attentes. En particulier, on observe une instabilité de la mesure en fonction de

l'intensité du courant injecté (0.5 mA, 1 mA ou 2 mA) surtout pour la configuration Transmission. Nous nous sommes rendu compte que le contact électrode/béton ne serait pas de bonne qualité car la géométrie du capteur ne permet pas d'assurer une adhérence suffisante avec le béton. Cela nous conduit à abandonner ce type de capteur, au profit de nouvelles géométries permettant de favoriser l'adhérence.

4.2.3 Conclusion partielle : limitations et choix des dispositifs

Des expériences préliminaires dans le béton sont réalisées avec les dispositifs Wenner et Barrette. Nous sommes confrontés au problème des câbles invasifs dans le béton avec le dispositif Wenner réalisé sous forme de plaquettes en backélite. Ce problème est résolu par la conception d'un dispositif en circuit imprimé (CI), pour le dispositif Barrette, offrant en sus une bonne précision géométrique des formes et des positions des électrodes (paragraphe 4.3.1). Cependant, pour éviter de nouveau une perte de contact électrique, au niveau des électrodes, due au retrait du béton, de nouveaux circuits imprimés sont conçus avec une forme spécifique « Echelle » (paragraphe 4.3.2.1) ou avec des trous dans lesquels on fixe ensuite des vis (paragraphe 4.3.2.2) pour favoriser l'adhérence dans le béton (Annexe C).

4.3 Réalisation et validation des dispositifs Echelle et Anneau

Suite aux études précédentes, nous proposons deux dispositifs en circuit imprimé : le dispositif Echelle et le dispositif Anneau. Cette section décrit la géométrie de chaque dispositif et présente le choix du matériau et les configurations de mesure. Afin de valider les dispositifs, une modélisation numérique est réalisée pour tester la réponse de chacun dans un milieu avec un profil de résistivité vraie (imposée) choisi pour être représentatif de situations réelles dans une structure en béton. En outre, une double campagne expérimentale est menée : i) des essais dans des solutions de conductivité connue et ii) des essais sur des éprouvettes en béton pour vérifier la sensibilité des mesures de résistivité.

4.3.1 Choix du matériau

Un circuit imprimé (CI) offre différents avantages, parmi lesquelles on peut citer : un coût de fabrication faible, de la précision dans la fabrication qui est un paramètre important pour limiter toute erreur due à une incertitude sur les positions des électrodes et la géométrie affectant la mesure (Oldenborger et al., 2005) et enfin son faible encombrement. En effet,

l'interconnexion entre les composants se fait par des pistes en cuivre au lieu d'utiliser un grand nombre de câbles invasifs, ce qui permet d'adapter facilement un connecteur (de type DB25) pour faire la liaison avec les appareils de mesure. Pour toutes ces raisons, l'utilisation de la technologie CI comme support pour une sonde de résistivité semble prometteuse.

4.3.1.1 Matériaux constitutifs des électrodes

Concernant le matériau utilisé pour les électrodes, la littérature propose différents matériaux testés pour des applications géophysiques (LaBrecque and Daily, 2008), bétons (Abbas et al., 2014; Liang et al., 2018) ou métalliques (Petrič et al., 2013). Le coût du capteur est également un paramètre important, ainsi les alliages platine sont onéreux et n'améliorent pas de manière significative la stabilité du signal par rapport à l'acier inoxydable (Kuras et al., 2015).

Le Tableau 4-2 suivant indique la résistivité électrique et le coefficient de dilatation linéique de matériaux (métaux et béton) à 300 °K. Le matériau à sélectionner pour les électrodes noyées dans le béton doit présenter un coefficient de dilatation thermique proche de celui du béton (12 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$), et être chimiquement peu réactif en présence de la solution interstitielle. Ainsi, les métaux Fer et Platine présentant un coefficient de dilatation thermique adapté au béton mais sensibles à la corrosion sont exclus.

Tableau 4-2 Valeurs des résistivités et des coefficients de dilatation pour différents métaux (extrait de : « Resistivity and temperature coefficient at 20 °C », <http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/Tables/rstiv.html>)

Nom du métal	Résistivité à 300 °K [$\Omega\cdot\text{m}$]	Coefficient de dialattion linéique [$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$]
Argent	16×10^{-9}	19
Cuivre	17×10^{-9}	17
Or	22×10^{-9}	14.2
Aluminium	28×10^{-9}	23
Bronze	55×10^{-9}	17.5
Zinc	61×10^{-9}	35
Laiton	71×10^{-9}	185
Nickel	87×10^{-9}	13
Fer	100×10^{-9}	12
Platine	111×10^{-9}	9
Étain	120×10^{-9}	23
Plomb	208×10^{-9}	29
Nichrome	$1\ 000 \times 10^{-9}$	14

Ainsi, compte tenu des différents éléments d'information et retours d'expérience, nous avons fait le choix d'électrodes en cuivre plaqué avec une couche de nickel-or, alliage qui a une faible résistivité électrique (LaBrecque and Daily, 2008) et qui protège contre le phénomène de corrosion (Song et al., 2012). En alliage avec l'or, le nickel participe à la stabilité physique de la couche de dépôt et augmente sa dureté et sa résistance mécanique.

Les électrodes du dispositif Anneau seront également équipées de petites vis en acier inox traversantes pour améliorer la surface et la tenue des contacts (Figure 4-22 (b)).

4.3.1.2 Matériau constitutif du support

En ce qui concerne le matériau de support, le circuit imprimé est basé sur le matériau Flame Retardant-4 (FR-4), qui est un stratifié époxy renforcé par du verre (Chang and Hung, 2012). Toutes les propriétés physiques (dilatation thermique, résistivité), chimiques et mécaniques [<https://en.wikipedia.org/wiki/FR-4>] en font un choix pertinent proposé par Chang and Hung (2012). Le revêtement conforme fournit une couche diélectrique sur le support qui assure une bonne durabilité du support et des pistes. Enfin, pour éviter l'hydrolyse des électrodes en cuivre plaqué avec une couche de nickel-or dans le béton, il a été décidé de recouvrir la partie apparente des électrodes de vernis épargne protecteur.

4.3.2 Géométrie

4.3.2.1 Dispositif Echelle

Nous proposons une évolution du dispositif Barrette par un dispositif en forme d'« échelle » offrant la double garantie suivante :

- une meilleure adhérence au béton (améliorant ainsi le contact des électrodes avec le béton),
- une mesure non impactée par un chemin préférentiel de l'évaporation d'eau le long de l'axe.

Une des préoccupations était d'empêcher le dispositif de créer un chemin préférentiel d'infiltration d'eau depuis la surface à partir de la connexion externe DB25 (sortie des pistes en cuivre). Il a donc été décidé de ne pas aligner le connecteur avec l'axe de l'échelle mais plutôt de le déplacer perpendiculairement sur le côté (Figure 4-21).

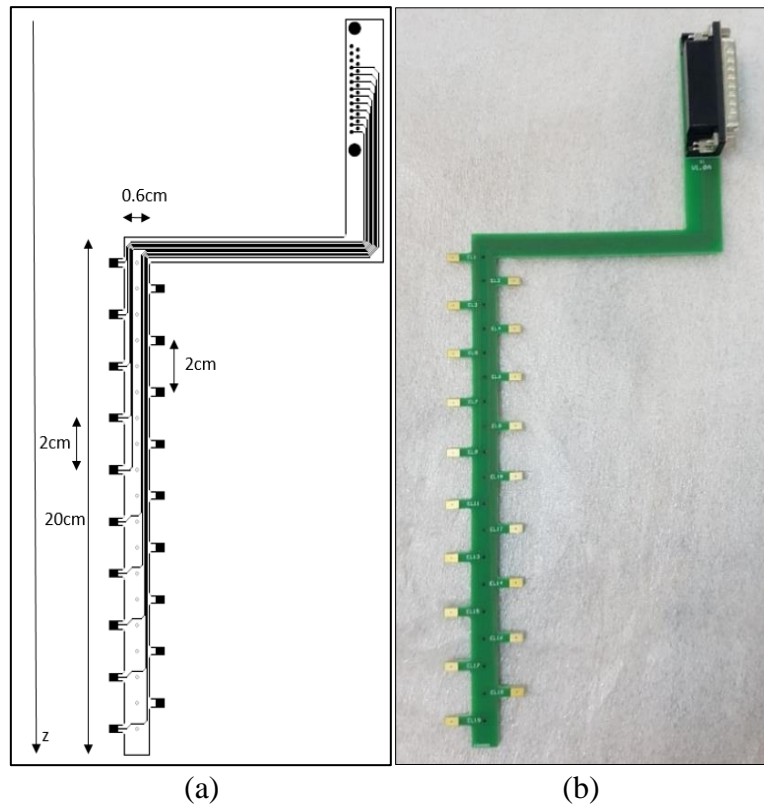


Figure 4-21 Dispositif Echelle : (a) plan du dispositif, (b) photo du dispositif.

Cette forme permet d'obtenir des informations sur le profil de résistivité le long de l'axe z, c'est-à-dire la direction du profil à établir. Le dispositif Echelle se compose de 19 électrodes, de dimensions $5,5 \times 3,5 \text{ mm}^2$ chacune, décalées de chaque côté du circuit perpendiculairement à la direction z. Le nombre d'électrodes et leur espacement peut évoluer en fonction de l'épaisseur de la structure à étudier et de la résolution recherchée. L'espacement entre les électrodes est de 2 cm de chaque côté. Les lignes d'électrodes gauche et droite de la Figure 4-21 sont décalées de 1 cm dans la direction z pour qu'il y ait une électrode tous les centimètres dans cette direction, afin d'augmenter la résolution en profondeur. Le circuit imprimé est placé entre deux grilles en acier inoxydable pour l'injection du courant lorsque la sonde est utilisée en mode transmission (Figure 4-20 (b)).

4.3.2.2 Dispositif Anneau

Une autre forme de capteur est étudiée (Figure 4-22), c'est la forme Anneau. Le dispositif Anneau est constitué de 8 électrodes espacées d'un angle $\alpha = 45^\circ$ et réparties sur un anneau de 8 cm de diamètre extérieur et 6 cm de diamètre intérieur. L'adhérence avec le béton est assurée en ajoutant des vis aux électrodes (Figure 4-22 (b)).

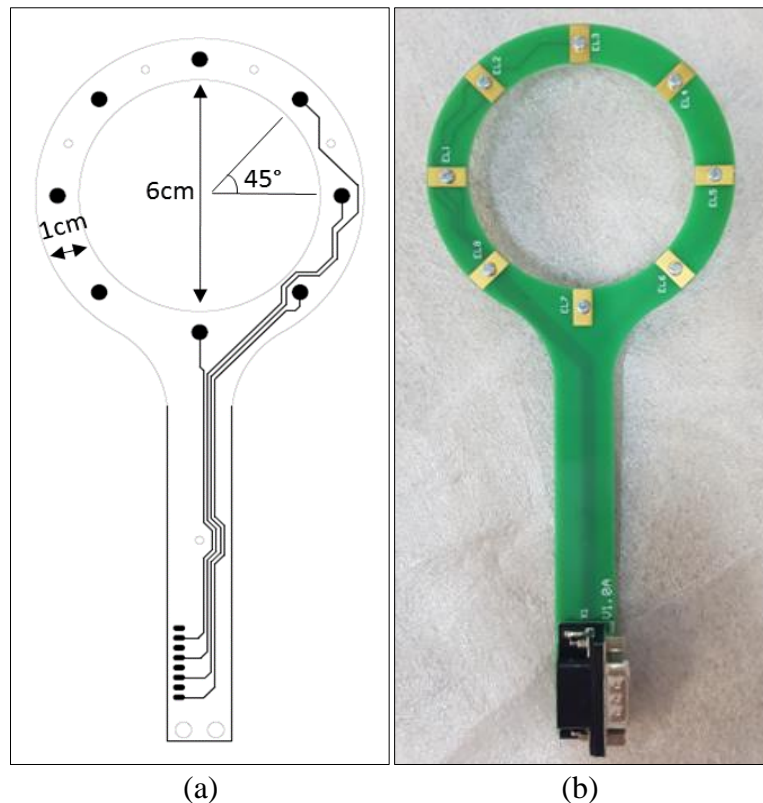


Figure 4-22 Dispositif Anneau : (a) plan du dispositif, (b) photo du dispositif.

4.3.3 Configurations de mesure

4.3.3.1 Dispositif Echelle

Le dispositif Echelle présente deux configurations de mesure. La première est la configuration Transmission (Figure 4-23 (a)), pour laquelle le courant d'intensité I est injecté par les deux grilles métalliques et la différence de potentiel (ΔV) est mesurée entre deux électrodes voisines situées du même côté du circuit imprimé (par exemple, P1 et P2 sur la Figure 4-23 (a) puis P2 et P3, etc.). On obtient ainsi neuf mesures de résistivité apparente le long de la profondeur sur le côté gauche et huit mesures sur le côté droit. La deuxième configuration est Wenner (Figure 4-23 (b)), pour laquelle les injections de courant et mesures de différences de potentiel sont effectuées sur les électrodes de l'Echelle sans utiliser les grilles : l'injection de courant est effectuée sur les électrodes externes (C1 et C2) et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes internes (P1 et P2). Ainsi, nous obtenons sept mesures de résistivité apparente du côté gauche et six mesures du côté droit.

Pour les deux configurations, chaque valeur de résistance mesurée (sensible à un certain volume autour des électrodes) est affectée à une position moyenne au milieu des électrodes où le potentiel est mesuré, comme recommandé par McCarter *et al.* (2015).

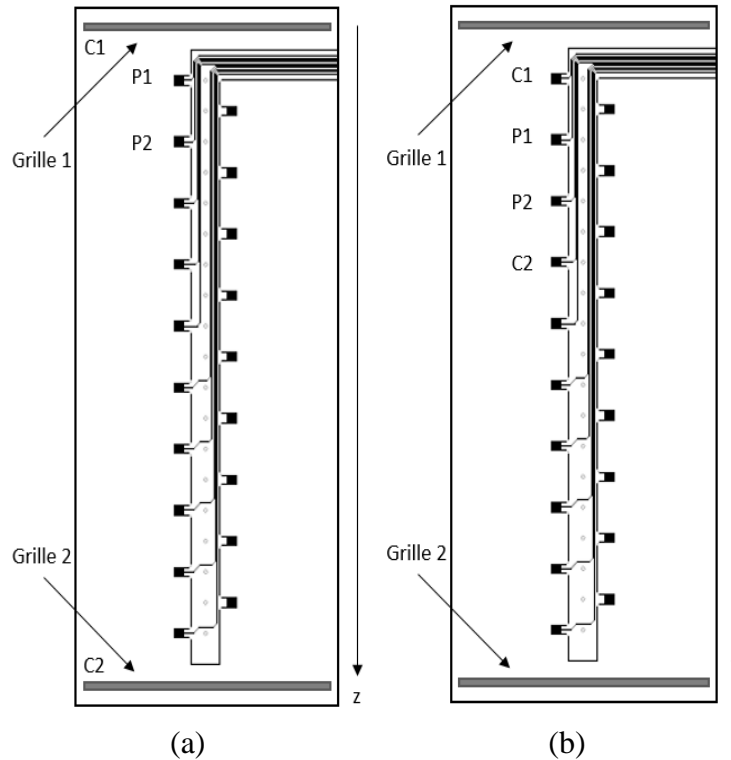
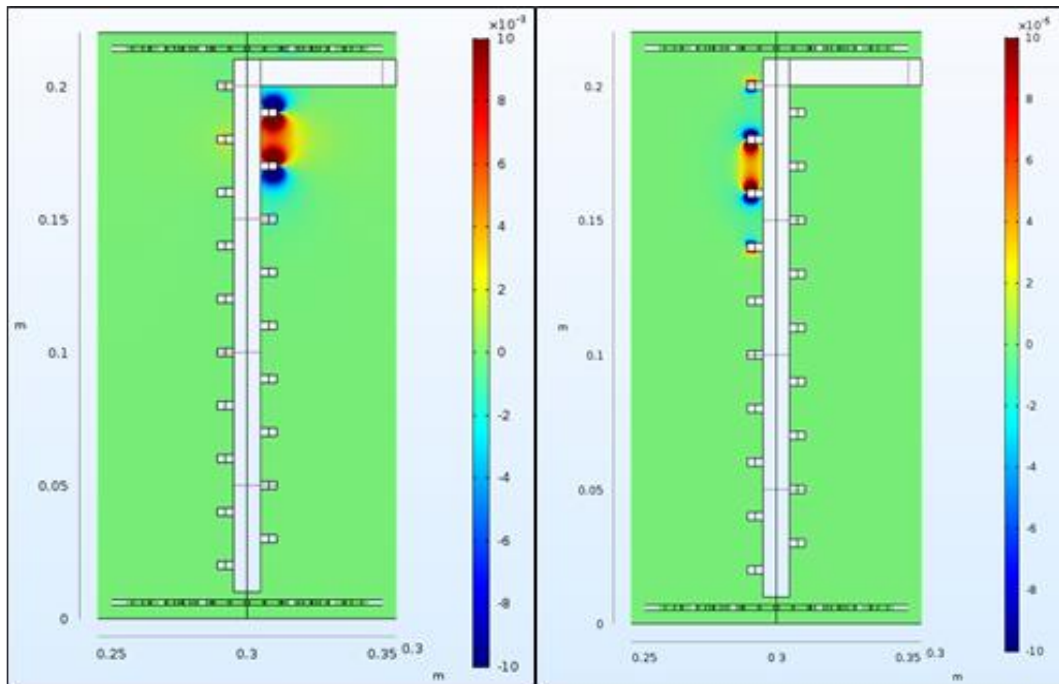


Figure 4-23 Schéma des configurations de mesure avec le dispositif Echelle : (a) configuration Transmission, (b) configuration Wenner.

L'hypothèse de considérer la profondeur affectée au milieu des électrodes de mesure du potentiel peut être partiellement validée par la modélisation numérique (paragraphe 4.3.4) et par un calcul de sensibilité (Loke, 1999) qui donne la sensibilité d'un quadripôle à une faible variation de résistivité de son environnement. Ce calcul est effectué pour les deux configurations de mesure d'électrode, Wenner et Transmission (Badr et al., 2019a). L'approche de la « méthode d'état adjoint » (Park and Van, 1991) est utilisée pour calculer les sensibilités ici dans un milieu homogène pour les configurations Transmission et Wenner (Figure 4-24). Ce type de méthode, crucial lors du processus d'inversion, est souvent utilisé pour mieux comprendre et optimiser une mesure quadripolaire.



(a)

(b)

Figure 4-24 Calcul de sensibilité dans un milieu homogène: (a) configuration Transmission, (b) configuration Wenner.

Nous remarquons dans la Figure 4-24 que toutes les mesures quadripolaires ont des zones de sensibilité négative (bleue) et positive (rouge). En ce qui concerne la configuration Transmission (Figure 4-24 (a)), les résultats montrent que la mesure n'est pas sensible aux électrodes d'injection de courant C1 et C2. Pour les deux configurations, la mesure est principalement sensible aux électrodes de mesure de potentiel, ce qui permet de justifier l'hypothèse de considérer la profondeur de chaque quadripôle de mesure au milieu des électrodes de mesure du potentiel.

4.3.3.2 Dispositif Anneau

Le dispositif Anneau permet plusieurs configurations de mesure :

Les configurations choisies (Wec_a2, Q_I12, Q_I16, Q_carre) sont présentées dans la Figure 4-25. Pour chaque configuration, nous obtenons huit valeurs de résistivité (en faisant le tour complet de l'Anneau) qui seront moyennées. La résistivité apparente mesurée est supposée correspondre à la résistivité moyenne à la profondeur du dispositif. Notre but étant d'obtenir le profil de résistivité en fonction de la profondeur, nous considérons, à chaque niveau de profondeur, la moyenne des résistivités apparentes issues de toutes les configurations, afin de

tenir compte de l'incertitude due aux hétérogénéités du béton dans le plan perpendiculaire à la direction z.

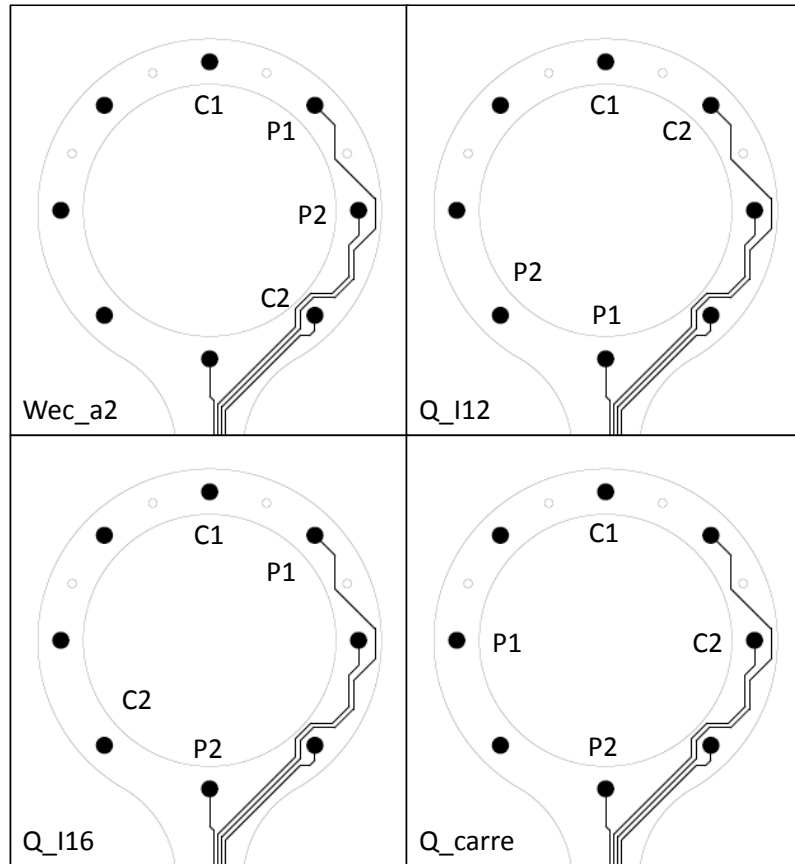


Figure 4-25 Schémas des différentes configurations d'interrogation d'électrodes pour le dispositif Anneau.

4.3.4 Reconstruction numérique du profil de résistivité

Cette étude numérique a pour objectif de démontrer la capacité du dispositif à remonter au profil de résistivité « vraie » sur toute la profondeur sans procédure d'inversion. La procédure de simulation numérique est identique à celle présentée au paragraphe 4.1.1 ; pour chaque configuration d'électrodes, les facteurs géométriques sont calculés dans un milieu homogène puis les résistivités apparentes sont calculées dans un milieu auquel on impose un profil de résistivité vraie suivant une fonction de Weibull ($k = 3$; $\lambda = 1/13$ m ; $\rho_{max} = 400$ $\Omega.m$; $\rho_{min} = 50$ $\Omega.m$) (paragraphe 4.1.2).

Dans cette partie, nous modélisons les dispositifs dans des éprouvettes cylindriques. La forme et les dimensions des électrodes et des grilles sont modélisées avec une précision élevée afin

que la géométrie du modèle soit identique à celle décrite sur les Figures 4-20 (b), 4-21 et 4-22.

Nous avons modélisé un échantillon de béton cylindrique ayant un diamètre de 11 cm et une longueur de 22 cm. Deux grilles métalliques (Figure 4-20 (b)) sont noyées à 5 mm des bords de la surface de l'échantillon. Le dispositif Echelle est modélisé et placé au centre du cylindre, perpendiculairement aux faces opposées du cylindre et donc parallèle à la direction du profil de résistivité à générer (Figure 4-26 (a)). Nous observons dans la Figure 4-26 (a) que la configuration Transmission génère des lignes de courant presque parallèles entre les grilles (Badr et al., 2019b).

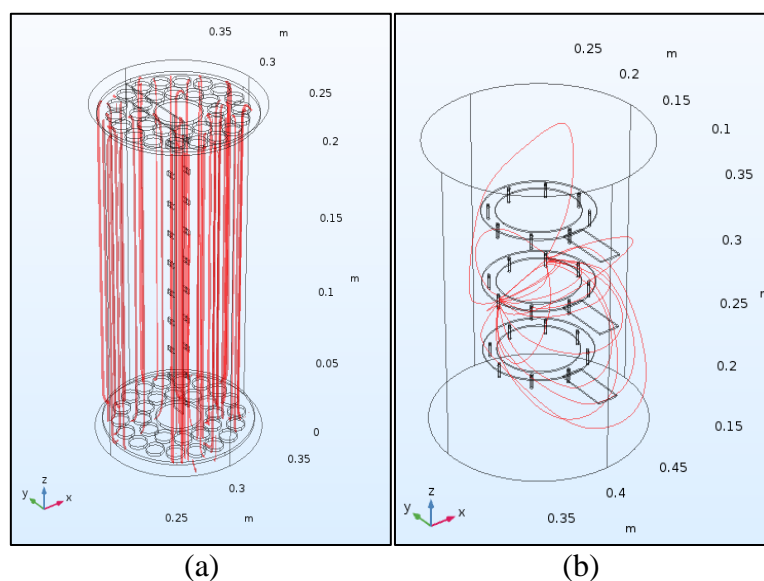


Figure 4-26 Modélisation numérique de la réponse des dispositifs à un profil de résistivité vraie avec une vue 3D des lignes de courant : (a) dispositif Echelle, (b) dispositif Anneau.

Nous avons modélisé un échantillon de béton cylindrique ayant un diamètre de 16 cm (pour faciliter la mise en place des dispositifs Anneau dans l'éprouvette) et une longueur de 22 cm. Comme nous serons limités par le nombre des dispositifs dans la direction du profil de résistivité, compte tenu de la dimension des granulats ($D_{\max} = 12$ mm), trois dispositifs Anneau sont modélisés au centre du cylindre à des profondeurs différentes $z = 5,5$ cm, 11 cm et 16,5 cm, parallèlement aux faces opposées du cylindre et donc perpendiculairement à la direction du profil de résistivité à générer (Figure 4-26 (b)). Nous obtenons donc 3 mesures de résistivité apparente dans la profondeur du béton.

Afin de comparer la capacité des dispositifs Echelle et Anneau à nous permettre de remonter au profil de résistivité vraie dans le modèle, nous avons tracé le profil de résistivité apparente simulée sur la Figure 4-27 en fonction de la profondeur pour chaque dispositif. L'écart relatif

entre la distribution de résistivité vraie imposée et les résistivités apparentes simulées est faible pour le dispositif Echelle et plus élevée pour le dispositif Anneau.

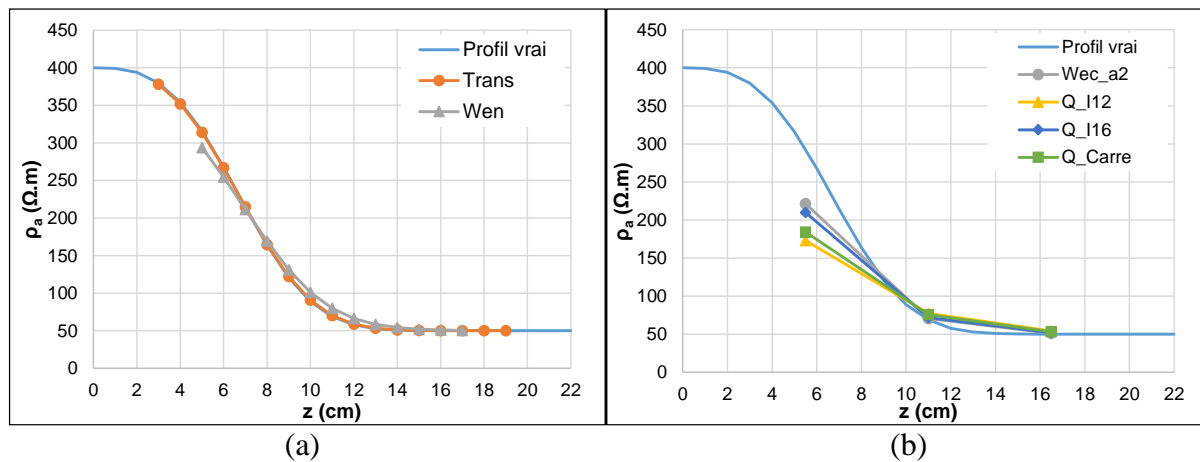


Figure 4-27 Profils de résistivité apparente simulés et comparés au profil de résistivité vraie: (a) en utilisant les configurations Transmission et Wenner du dispositif Echelle, (b) en utilisant les configurations (Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre) du dispositif Anneau.

L'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) est calculée entre le profil vrai et les profils simulés pour le dispositif Echelle. Une NRMSE de 0,36% est obtenue pour la configuration Transmission et 3,98% pour la configuration Wenner. Un écart plus grand est observé pour la configuration Wenner, ce qui peut être expliqué par la différence de volume d'investigation de béton étudié entre les deux configurations du dispositif (Figure 4.24). Ce résultat prometteur prouve la capacité du dispositif Echelle à estimer le profil de résistivité électrique avec une bonne résolution pour les deux configurations, uniquement à partir des mesures de résistivité apparente. De ce fait, nous proposerons en première approche de nous affranchir du processus d'inversion théoriquement nécessaire pour passer de la résistivité apparente à la résistivité réelle.

Concernant le dispositif Anneau, nous remarquons que l'écart relatif entre la résistivité vraie et la résistivité apparente simulée augmente là où le gradient de résistivité (imposé) dans le modèle est le plus fort. En effet, le dispositif Anneau permet d'obtenir une résistivité apparente moyenne sur une certaine profondeur. Quand l'écart de résistivité devient plus faible ($z > 12$ cm), la résistivité apparente calculée devient proche de la « vraie » valeur. Ainsi, en moyenne, l'écart relatif est faible aux profondeurs 11 cm et 16,5 cm (7,22% et 5,31% respectivement), et relativement élevé à 5,5 cm de profondeur (32,67%) où le gradient de résistivité est plus grand. Par conséquent, une procédure d'inversion numérique sera sans doute nécessaire pour obtenir plus précisément le profil de résistivité vraie, en particulier dans ces zones de fort gradient.

De plus, nous avons observé que cet écart relatif diminue quand l'espace entre les électrodes diminue. C'est pourquoi nous avons modélisé les trois dispositifs Anneau avec 16 électrodes espacées d'un angle $\alpha = 22,5^\circ$. Nous avons tracé le profil de résistivité apparent dans la Figure 4-28 en fonction de la profondeur. Il est évident, d'après cette figure, que l'écart relatif entre la résistivité vraie et les résistivités apparentes simulées a diminué. On note des valeurs de 15,55%, 3,48% et 2,66% aux profondeurs 5,5 cm, 11 cm et 16,5 cm respectivement.

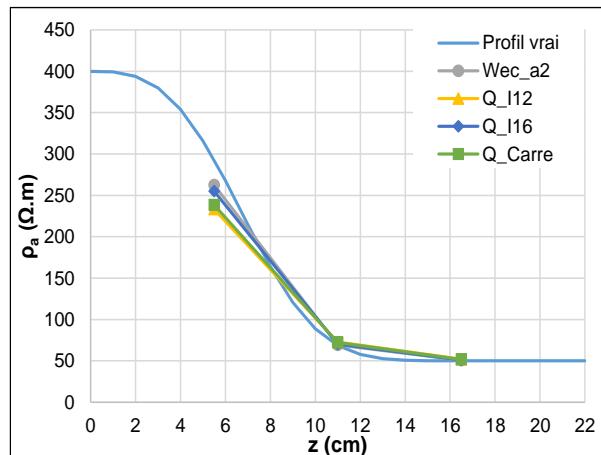


Figure 4-28 Profils de résistivité apparente simulés et comparés au profil de résistivité vraie en utilisant les configurations (Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre) du dispositif Anneau.

La résolution est donc améliorée quand l'espace inter-électrodes diminue. Ce résultat avait déjà été démontré dans la section 4.1.4.2 ; plus la distance inter-électrodes est faible, plus la résistivité apparente mesurée (ou simulée) se rapproche de la vraie résistivité du milieu. Cependant, nous sommes limités par le nombre total d'électrodes sur la profondeur (32 ou 64 électrodes selon les appareils utilisés dans ce travail) ; si le nombre d'électrode par Anneau augmente, le nombre total des Anneau diminue et la résolution diminue. Ainsi, un compromis a été trouvé entre le nombre de dispositifs Anneau en profondeur et le nombre d'électrodes par dispositif. Nous avons envisagé 4 dispositifs Anneau (dans 30 cm de profondeur) ayant 8 électrodes chacun. Nous respectons ainsi la résolution souhaitée (5 cm à cœur) et nous intégrons la variabilité latérale de la résistivité et donc de la teneur en eau. Des mesures inter-anneaux peuvent être réalisées pour augmenter la résolution à cœur si besoin (paragraphe 5.4.4).

4.3.5 Validation en solution

L'objectif de ce paragraphe est d'évaluer la répétabilité des mesures, par le biais d'essais laboratoire dans des solutions qui présentent l'avantage d'avoir une variation de conductivité

négligeable dans le volume et dans une plage de conductivités connues. De nouveaux facteurs géométriques sont calculés à l'aide d'une simulation numérique prenant en compte la géométrie des réservoirs et la position des électrodes dans le milieu. Les mesures sont faites avec le résistivimètre Syscal Pro de chez Iris Instruments (paragraphe 5.5).

4.3.5.1 Test des dispositifs en solution

Les dispositifs Echelle et Anneau sont placés au centre d'un réservoir cubique de 30 cm de côté contenant la solution (Figure 4-29). Le dispositif Echelle est placé entre deux grilles en acier inoxydable (Figure 4-20 (b)), distantes de 5 mm des bords du réservoir.

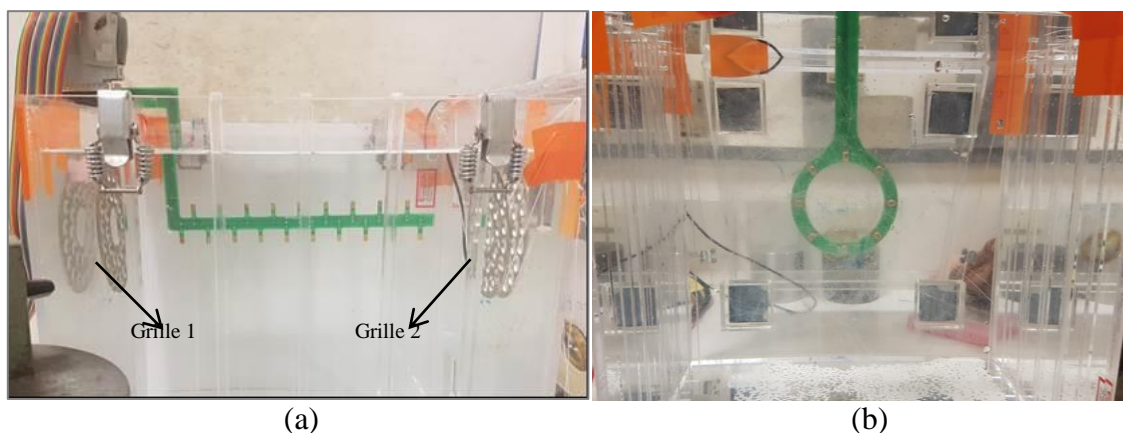


Figure 4-29 Photos des dispositifs testés dans une solution de NaCl : (a) dispositif Echelle, (b) dispositif Anneau.

La validation de chaque dispositif est réalisée en testant diverses solutions de NaCl de résistivité connue. A la solution d'eau déminéralisée, nous avons ajouté et dissout progressivement du chlorure de sodium NaCl afin d'obtenir les cinq solutions présentées dans le Tableau 4-3. La résistivité théorique correspondant à chaque solution est déterminée à l'aide d'abaques issues de Chapellier (1987). Les valeurs sont ensuite comparées à celles obtenues par une sonde de conductivité commerciale (WTW Multi 348i), étalonnée avant les mesures. De plus, des tests de reproductibilité de cette sonde de conductivité, réalisés avec une solution de contrôle de qualité interne selon la norme XPT 90-220, basée sur des tests inter laboratoires auxquels l'institut français IFSTTAR participe, permettent d'évaluer l'incertitude des mesures de celle-ci égale à 3%. L'étude expérimentale est réalisée à une température constante de $T = 20 \pm 1$ °C (Badr et al., 2019 c).

Tableau 4-3 Caractéristiques des cinq électrolytes utilisés

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Concentration NaCl [mg/L]	10	50	90	200	1000
ρ théorique [$\Omega.m$]	(aucune valeur sur l'abaque)	100	63	25	5.5

4.3.5.2 Répétabilité, reproductibilité et sensibilité des dispositifs

La répétabilité est évaluée en prenant trois fois la mesure pour chaque quadripôle. Le Tableau 4-4 présente les valeurs moyennes de la résistivité mesurée, pour toutes les solutions, avec les dispositifs Echelle et Anneau dans les diverses configurations. La solution 1, à faible concentration en NaCl, est exclue car elle présente un coefficient de variation de répétabilité (noté CV rép.) relativement élevé en comparaison des autres : 1,7% en configuration Wenner pour le dispositif Echelle alors que le CV de la répétabilité pour les solutions 2 à 5 varie de 0,2% à 0,6% pour le dispositif Echelle et de 0,1% à 0,4% pour le dispositif Anneau.

Tableau 4-4 Résistivité électrique mesurée avec la sonde de conductivité et avec les dispositifs Echelle et Anneau en configurations Transmission et Wenner pour les 5 solutions.

		Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
	ρ sonde de cond. [$\Omega.m$]	450 \pm 13	98 \pm 3	60 \pm 2	25 \pm 1	5,3 \pm 0,2
Dispositif Echelle	ρ Trans [$\Omega.m$]	484,6 \pm 1,4	105,9 \pm 0,2	61,8 \pm 0,2	26,7 \pm 0,1	5,8 \pm 0,03
	CV rép. %	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5
	CV var. %	2,9	1,2	1,0	1,2	1,5
	ρ Wen [$\Omega.m$]	448,3 \pm 7,4	103,4 \pm 0,4	60,6 \pm 0,2	26,3 \pm 0,1	5,7 \pm 0,03
	CV rép. %	1,7	0,4	0,3	0,4	0,6
	CV var. %	1,0	0,8	0,8	0,7	0,8
Dispositif Anneau	ρ Wec_a2 [$\Omega.m$]	-	99,9 \pm 0,3	58,6 \pm 0,2	25,6 \pm 0,1	5,4 \pm 0,01
	CV rép. %	-	0,3	0,3	0,3	0,1
	CV var. %	-	0,9	0,6	0,6	0,6
	ρ Q_I12 [$\Omega.m$]	-	104,6 \pm 0,3	61,0 \pm 0,1	26,6 \pm 0,1	5,6 \pm 0,01
	CV rép. %	-	0,3	0,2	0,2	0,1
	CV var. %	-	0,8	0,5	0,7	0,6
	ρ Q_I16 [$\Omega.m$]	-	101,1 \pm 0,4	59,1 \pm 0,1	25,8 \pm 0,1	5,5 \pm 0,01
	CV rép. %	-	0,4	0,1	0,2	0,1
	CV var. %	-	0,4	0,2	0,3	0,2
	ρ Q_Carre [$\Omega.m$]	-	104,6 \pm 0,3	60,5 \pm 0,1	26,4 \pm 0,1	5,6 \pm 0,01
	CV rép. %	-	0,3	0,2	0,2	0,1
	CV var. %	-	0,7	0,7	0,7	0,6

Le CV de la variabilité le long de l'axe du dispositif (noté CV var.) varie de 0,7% à 1,5% pour le dispositif Echelle et de 0,2% à 0,9% pour le dispositif Anneau. Tous les résultats sont détaillés dans le Tableau 4-4.

Nous présentons la variation des profils de résistivité en fonction de la profondeur pour le dispositif Echelle sur la Figure 4-30 (configurations Transmission et Wenner) puis la variation de résistivité en fonction de la position azimutale de l'électrode d'injection de courant C1 (en faisant un tour complet sur l'anneau) pour le dispositif Anneau sur la Figure 4-31 (configurations Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre). Ces mesures sont comparées d'une part à la valeur théorique donnée dans le Tableau 4-3 et d'autre part aux résultats de mesure de la sonde de conductivité (incertitude indiquée par la plage de couleurs) pour les solutions 2(a), 3(b), 4(c) et 5(d).

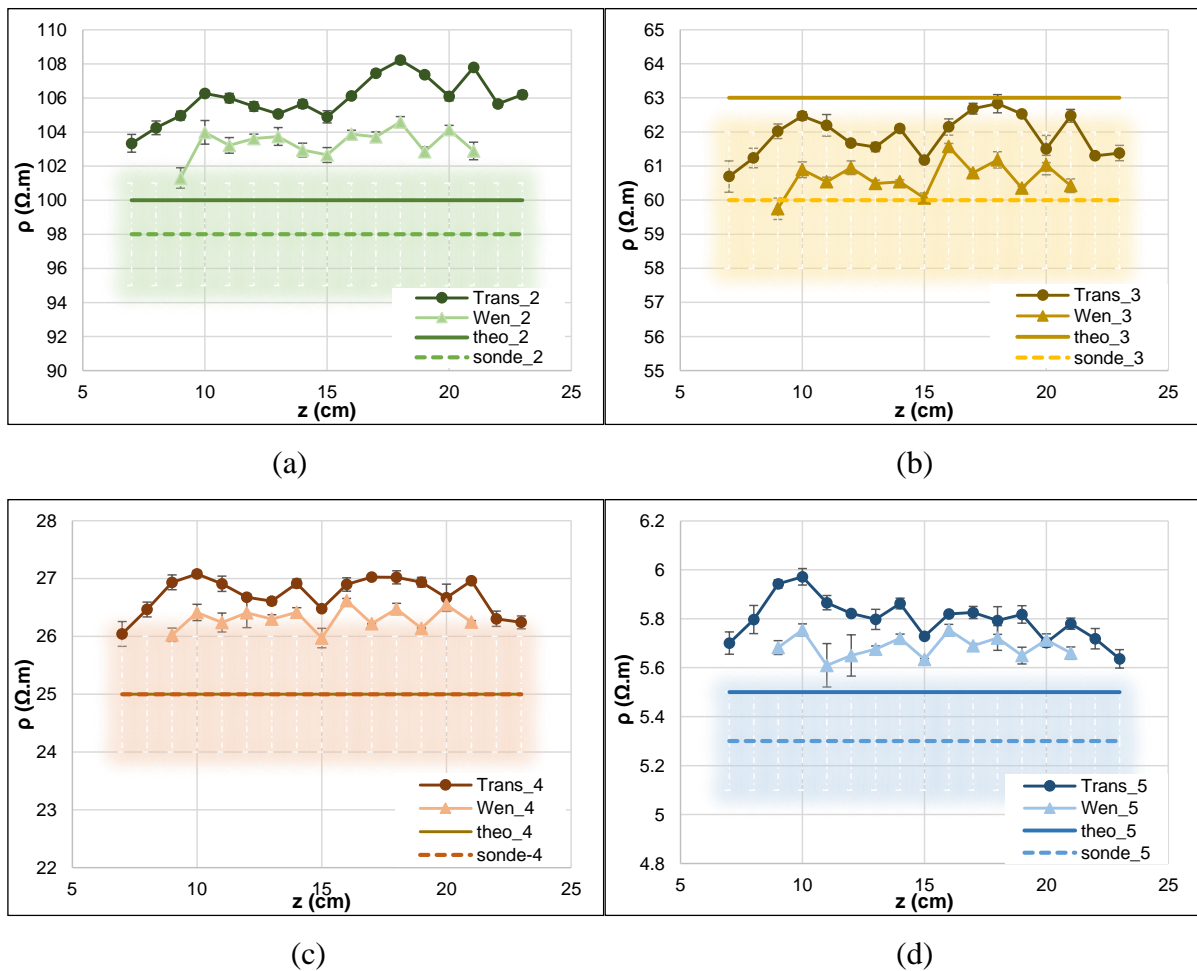
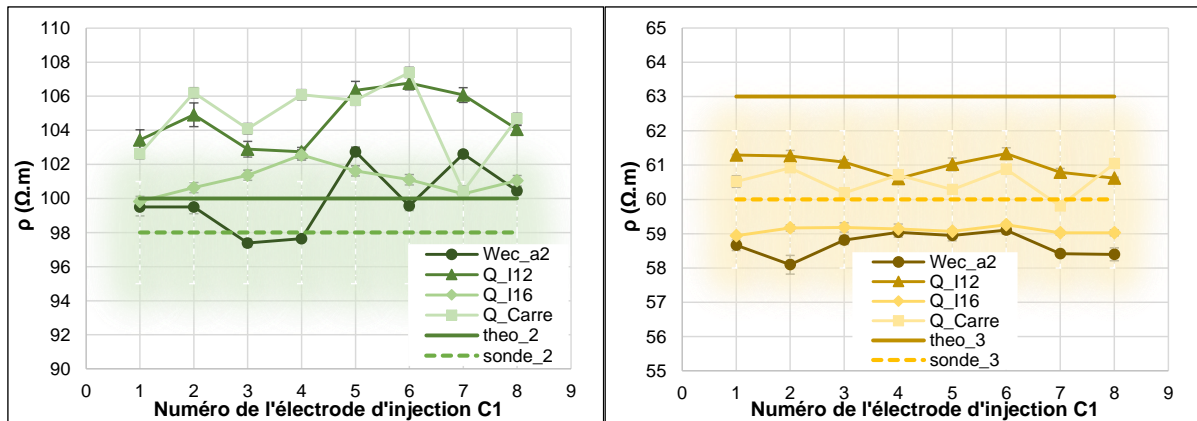
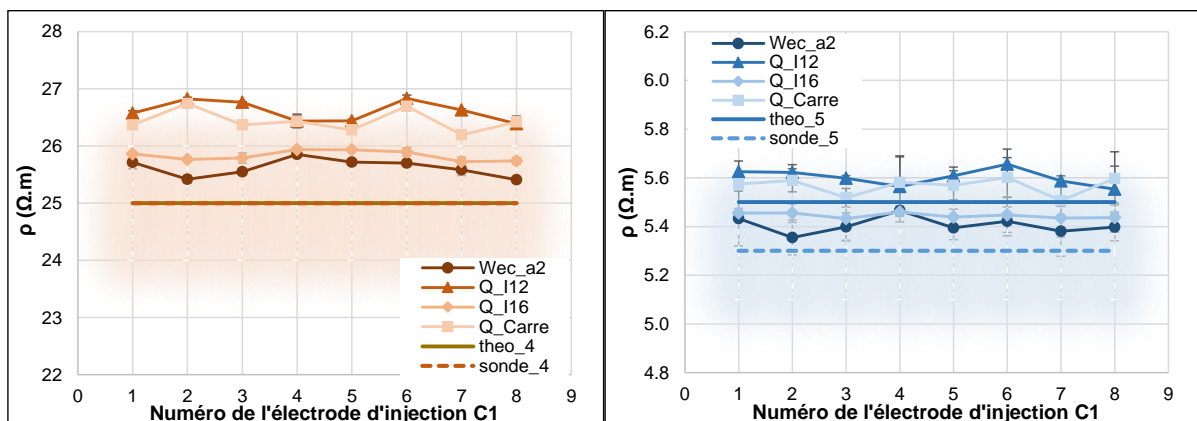


Figure 4-30 Profils de résistivité en fonction de la profondeur pour le dispositif Echelle (configurations Transmission et Wenner) et de la résistivité de la solution obtenue par la sonde de conductivité (l'incertitude de la sonde étant indiquée par une bande de couleur) : (a) solution 2, (b) solution 3, (c) solution 4, (d) solution 5.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure 4-31 Profils de résistivité en fonction de la position azimutale de l'électrode C1 d'injection de courant du dispositif Anneau (configurations Wec_a2, Q_I12, Q_I16, Q_Carre) et de la résistivité obtenue par la sonde de conductivité (l'incertitude de la sonde étant mise en couleur) : (a) solution 2, (b) solution 3, (c) solution 4, (d) solution 5.

En moyenne, un écart relatif de 2,6% est observé entre la résistivité attendue (d'après les abaques issues de Chapellier (1987)) et celle mesurée avec la sonde de conductivité. De plus, aucune dégradation significative des mesures dans le temps, associée à la modification de la composition de la solution par carbonatation de la surface d'échange, n'est observée.

Les résultats du Tableau 4-4 et des Figures 4-30 et 4-31 montrent que les valeurs de la résistivité mesurée avec les deux dispositifs en circuit imprimé sont en bon accord avec les mesures de la sonde de conductivité. En moyenne pour toutes les solutions, un écart relatif de 6,8% est calculé pour la configuration Transmission, 4,8% pour la configuration Wenner, 2,2% pour la configuration Wec_a2, 5,2% pour la configuration Q_I12, 2,7% pour la configuration Q_I16 et 4,6% pour la configuration Q_Carre.

Une bonne corrélation est trouvée entre les mesures de la sonde de conductivité et celles des dispositifs Echelle et Anneau, comme le montre la Figure 4-32. Des tendances similaires ont

été obtenues par Du Plooy *et al.* (2013) avec des mesures de résistivité surfaciques au moyen d'un peigne d'électrodes.

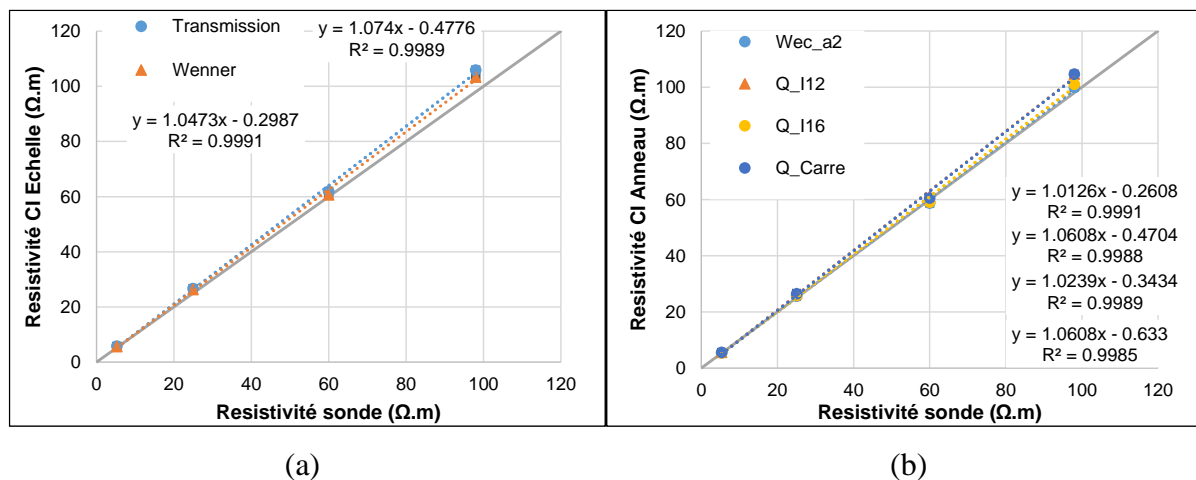


Figure 4-32 Corrélation entre la résistivité mesurée avec la sonde de conductivité commerciale et la résistivité mesurée : (a) dispositif Echelle, (b) dispositif Anneau.

Ce résultat encourageant montre la capacité des dispositifs Echelle et Anneau à mesurer la valeur de résistivité de la solution avec une bonne précision pour les diverses configurations.

4.3.6 Validation dans le béton

Ce paragraphe traite de la validation expérimentale des dispositifs dans un échantillon standard de béton, notre matériau cible. Nous vérifions tout d'abord la variabilité et la répétabilité des mesures, puis nous démontrons la capacité des dispositifs à estimer la résistivité du béton. La sensibilité des dispositifs au séchage du béton est étudiée en détail dans le chapitre 5. À la fin de l'expérience, un essai de fendage est effectué sur un échantillon afin de vérifier visuellement le contact entre les électrodes et le béton.

4.3.6.1 Test des dispositifs dans les éprouvettes cylindriques de béton

La même formulation de béton est utilisée dans cette étude : béton à base de ciment de type 1 (CEM I) avec un rapport eau sur ciment E/C de 0,59 et une porosité de $15,0\% \pm 0,9\%$ (paragraphe 5.3.1).

Cinq éprouvettes cylindriques (numérotées de E1 à E5) de 11 cm de diamètre et 22 cm de longueur permettent de quantifier la variabilité de la mesure obtenue avec le dispositif Echelle. Le circuit imprimé est placé au centre de chaque cylindre et les grilles (Figure 4-20

(b)) sont placées sur les surfaces externes du moule, noyées à une profondeur de 5 mm dans le béton comme dans le modèle numérique (paragraphe 4.3.4) (Figure 4-33 (a)).

Par ailleurs, deux éprouvettes cylindriques (numérotées An1 et An2) de 16 cm de diamètre (pour faciliter la mise en place des dispositifs dans l'éprouvette) et de 22 cm de longueur permettent de quantifier la variabilité de la mesure obtenue avec le dispositif Anneau. Pour chacune, trois dispositifs Anneau sont placés au centre du cylindre à des profondeurs différentes $z = 5,5$ cm, 11 cm et 16,5 cm, comme dans le modèle numérique (paragraphe 4.3.4) (Figure 4-33 (b)).

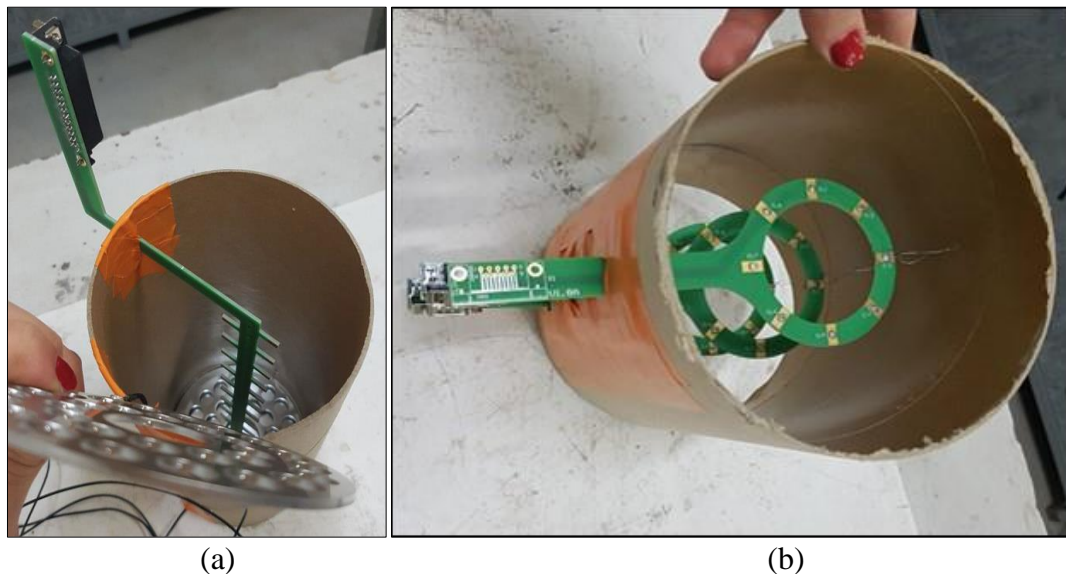


Figure 4-33 Photos des dispositifs dans les éprouvettes : (a) dispositif Echelle, (b) dispositifs Anneau.

Les tests sont effectués après 28 jours de cure. Deux échantillons de béton pour chaque dispositif sont ensuite soumis à un séchage à 20 ± 2 °C pendant 28 jours, suivi d'un séchage à 45 ± 2 °C pour accélérer l'établissement d'un profil de résistivité. Les cylindres sont étanchés avec une feuille d'aluminium sur les faces latérale et inférieure, seule la face supérieure était maintenue en contact avec l'air pour assurer un séchage unidirectionnel. Nous sommes donc proches des conditions de séchage *in situ*.

4.3.6.2 Répétabilité, reproductibilité et sensibilité des dispositifs

La répétabilité est évaluée à partir de trois valeurs de résistivité apparente espacées de 5 min dans des conditions saturées.

D'une part, pour le dispositif Echelle, le CV de répétabilité varie entre 0,07% et 1,86% pour la configuration Transmission et entre 0,06% et 0,75% pour la configuration Wenner. De plus, le CV de variabilité le long de l'axe du dispositif varie de 4,3% à 6,7% pour la configuration Transmission et de 2,5% à 5,7% pour la configuration Wenner.

D'autre part, pour le dispositif Anneau, en moyenne pour les différentes configurations, le CV de répétabilité varie entre 0,12% et 0,61% et le CV de variabilité le long de l'axe du dispositif varie de 0,6% à 3,1%. On remarque que les valeurs de CV de variabilité le long de l'axe du dispositif sont plus faibles pour le dispositif Anneau. Ce comportement peut être expliqué par le fait qu'il s'agit d'une mesure de résistivité apparente avec un volume d'investigation relativement concentré autour d'une profondeur z donnée.

Afin de comparer les configurations Transmission et Wenner du dispositif Echelle, nous avons tracé sur la Figure 4-34 (a) les profils de résistivité apparente du cylindre E1 dans des conditions saturées. Nous pouvons observer que les deux configurations suivent des tendances similaires (minima, maxima, changements de pente), ce qui montre qu'elles sont sensibles aux mêmes paramètres à chaque profondeur (état et variabilité du béton, qualité des contacts...) bien que différentes valeurs de résistivité apparente soient mesurées. Une NRMSE de 4,76% est calculée entre les deux configurations. Ceci peut remettre en question le choix initial d'estimation de la profondeur de mesure de la résistance au milieu des électrodes, où la différence de potentiel est mesurée, en particulier pour la configuration Wenner. Ce choix est sans doute plus justifié en milieu homogène qu'en milieu présentant un profil en z (cf. figure de sensibilité Figure 4-24 (b)). En outre, la valeur de la résistivité en milieu saturé est faible (10 à 14 $\Omega.m$) par rapport aux valeurs trouvées dans la littérature entre 50 et 200 $\Omega.m$ dans des conditions humides (Polder et al., 2000).

Par ailleurs, afin de comparer les différentes configurations (Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre) du dispositif Anneau, nous avons tracé sur la Figure 4-34 (b) les profils de résistivité apparente du cylindre A1 dans des conditions saturées. Nous pouvons observer que les quatre configurations suivent des tendances similaires, le volume d'investigation étant quasi similaire pour ces configurations. Un écart relatif de 0,52% est calculé en moyenne entre les quatre configurations. Les résultats de chaque configuration sont reportés en détail dans le Tableau 4-5.

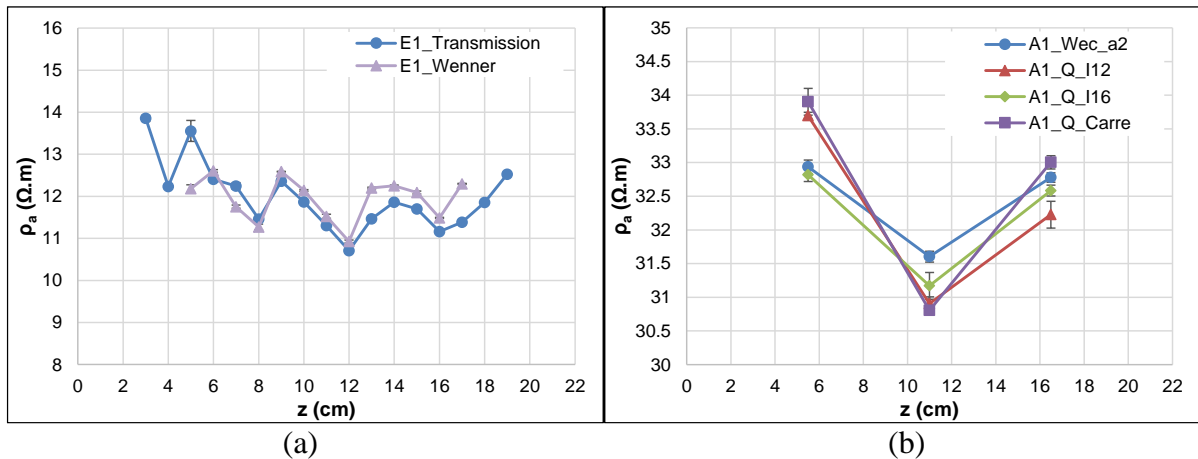


Figure 4-34 Profil de résistivité apparente en fonction de la profondeur dans des conditions saturées : (a) en utilisant les configurations Transmission et Wenner pour le cylindre E1 du dispositif Echelle, (b) en utilisant les configurations (Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre) pour le cylindre A1 du dispositif Anneau.

Tableau 4-5 Résistivité apparente mesurée avec le dispositif Anneau A1 en configurations Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_Carre aux différentes profondeurs à l'état saturé.

		z = 5,5 cm	z = 11 cm	z = 16,5 cm
Dispositif Anneau	ρ_a Wec_a2 [$\Omega.m$]	$32,9 \pm 0,1$	$31,6 \pm 0,08$	$32,7 \pm 0,07$
	CV rép. %	0,3	0,3	0,2
	CV var. %	0,8	1,1	1,5
	ρ_a Q_I12 [$\Omega.m$]	$33,7 \pm 0,05$	$30,9 \pm 0,1$	$32,2 \pm 0,2$
	CV rép. %	0,2	0,3	0,6
	CV var. %	2,4	0,6	1,6
	ρ_a Q_I16 [$\Omega.m$]	$32,8 \pm 0,1$	$31,2 \pm 0,2$	$32,6 \pm 0,08$
	CV rép. %	0,3	0,6	0,2
	CV var. %	1,2	0,7	3,1
	ρ_a Q_Carre [$\Omega.m$]	$33,9 \pm 0,2$	$30,8 \pm 0,02$	$33,0 \pm 0,1$
	CV rép. %	0,6	0,1	0,3
	CV var. %	2,4	2,1	0,9

La reproductibilité est évaluée en testant la variabilité de la réponse de chaque dispositif dans tous les échantillons de béton soumis aux mêmes conditions de laboratoire. La reproductibilité est ici associée au changement de dispositif et à la variabilité du matériau béton. La Figure 4-35 montre la variation du profil de résistivité apparente sur la profondeur pour tous les échantillons dans des conditions saturées en utilisant la configuration Transmission pour le dispositif Echelle (Figure 4-35 (a)) et la configuration Wec_a2 pour le dispositif Anneau (Figure 4-35 (b)). Pour le dispositif Echelle, la variation relative de la résistivité apparente est en moyenne de 4,6% entre les cylindres E1, E3, E4 et E5 et de 11,1 % entre tous les cylindres, y compris le cylindre E2, qui présente des valeurs de résistivité plus élevées. Nous estimons que le béton de l'éprouvette E2 est plus poreux que le béton des autres éprouvettes. Pour le dispositif Anneau, la variation relative de la résistivité apparente est en moyenne de 1,23 % entre les cylindres A1 et A2.

Ces plages de CV des mesures de reproductibilité dans le béton sont similaires à celles rapportées par Morris *et al.* (1996) (4% à 11%) avec une sonde de surface Wenner dans des conditions saturées.

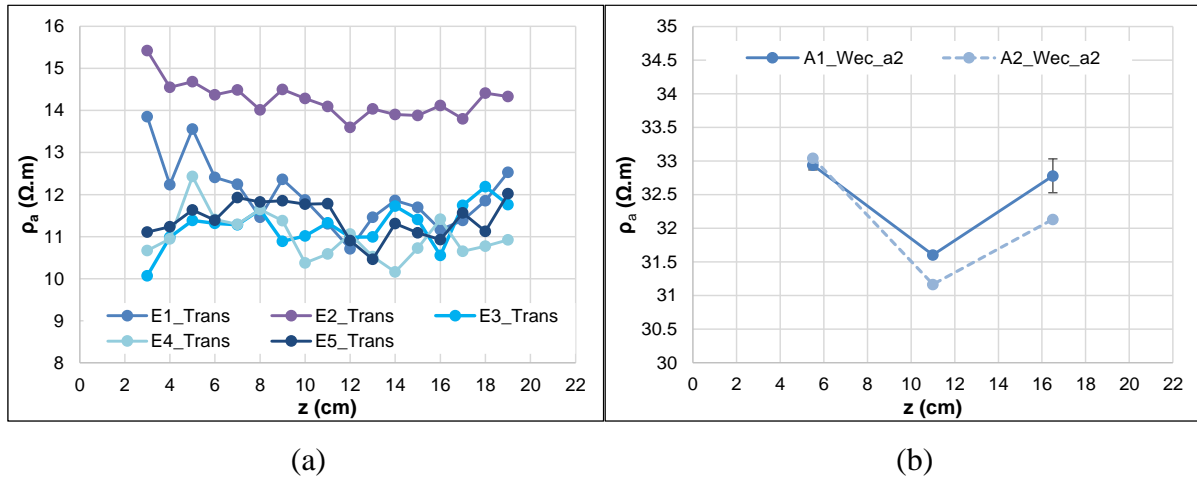


Figure 4-35 Profil de résistivité apparente en fonction de la profondeur dans des conditions saturées en utilisant: (a) la configuration Transmission du dispositif Echelle, (b) la configuration Wec_a2 du dispositif Anneau.

Une démarche d'incertitude des mesures obtenues par les dispositifs Echelle et Anneau à l'état saturé pour toutes les configurations est appliquée en se basant sur la norme [NF ENV 13005, 1999] :

- u_r est l'écart-type de répétabilité calculée en moyenne sur toute la profondeur,
- u_R est l'écart-type de reproductibilité calculée en moyenne sur toute la profondeur,
- u est l'écart-type d'incertitude globale.

Tableau 4-6 Calcul des incertitudes des mesures obtenues par les dispositifs Echelle et Anneau à l'état saturé pour toutes les configurations

Dispositifs	Echelle		Anneau			
	Trans	Wen	Wec_a2	Q_I12	Q_I16	Q_Carre
u_r [$\Omega \cdot m$]	0,16	0,04	0,08	0,11	0,12	0,09
u_R [$\Omega \cdot m$]	0,55	0,31	0,39	0,35	0,29	0,42
$\sqrt{u^2} = \sqrt{u_r^2 + u_R^2}$ [$\Omega \cdot m$]	0,57	0,31	0,40	0,37	0,31	0,43

Le Tableau 4-6 montre que la valeur de l'écart-type d'incertitude globale u est proche de la valeur de l'écart-type de reproductibilité u_R . Au vu de ces constatations, les dispositifs Echelle et Anneau développés dans notre étude donnent des résultats dans une plage de variabilité acceptable.

4.3.7 Vérification du contact électrique entre électrodes et béton

La qualité et la pérennité dans le temps des contacts entre électrodes et béton est bien évidemment cruciale pour l'application (monitoring sur le long terme).

L'étude de Du Plooy *et al.* (2013) détaille les différents aspects de ce problème et cite un certain nombre de sources bibliographiques dans le domaine d'application au béton. On trouve également des études de ce contact (et notamment de la polarisation) dans le domaine géophysique (Dahlin and Zhou, 2004; Yang et al., 2018). La polarisation à l'interface entre électrodes et béton, due à l'injection de courant et à la différence de nature de ces matériaux en contact (conduction électronique dans les électrodes, conduction ionique dans le béton), peut créer un biais dans la mesure. On peut minimiser ce biais, i) en utilisant des quadripôles (injection et mesure sur des paires d'électrodes séparées) plutôt qu'un dipôle (injection et mesure sur la même paire), ii) en veillant à injecter des courants d'intensité faible (mais suffisante pour garantir un bon rapport signal/bruit) et iii) en injectant un courant alternatif de basse fréquence (1 Hz – 1000 Hz). En outre, la résistance de contact entre électrodes et béton peut modifier la mesure : plus celle-ci est élevée, plus l'injection de courant est difficile et plus l'imprécision sur la mesure de différence de potentiel augmente. On peut réduire cette résistance en i) augmentant l'aire de la surface de contact et ii) en mouillant cette surface. Si ces précautions sont possibles avec des capteurs de surface, elles ne sont pas facilement envisageables dans notre développement de capteurs noyés de faibles dimensions pour une résolution centimétrique.

Par ailleurs, on souhaite maximiser la durée de vie des dispositifs donc de leurs contacts avec la matrice cimentaire. L'éventualité d'un retrait ou d'une microfissuration du béton au voisinage des électrodes viendrait compromettre cet objectif. Diverses solutions ont été imaginées (forme du dispositif Echelle, vis ajoutées aux électrodes du dispositif Anneau) pour maximiser la surface de contact et minimiser le risque de perte totale de contact suite au retrait. Cependant il est difficile de garantir la fiabilité et stabilité de ces solutions en particulier sur du très long terme.

L'efficacité des contacts électrodes-béton a été alors évaluée au cours du temps sur une éprouvette 11x22 cm de béton en suivant les évolutions des résistances de contact également tributaires de l'état hydrique du béton au voisinage immédiat des électrodes.

Les résistances de contact mesurées entre les paires d'électrodes sont dans la gamme de mesures considérées de bonnes à très bonnes avec le SYSCAL Pro (http://www.iris-instruments.com/Pdf_file/Resistivity_Sounding/summary_of_operation.pdf) et varient :

- pour les électrodes du circuit imprimé, de 7 à 35 k Ω entre le début et la fin du séchage,
- pour les grilles, de 2 à 10 k Ω entre le début et la fin du séchage.

Un essai de résistance à la rupture par traction (fendage) est réalisé sur l'éprouvette E7 afin de vérifier visuellement le contact entre les électrodes du dispositif Echelle et le béton. Nous pouvons voir sur la Figure 4-36 les images du circuit imprimé et des grilles après fendage de l'échantillon de béton avec un zoom sur les électrodes et leurs empreintes dans le béton. Un bon contact entre les électrodes et le béton est observé, vérifiant l'adhérence entre le béton et le dispositif en circuit imprimé qui ne présente aucun signe d'altération. Les granulats ont pu pénétrer entre deux électrodes consécutives et traverser les grilles, comme supposé précédemment.

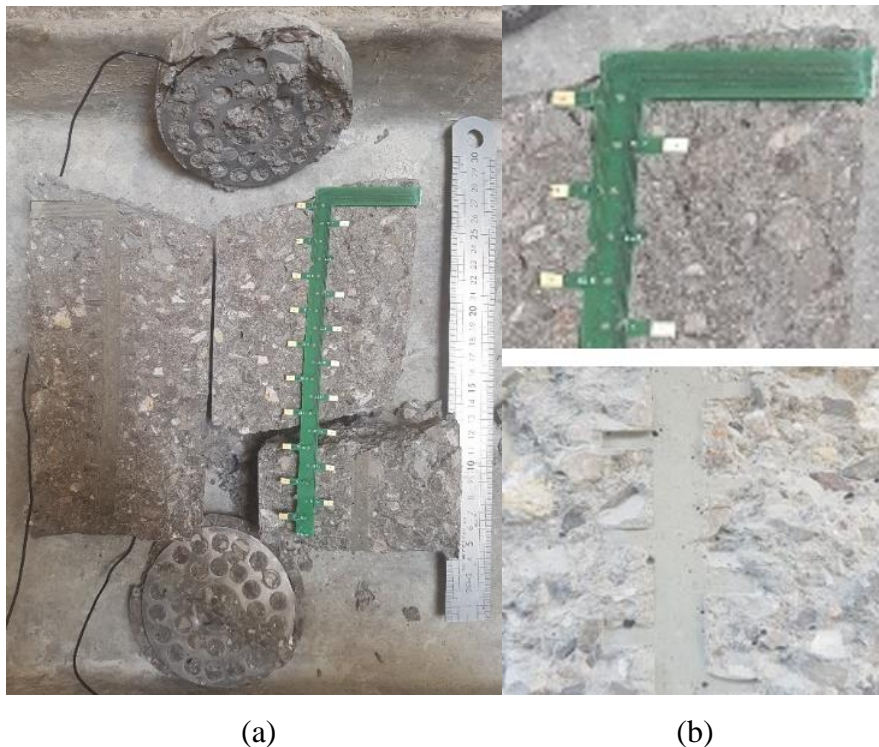


Figure 4-36 Vues de l'éprouvette E7 de béton fendu : (a) vue générale du circuit imprimé et des grilles, (b) zoom sur les électrodes (en haut) et leurs empreintes dans le béton (en bas).

Par ailleurs, il est intéressant d'étudier si le dispositif en circuit imprimé influe sur la résistance du béton. L'influence devrait être minime dans notre application car le volume du dispositif est relativement faible comparé au volume global de la structure «réelle».

En se basant sur l'essai de fendage, nous pouvons comparer la résistance à la traction brésilienne obtenue $R_{tb,o}$ et la résistance à la traction théorique $R_{tb,t}$:

- la résistance à la traction brésilienne obtenue $R_{tb,o}$ est égale 2,52 MPa (avec une incertitude quant à la mesure puisque cet essai n'a été effectué que sur un seul spécimen),
- la résistance à la traction théorique $R_{tb,t}$ est liée à la résistance à la compression à 28 jours (R_{c28}) en utilisant l'équation 4.4 [Eurocode NF EN 1992-1-1, 2005] :

$$R_{tb,t} = k_t R_c^{0.57} \quad (4.4)$$

avec k_t un coefficient qui dépend principalement de la nature des granulats (minéral et chimique).

$k_t = 0.344$ (Carrière Boulonnais) (De Larrard, 1999).

Pour la même date de coulage du béton, nous avons mesuré une résistance à la compression $R_{c28} = 30$ MPa.

$$R_{tb,t} = k_t R_c^{0.57} = 0.344 \cdot 30^{0.57} = 2,4 \text{ MPa}$$

La résistance à la traction brésilienne obtenue $R_{tb,o}$ et la résistance à la traction théorique $R_{tb,t}$ sont assez proches mais il est difficile de conclure sur l'effet du dispositif en circuit imprimé sur la résistance du béton, compte tenu des différences d'âge et du manque d'informations sur les incertitudes de mesure.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux géométries de capteurs en circuit imprimé permettant de mesurer le profil de résistivité dans le béton. Le circuit imprimé présente l'avantage de permettre une bonne précision géométrique à l'usinage, un faible coût de fabrication et d'une réduction des contraintes de câblage. Le dispositif Echelle permet d'obtenir une résolution centimétrique du profil de résistivité sur quasiment toute l'épaisseur d'une structure en béton et sa forme favorise l'ancrage dans le béton. Le dispositif Anneau présente l'avantage de moyenniser plusieurs configurations d'interrogation des électrodes à une même profondeur, et donc de limiter l'effet de la variabilité naturelle du matériau. Une étude numérique a été réalisée pour valider la réponse des dispositifs. Les résultats montrent que les profils de résistivité apparente simulés pour les différentes configurations de chaque dispositif

sont assez proches du profil de résistivité vraie (imposée). Des mesures expérimentales ont été effectuées sur des électrolytes de conductivités connues et les dispositifs ont prouvé leur capacité à déterminer les valeurs de résistivité avec précision. De plus, une validation des dispositifs est réalisée sur des éprouvettes cylindriques en béton montrant la répétabilité et la reproductibilité des mesures. Nous avons montré les bons contacts électriques entre les électrodes et le béton, ce qui est favorable pour la surveillance. Rappelons que tout le travail présenté ne permet pas d'étudier la durabilité du dispositif à très long terme vis-à-vis de l'application.

Les solutions proposées semblent prometteuses. Cependant, il est important de qualifier le comportement des sondes dans un environnement moins contrôlé donc plus proches des conditions réelles recherchées. Dans le chapitre suivant, les dispositifs Echelle et Anneau seront donc noyés dans une structure épaisse en béton de 30 cm d'épaisseur. Une campagne expérimentale sera menée pour estimer les profils de résistivité puis de teneur en eau en fonction de la profondeur.

Chapitre 5 Programme expérimental

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté l'importance de l'utilisation des méthodes ND et plus particulièrement des méthodes électriques (Chapitre 3) dans la détermination des profils de teneur en eau dans le béton armé (Chapitre 2). Nous avons présenté deux formes de dispositifs en circuit imprimé, noyés dans le béton, pour mesurer le profil de résistivité (Chapitre 4).

Dans ce chapitre, nous allons utiliser les capteurs que nous avons développés pour obtenir les profils de teneur en eau. La méthode d'interprétation de la mesure et la conception des essais seront présentées.

5.1 Méthode de détermination d'un profil de degré de saturation à partir de mesures de résistivité

La Figure 5-1 décrit le principe théorique de la méthodologie d'interprétation des mesures brutes, utilisée dans des travaux récents (Fares, 2015) : à partir de plusieurs mesures de résistivités apparentes, l'inversion (étape 1) permet d'obtenir un profil de résistivité en fonction de la profondeur, $\rho = f(z)$. En parallèle, la cellule de résistivité électrique permet de mesurer la résistivité de cylindres de béton dans des conditions homogènes à différents degrés de saturation et d'obtenir la courbe de calibration $\rho_c = f(S_r)$ (étape 2). Les cylindres de béton sont homogènes avec un volume élémentaire représentatif (VER) ($>3D_{\max}$) pour les bétons étudiés dans cette thèse. L'hypothèse, notée H2, consiste donc à assimiler la résistivité apparente mesurée ρ_c à la résistivité vraie ρ du matériau, à chaque degré de saturation. La courbe de calibration permet alors de transformer le profil de résistivité inversé en profil de degré de saturation en eau $S_r = f(z)$ (étape 3).

Dans le cadre de notre travail, la conception du dispositif Echelle permet une résolution spatiale centimétrique correspondant au processus que l'on veut étudier. Dans la Figure 4-24, nous remarquons que la mesure, aussi bien en configuration Wenner qu'en Transmission (à *fortiori* pour les autres configurations), est sensible à la zone autour des électrodes de mesure de potentiel. Le volume interrogé est donc petit et localisé. Nous supposons qu'on peut alors s'affranchir de l'inversion, modifiant la procédure précédente. La Figure 5-2 décrit le principe utilisé dans ce travail : les mesures de résistivité apparente sont positionnées en profondeur

entre les électrodes de potentiel permettant d'obtenir un profil de résistivité apparente $\rho_{ai} = f(\frac{z_{P1}+z_{P2}}{2})$ en fonction de la profondeur (étape 1). Cette hypothèse est traitée par l'étude de sensibilité réalisée dans le paragraphe 4.3.3 et l'étude numérique réalisée dans le paragraphe 4.3.4. En parallèle, deux méthodes de calibration sont utilisées puis comparées dans ce chapitre : la première méthode utilise la cellule cylindrique de résistivité développée dans la thèse de Du Plooy (2013) (Figure 3-3), et la seconde utilise le dispositif Echelle conçu dans cette thèse (étape 2). Si l'hypothèse H2 peut être considérée comme valide pour la cellule cylindrique de la taille d'un VER, elle est plus sujette à discussion pour la deuxième méthode de calibration utilisant le dispositif Echelle. Une éprouvette de 11 cm de diamètre est plus difficile à sécher qu'une éprouvette de 7 cm de diamètre et donc l'homogénéisation peut être difficile à établir. Au final, le profil de résistivité mesuré grâce aux dispositifs à cœur sera transformé en profil de degré de saturation en eau en utilisant les courbes de calibration $S_r = f(\frac{z_{P1}+z_{P2}}{2})$ (étape 3). (NB : par commodité dans ce paragraphe et dans les Figures 5-1 et 5-2, on utilise le même symbole « $f()$ » simplement pour indiquer qu'une relation est établie entre deux quantités).

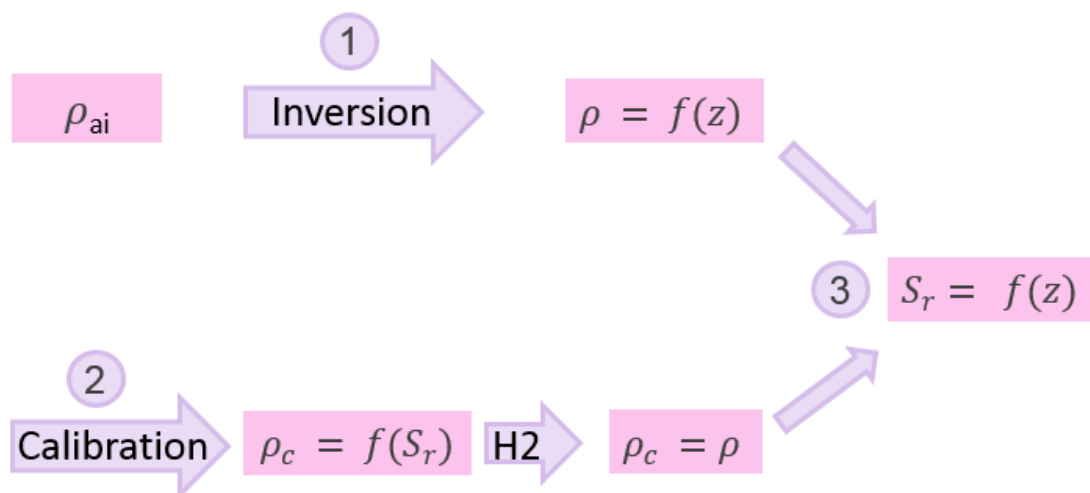


Figure 5-1 Schéma de la méthodologie permettant d'obtenir un profil de degré de saturation à partir de mesures de résistivité apparente.

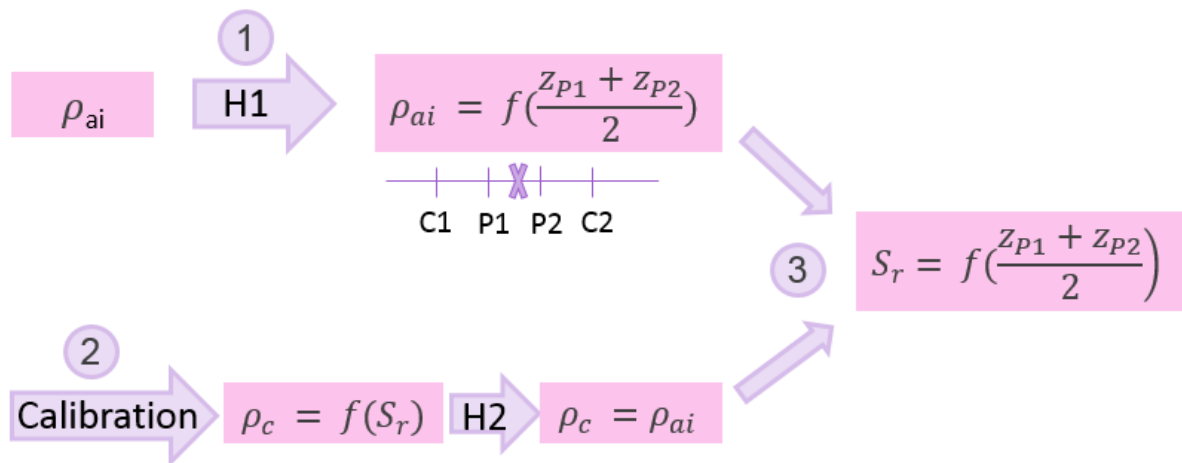


Figure 5-2 Schéma de principe de la méthodologie utilisée dans ce travail pour obtenir un profil de degré de saturation à partir de mesures de résistivité apparente à cœur.

5.2 Conception des expériences

Pour qualifier la chaîne de mesure développée dans ces travaux de thèses et pour vérifier le fonctionnement des deux types de dispositifs conçus, nous avons testé des prototypes dans le milieu d'emploi de l'application visée, le béton. Pour obtenir un gradient de teneur en eau, un séchage unidirectionnel est généré sur des cors d'épreuve (éprouvettes et dalles en béton). Tout d'abord il a fallu choisir un matériau représentatif et caractériser ses propriétés.

- Ainsi, le chapitre débute par les caractéristiques des bétons sur lesquels les essais ont été réalisés.
- Ensuite, des éprouvettes de petites dimensions instrumentées ont été réalisées et testées en conditions contrôlées.
- Enfin, deux dalles en béton armé HA et FV de dimensions représentatives de l'application, échelle métrique, ont été réalisés. Elles ont permis d'évaluer l'impact des armatures et l'influence de la mise en œuvre (différentes gâchées...). Instrumentées de nombreuses technologies, elles ont permis d'évaluer les avantages et inconvénients des différentes chaînes de mesure.

Les essais de calibration (étape 2) permettant de relier la résistivité à la teneur en eau sont décrits et analysés. Les courbes isothermes de désorption sont également établies à différentes températures pour calculer les degrés de saturation à partir des humidités relatives déterminées par des capteurs thermo-hygrométriques noyés dans les dalles.

5.3 Caractéristiques des bétons

5.3.1 Formulation des bétons

Parmi les formulations « de référence méthodologique » [Andra C RP 0 CTP 01-001/A 2000, Andra C RP OBON 04-415 2005] employées depuis des années par l'ANDRA, nous sélectionnons la formulation de référence à base de CEM I, dosé à 400 kg/m³ de ciment avec un rapport eau sur ciment (E/C) de 0,43, la taille maximale de granulat D_{max} étant de 12 mm. Cependant, pour obtenir des gradients significatifs dans une durée compatible avec les trois ans de thèse, il a été proposé de changer la formulation pour rendre le matériau plus perméable. Partant de la formulation précédente, nous avons proposé d'augmenter le rapport E/C de 0,43 à 0,59. Nous avons abaissé aussi la quantité de ciment (jusqu'à une valeur de 350 kg/m³) et simultanément nous avons augmenté le dosage en eau, pour accroître significativement la porosité accessible à l'eau de 12,0% à 14,3%, avec pour conséquence d'accélérer les processus des transferts hydriques pour devenir compatibles avec la durée de nos essais.

Les différents types de formulations (de référence et d'étude) sont présentés dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 Formulations de référence et d'étude

Constituants	Formulation	De référence	D'étude
Ciment CEM I 52,5 N SR3 PM (Lafarge, Val d'Azergues) [kg/m ³]		400	350
Sable 0/4 mm (Carrières du Boulonnais) [kg/m ³]		858	890
Gravier 4/12 mm (Carrières du Boulonnais) [kg/m ³]		945	984
Super Plastifiant MasterGlénium SKY 537 [kg/m ³]		3,2 (0,8% du ciment)	0
Eau efficace (E_{eff}) [kg/m ³]		170	206
E_{eff}/C		0,43	0,59

Plusieurs coulages ont été réalisés au cours de cette thèse. Ils sont présentés avec leur formulation dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2 Liste des coulages réalisés

Nom du coulage	Coulage 1	Coulage 2	Coulage 3	Coulage 4	Coulage 6	Coulage 5
Formulation	D'étude	D'étude	D'étude	D'étude	D'étude	De référence
Date du coulage	27/03/2017	11/05/2017	11/07/2017	13/12/2017	11/12/2018	15/12/2017

5.3.2 Répartition des corps d'épreuve

Le coulage 1 a servi à caractériser le béton et à vérifier les caractéristiques de la nouvelle formulation choisie dans cette étude. Le coulage 2 a servi à réaliser les études expérimentales préliminaires des dispositifs dans le béton (paragraphe 4.2). Après la conception des deux dispositifs, Echelle et Anneau, deux types d'essais ont été réalisés pour valider chaque dispositif : des essais sur éprouvettes (coulage 3 et 6) et des essais sur dalles (coulage 4) (paragraphe 5.2).

Pour les essais sur éprouvettes, nous présentons dans le Tableau 5-3 la répartition des noms des éprouvettes utilisant les dispositifs Echelle et Anneau. Les éprouvettes An1, An2, E6 et E7 permettent de tester la sensibilité des dispositifs au séchage (paragraphe 6.1). Les éprouvettes E1 à E5 permettent d'établir la courbe de calibration utilisant le dispositif Echelle (paragraphe 5.6.3).

Tableau 5-3 Répartition des noms des éprouvettes utilisant les dispositifs Echelle et Anneau.

Type d'essais	Coulage n°	Nom du dispositif	Nombre d'éprouvettes	Dimensions des éprouvettes (mm)	Nom des éprouvettes
Sensibilité au séchage	3	Anneau	2	φ160x220	An1 et An2
Sensibilité au séchage	3	Echelle	2	φ110x220	E6 et E7
Calibration avec le dispositif Echelle	6	Echelle	5	φ110x220	E1 à E5

Par ailleurs, deux dalles de béton de dimensions 75x75x30 cm³, équipées par des armatures de 12 mm de diamètre, ont été fabriquées. Dans une des deux dalles, les armatures sont en fibres de verre (FV), matériau électriquement non conducteur et, dans l'autre, les armatures sont en acier haute adhérence (HA), pour vérifier l'éventuelle influence des armatures sur les mesures avec les capteurs noyés. L'instrumentation des dalles est présentée en détail dans le paragraphe 5.4.1. Chaque dalle a été coulée en trois gâchées (Figure 5-3) afin de maîtriser la prise du béton vis-à-vis du temps de mise en place dans le moule. Une gâchée supplémentaire G7 a été coulée pour fabriquer plusieurs éprouvettes cylindriques destinées à la réalisation des isothermes de désorption et à des essais de gammadensimétrie. Deux dalles SENSO (D1 et D2) de dimensions 50x25x12 cm³ (Balayssac et al., 2012) ont été fabriquées avec la gâchée

G7. Les éprouvettes de calibration reliant la résistivité au degré de saturation en eau ont été carottées dans ces dalles. Les carottes sont de dimensions $\phi 75 \times 70$ mm compatibles avec les dimensions de la cellule cylindrique de résistivité (Figure 3-3). Pour la formulation de référence (coulage 5), 6 éprouvettes de dimensions $\phi 75 \times 70$ mm ont été carottées dans des éprouvettes $\phi 110 \times 220$ mm.

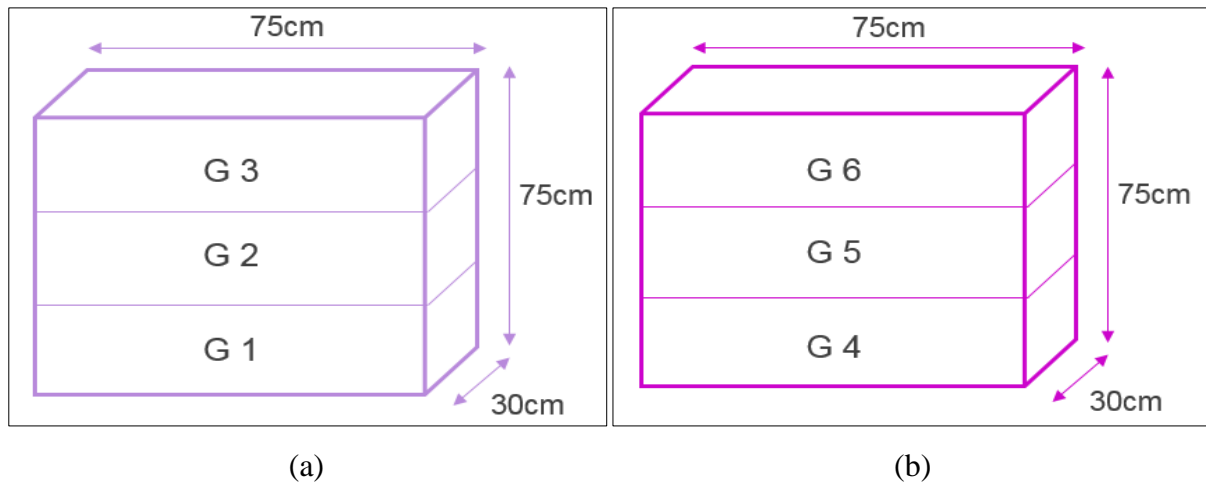


Figure 5-3 Répartition des gâchées numérotées du bas vers le haut dans les dalles expérimentales : (a) dalle FV, (b) dalle HA.

Des essais de caractérisation du béton (R_c , E et porosité) ont été réalisés pour chaque gâchée pour vérifier la reproductibilité du matériau entre les différentes gâchées.

La répartition des différentes éprouvettes et le type d'essai auquel elles ont été soumises sont présentés dans le Tableau 5-4.

Tableau 5-4 Répartition des éprouvettes pour les essais de porosité, R_c et E , les isothermes, la gammadensimétrie et la calibration.

Type d'essai	Coulage n°	Numéro de la gâchée	Nombre des corps d'épreuve	Dimensions (mm)
Porosité	4	G1 à G7	1/gâchée Divisée en 3 tranches	$\phi 110 \times 220$
R_c et E	4	G1 à G7	3/gâchée	$\phi 110 \times 220$
Isothermes de désorption	4	G1 à G7	1/gâchée Divisée en 4 tranches	$\phi 110 \times 220$
Gammadensimétrie	4	G7	2	$\phi 110 \times 300$
Calibration avec la cellule cylindrique de résistivité	4	G7	13	Carottées ($\phi 75 \times 70$) dans les dalles D1 et D2
	5 (formulation de référence)	-	6	Carottées ($\phi 75 \times 70$) dans des éprouvettes $\phi 110 \times 220$

5.3.3 Propriétés et reproductibilité des bétons

Pour vérifier la reproductibilité du matériau lors des différents coulages, des mesures de caractérisation du béton sur éprouvettes cylindriques ont été réalisées. Il s'agit notamment de mesures mécaniques (affaissement sur béton frais, résistance à la compression R_c et modules d'Young E à 28 jours) et de la mesure d'un indicateur de durabilité, la porosité à l'eau.

Les valeurs d'affaissement, de masse volumique et de teneur en air occlus sont obtenues à l'état frais du matériau. En revanche, la résistance en compression, le module d'Young et la porosité accessible à l'eau sont déterminés à l'état durci du matériau donc après 28 jours de cure dans une salle humide ($T = 20 \pm 2$ °C et $HR = 95 \pm 5\%$) afin de s'affranchir des effets de l'hydratation et de travailler sur un matériau peu évolutif.

Les mesures de résistance en compression sur béton durci (R_c) sont réalisées conformément à la norme [NF EN 12390-3]. Les modules d'Young sont déterminés grâce à des essais de compression en suivant la norme [NF EN 12390-13]. Les essais de résistance en compression et module d'Young sont faits sur des éprouvettes cylindriques de 11 cm de diamètre et 22 cm de hauteur ; chaque valeur est une moyenne de trois résultats de mesure obtenus sur trois échantillons.

La porosité accessible à l'eau ϕ est déterminée selon le mode opératoire (AFPC–AFREM, 1997). Le calcul se fait à partir de l'équation 5.1. La masse saturée M_{sat} de l'éprouvette est déterminée après avoir saturé l'éprouvette sous vide. La masse sèche M_{sec} de l'éprouvette est déterminée après avoir séché l'éprouvette à $T = 105 \pm 5$ °C jusqu'à stabilisation de la masse. Cette pratique suppose que l'équilibre est atteint lorsque la variation relative de la masse du matériau entre deux pesées successives espacées de 24h est inférieure à 0,05%. Le volume apparent est calculé à partir d'une pesée hydrostatique M_{hydro} . Les essais sont faits sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 5 cm et chaque valeur est une moyenne de trois mesures obtenues sur trois échantillons.

$$\phi = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}} = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{hydro})} \quad (5.1)$$

Le Tableau 5-5 présente les propriétés des 7 gâchées du coulage 4. Les affaissements sont compris entre 10,5 et 16 cm et la masse volumique varie de 2369 kg/m³ à 2402 kg/m³. Les résistances en compression à 28 jours sont comprises entre 37,7 et 46,3 MPa et la porosité

entre 14,8 à 15,3%. Les gâchées sont assez reproductibles en termes de porosité, l'écart-type est en effet relativement faible (0,2%).

Tableau 5-5 Caractéristiques des sept gâchées de béton du coulage 4

Nom de la gâchée	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
Affaissement [cm]	16,0	10,5	15,0	12,5	12,5	16,0	15,0
Masse volumique [kg/m ³]	2368	2402	2396	2395	2398	2391	2369
Air occlus [%]	1,9	-	-	2,2	-	-	-
R _c 28j [MPa]	37,7 ± 1,3	43,2 ± 0,7	46,3 ± 1,5	40,5 ± 2,3	41,5 ± 0,6	43,4 ± 2,8	42,6 ± 1,3
E 28j [GPa]	-	-	-	-	-	36,6 ± 1,0	35,8 ± 0,6
Porosité 28j [%]	15,0 ± 0,2	15,0 ± 0,1	14,9 ± 0,2	14,9 ± 0,1	14,8 ± 0,2	14,9 ± 0,3	15,3 ± 0,3

Le Tableau 5-6 présente les propriétés des six coulages effectués. Pour le coulage 4, une moyenne et un écart-type sont calculés pour les sept gâchées présentées dans le Tableau 5-5.

Tableau 5-6 Caractéristiques des bétons des six coulages différents

Caractéristiques mesurées		Coulage 1	Coulage 2	Coulage 3	Coulage 4	Coulage 6	Coulage 5
Affaissement [cm]		16,0	12,0	12,0	13,9 ± 2,1	12,0	21,0
Masse volumique [kg/m ³]		2380	2425	2405	2388 ± 14,0	2387	2415
Air occlus [%]		1,9	2,0	1,9	2,0 ± 0,2	-	2,0
R _c [MPa]	28j	30 ± 0,3	29,6 ± 1,2	-	42,2 ± 2,7	43,2 ± 2,9	67,3 ± 4,1
	54j	-	-	42,2 ± 2,4	-	-	-
	110j	-	33,1 ± 1,0	-	-	-	-
E [GPa]	28j	30,4 ± 2,2	32,4 ± 0,1	-	36,2 ± 0,6	-	45,5 ± 1,8
	54j	-	-	35,2 ± 1,2	-	-	-
	110j	-	32,9 ± 1,2	-	-	-	-
Porosité [%]	28j	14,3 ± 0,9	15,8 ± 1,3	-	15,0 ± 0,2	-	12,2 ± 1,0
	54j	-	-	15,0 ± 0,9	-	-	-
	90j	14,5 ± 0,2	-	-	-	15,0 ± 0,2	-

Les coulages 1, 2, 3, 4 et 6 caractérisent le béton de notre étude. Par ailleurs, le coulage 5 caractérise le béton de référence. Pour le béton d'étude, les affaissements sont compris entre 12 et 16 cm et la masse volumique varie de 2380 kg/m³ à 2425 kg/m³. À 28 jours, les résistances en compression sont comprises entre 29,6 et 43,2 MPa, le module d'Young varie de 30,4 à 36,2 GPa et la porosité varie de 14,3 à 15,8%. Les variations entre les différents

coulages peuvent provenir de différences dans les conditions de fabrication, de mise en œuvre et de cure.

5.4 Conception des dalles instrumentées

5.4.1 Instrumentation des dalles HA et FV

Les dispositifs Echelle et Anneau sont noyés dans les deux dalles pour mesurer le gradient de teneur en eau sur toute la profondeur. Afin de valider les dispositifs de mesure conçus, les dalles sont instrumentées d'autres capteurs choisis de notre étude bibliographique (THR et TDR). Comme les armatures en acier haute adhérence (HA) peuvent influencer les mesures de résistivité, la deuxième dalle est équipée par des armatures en fibres de verre (FV).

Les deux dalles de béton FV et HA, fabriquées au LMDC (Toulouse), sont renforcées sur chaque face avec des treillis d'armatures de 12 mm de diamètre, espacées de 20 cm. L'enrobage est fixé à 5 cm, il y a donc environ 20 cm entre les deux treillis. Il n'y a pas d'épingles reliant les 2 treillis. L'effet de l'épingle est testé avec la dalle HA, post coulage, en reliant les 2 lits d'armature par un câble électrique extérieur à la dalle. Nous avons remarqué que la connexion des deux lits d'armature a un effet négligeable sur le profil de résistivité électrique apparente (paragraphe 4.1.4.5).

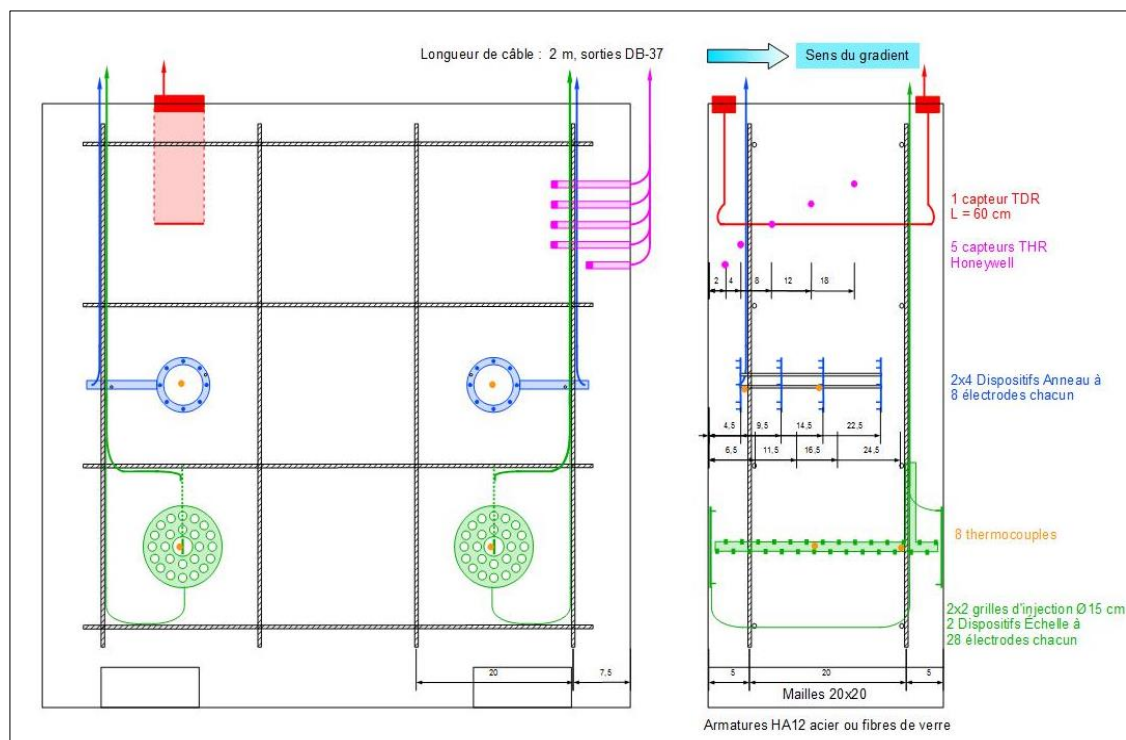


Figure 5-4 Schéma détaillé de la dalle FV (dimensions en cm).

Le schéma détaillé de la dalle FV est présenté dans la Figure 5-4. A la différence de la dalle HA, la dalle FV est en plus équipée d'un capteur TDR (paragraphe 3.3.3) de 60 cm de longueur traversant quasiment toute l'épaisseur de béton en vue d'une mesure répartie sur cette épaisseur (Figure 5-5). La dalle HA est conservée au LMDC (Toulouse) et la dalle FV à l'IFSTTAR (Nantes). Les zones centrales, non instrumentées, permettront d'effectuer des mesures de résistivité électrique surfaciques ainsi que des mesures capacitives.



Figure 5-5 Vue des mailles d'armatures en fibre de verre (avant coulage) et du capteur TDR implémenté dans la dalle FV.

Chaque dalle est instrumentée par 8 dispositifs Anneau, répartis en 2 séries de 4 dispositifs, placés à différentes profondeurs dans le but de déterminer le profil de résistivité avec la plus grande résolution sur toute l'épaisseur de la dalle (Figure 5-4).

De plus, 2 dispositifs Echelle à 28 électrodes sont noyés dans le béton, entre 2 grilles métalliques de diamètre 15 cm espacées de 29 cm. Le nombre d'électrodes du dispositif Echelle a augmenté de 19 (chapitre 4) à 28 électrodes pour pouvoir investiguer la totalité de l'épaisseur de 30 cm (Figure 5-6). Par ailleurs, le diamètre des grilles métalliques en acier inox servant pour l'injection du courant a augmenté de 10 cm (chapitre 4) à 15 cm (Figure 5-7) pour favoriser le confinement des lignes de courant.

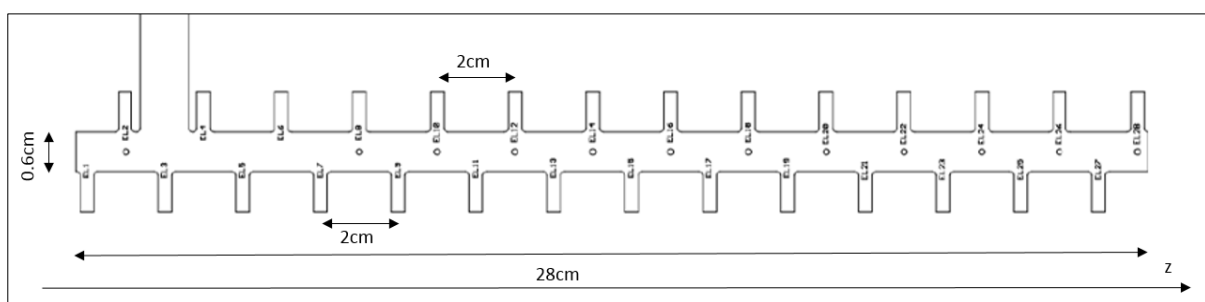


Figure 5-6 Dispositif Echelle à 28 électrodes.

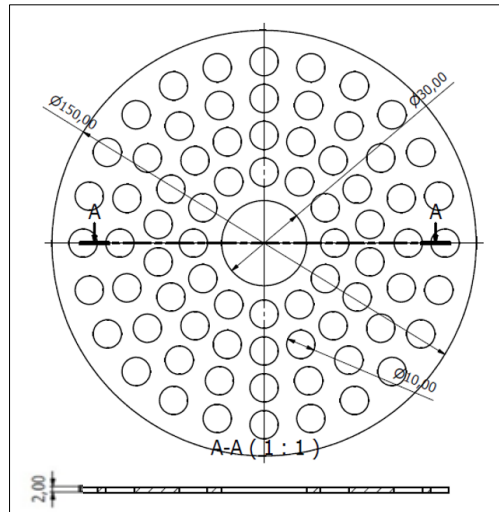


Figure 5-7 Schéma des dimensions (mm) des grilles en acier inoxydable noyées dans les dalles et servant d'électrodes d'injection de courant pour le capteur Echelle

Puisqu'il s'agit de dispositifs entièrement noyés dans le béton, les conducteurs sont des câbles standard multibrins, gainés pour les isoler entre eux et également du béton. Par ailleurs, la liaison entre câbles conducteurs et supports d'électrodes (circuit imprimé) est réalisée par soudure CMS (Composants Montés en Surface) pour favoriser l'étanchéité. Les lieux d'insertion des soudures sur chaque dispositif en circuit imprimé sont protégés par une gaine thermo-rétractable. Les câbles, de longueur 2 m, sortent au niveau des armatures transversales comme indiqué sur les Figures 5-4 et 5-10. Un connecteur standard (DB37) permet de relier les 4 dispositifs Anneau ou 1 dispositif Echelle avec les 2 grilles à l'appareil de mesure (Figure 5-8).



(a)

(b)

Figure 5-8 Vue des dispositifs noyés dans les corps d'épreuve avec leur connecteur DB37 : (a) série de 4 dispositifs Anneau, (b) 1 dispositif Echelle à 28 électrodes.

Outre les dispositifs en circuit imprimé, 5 capteurs thermohygrométriques (THR Honeywell) (paragraphe 3.2.1) ont été étalonnés et placés dans des cavités aménagées grâce à des

réservations au moment du coulage des dalles à 5 profondeurs différentes (2, 4, 8, 12 et 18 cm de la surface exposée au séchage) (Figure 5-9). Ces cavités ont un diamètre de 1 cm et sont scellées avec un mastic d'étanchéité après la mise en place du capteur. Ainsi l'évolution du profil d'humidité relative (HR) dans l'épaisseur du béton est suivie au niveau de ces cavités lors du séchage. Des courbes isothermes de désorption ont été établies et seront utilisées pour convertir l'humidité relative mesurée en degré de saturation (paragraphe 5.8).

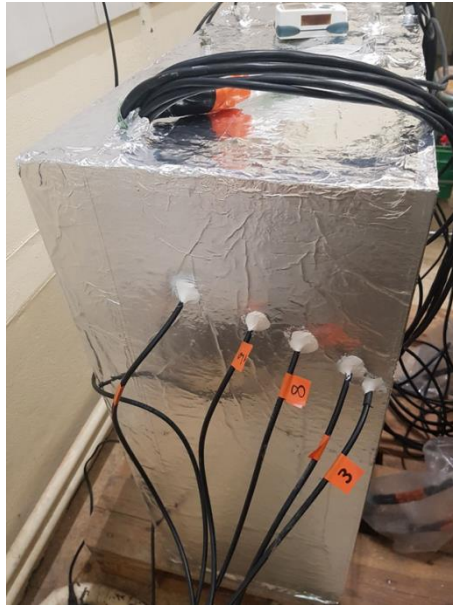


Figure 5-9 Vue de la face latérale de la dalle HA, recouverte de papier aluminium, montrant 5 capteurs THR (Honeywell) implantés dans la dalle.

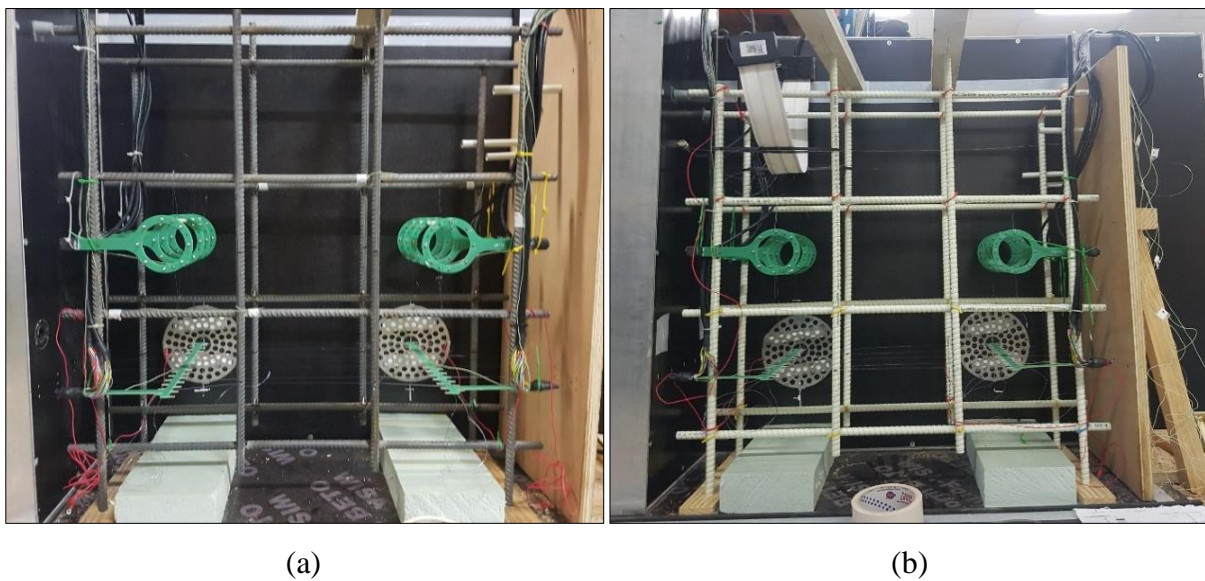


Figure 5-10 Vue des moules des dalles avant coulage, avec lits d'armatures et instrumentation : (a) dalle HA, (b) dalle FV.

Par ailleurs, 8 capteurs thermocouples, permettant de suivre la température du béton, sont également implantés dans chaque dalle, à proximité des capteurs hydriques (Figure 5-4).

Deux réservations sont prévues en bas des dalles pour permettre leur manutention et leur mise en étuve avec un chariot élévateur.

Les photos des dalles HA et FV avant coulage sont présentées dans la Figure 5-10.

5.4.2 Nomenclature des dispositifs

Pour faciliter la désignation des dispositifs dans les dalles HA et FV, une nomenclature a été adoptée selon la Figure 5-11.

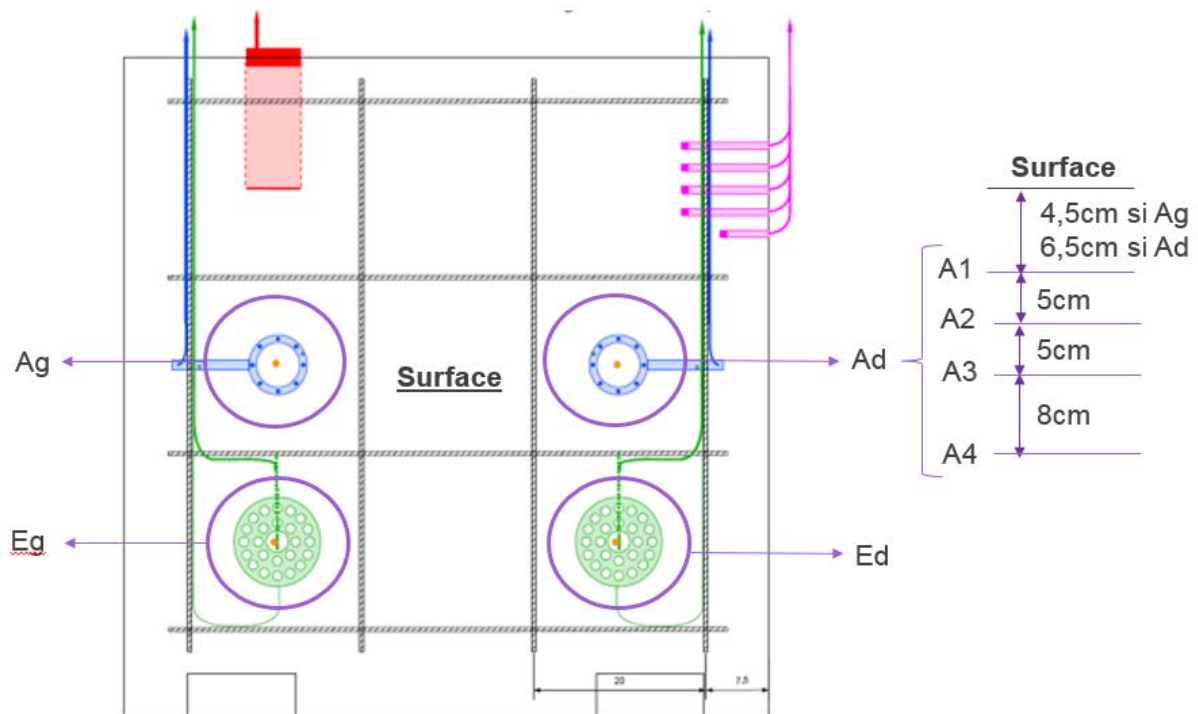


Figure 5-11 Annotation des dispositifs dans les dalles HA et FV.

Le dispositif Echelle sera désigné par la lettre E et le dispositif Anneau par la lettre A. Les lettres d ou g seront ajoutées suivant que le dispositif est placé à droite ou gauche par rapport à la surface de la dalle exposée au séchage. Pour le dispositif Anneau, un numéro (A1/2/3/4) sera utilisé pour désigner la position du dispositif par rapport à la surface, sachant que le dispositif A1 est le plus proche de la surface exposée au séchage.

Ainsi, pour le reste du travail, la notation sera :

- FV/HA_ Eg/d pour le dispositif Echelle,
- FV/HA_Ag/d _A1/2/3/4 pour le dispositif Anneau.

5.4.3 Conditions d'exposition et échéances de mesure

Les dalles ont été conditionnées, pendant 41 jours, en cure humide dans une salle à une température $T = 20 \pm 2$ °C, et une humidité relative $HR = 95 \pm 5\%$.

La méthode de génération du profil de teneur en eau consiste à générer un séchage unidirectionnel en exposant une seule face au séchage et en imperméabilisant les 5 autres. Pour ce faire, les 4 faces latérales sont enduites de résine et recouvertes de papier aluminium auto-adhésif. La face opposée à la face de séchage est recouverte de bâche de polypropylène pour assurer une isolation électrique, puis d'une feuille d'aluminium (Figure 5-12).



Figure 5-12 Vue de la dalle HA recouverte de papier aluminium pour la génération du profil unidirectionnel de teneur en eau.

La dalle FV a été placée pendant 5 mois de séchage à 20 °C et 1 an de séchage à 45 °C pour accélérer l'établissement du profil d'humidité. La dalle HA a été placée pendant 13 mois de séchage à 20 °C et 3 mois de séchage à 45 °C (Figure 5-13).

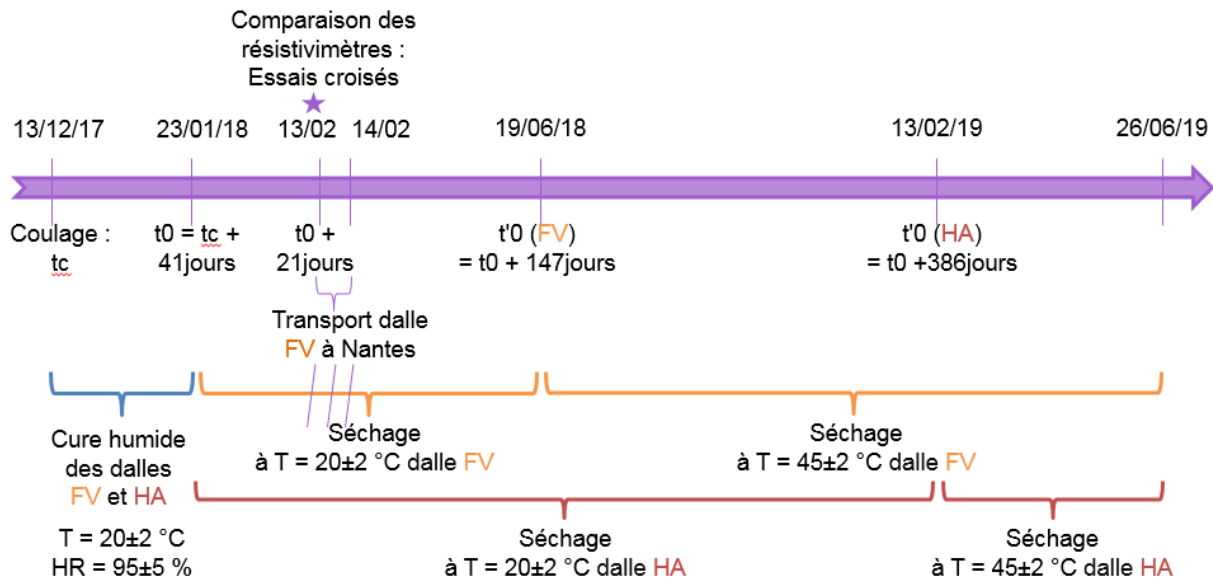


Figure 5-13 Historique de conservation des dalles FV et HA

5.4.4 Configurations de mesure

Nous avons présenté dans le chapitre 4 deux configurations de mesure pour le dispositif Echelle, la configuration Transmission et la configuration Wenner. Nous détaillons dans ce paragraphe chacune de ces configurations et nous présentons les 3 autres :

- la configuration Transmission (ou Trans) (Figure 5-14 (a)) pour laquelle le courant d'intensité I est injecté par les deux grilles métalliques et une différence de potentiel (ΔV) est mesurée entre deux électrodes voisines situées du même côté du circuit imprimé (par exemple, P1 et P2 sur la Figure 5-14 (a) puis P2 et P3, etc.). On distingue par Trans_g la configuration pour laquelle les électrodes de mesures de potentiel sont EL1, EL3... (nombres impairs : à gauche de l'axe du CI) et Trans_d la configuration pour laquelle les électrodes de mesures de potentiel sont EL2, EL4... (nombres pairs : à droite de l'axe du CI). On obtient ainsi 13 mesures de résistivité apparente de type Trans sur le côté gauche et 13 mesures sur le côté droit, réparties avec la profondeur.

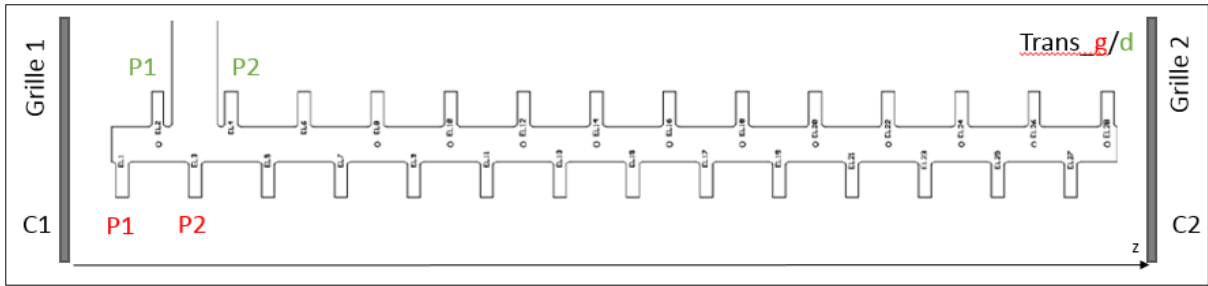
- la configuration de type Wenner (ou Wen) (Figure 5-14 (b)), pour laquelle l'injection de courant est effectuée sur les électrodes externes (C1 et C2) et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes internes (P1 et P2). On distingue par Wen_g la configuration pour laquelle les électrodes interrogées sont EL1, EL3, EL5, EL7... (à gauche de l'axe du CI) et Wen_d la configuration pour laquelle les électrodes interrogées sont EL2, EL4, EL6, EL8... (à droite de l'axe du CI). Dans les deux cas, les quatre électrodes concernées présentent

un espacement constant de 2 cm. Ainsi, nous obtenons 11 mesures de résistivité apparente de type Wen du côté gauche et 11 mesures du côté droit.

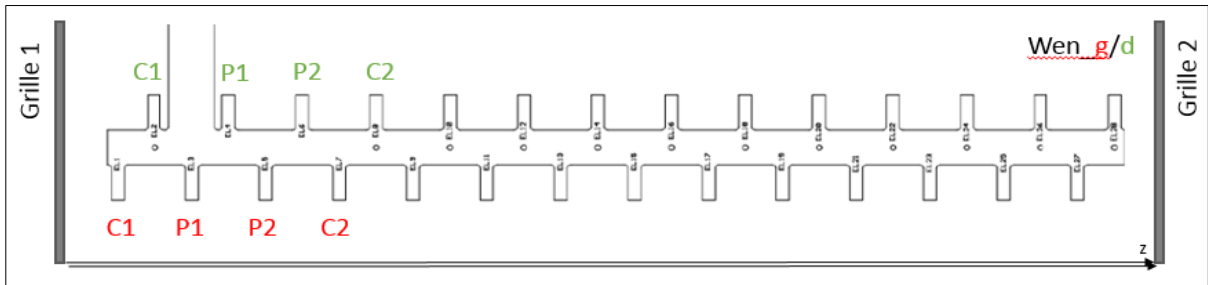
- la configuration Q_I12 (Figure 5-14 (c)), pour laquelle l'injection de courant est effectuée sur les électrodes (C1 et C2) (EL1, EL2 puis EL2, EL3...) et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes (P1 et P2) (EL3, EL4 puis EL4, EL5...). Ainsi, nous obtenons 25 mesures de résistivité apparente réparties avec la profondeur.

- la configuration Q_Crois (Figure 5-14 (d)), pour laquelle l'injection de courant est effectuée sur les électrodes (C1 et C2) (EL1 ; EL4 puis EL2 ; EL5...) et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes (P1 et P2) (EL2 ; EL3 puis EL3 ; EL4...). Ainsi, nous obtenons 25 mesures de résistivité apparente réparties avec la profondeur.

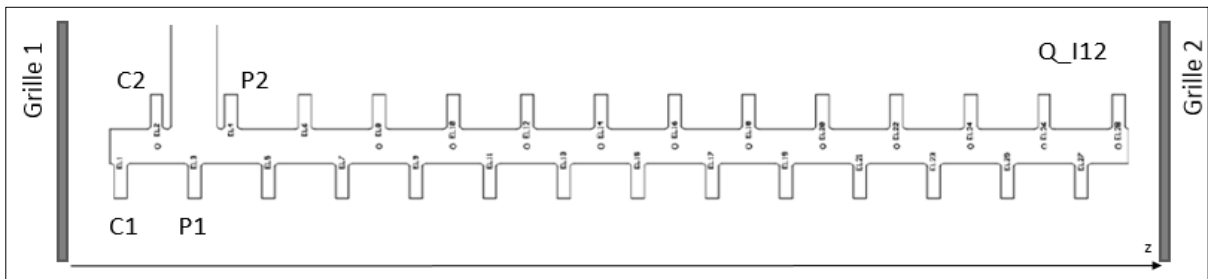
- la configuration Q_I13 (Figure 5-14 (e)), pour laquelle l'injection de courant est effectuée sur les électrodes (C1 et C2) (EL1 ; EL3 puis EL2 ; EL4...) et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes (P1 et P2) (EL2 ; EL4 puis EL3 ; EL5...). Ainsi, nous obtenons 25 mesures de résistivité apparente réparties avec la profondeur.



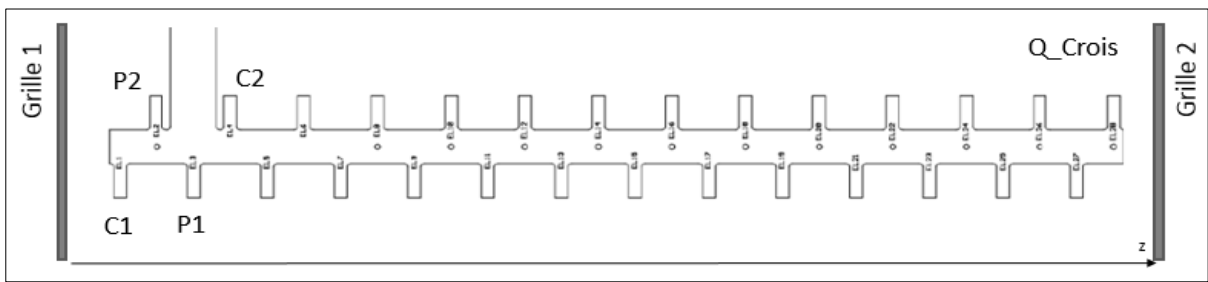
(a)



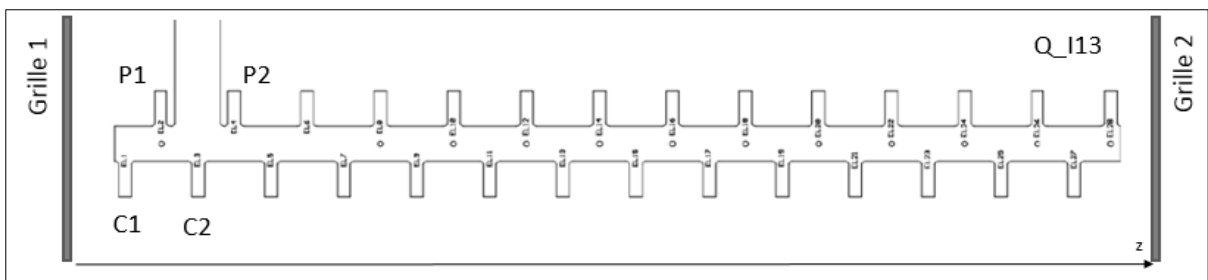
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 5-14 Schéma des configurations de mesure avec le dispositif Echelle : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.

Pour le dispositif Anneau, les configurations (Wec_a2, Q_I12, Q_I16, Q_carre) sont présentées dans le chapitre 4. Une nouvelle configuration est introduite dans ce paragraphe, la configuration Q_I19 entre deux anneaux (Figure 5-15) pour laquelle l'injection de courant est effectuée entre deux électrodes (C1 et C2) appartenant à deux anneaux voisins (EL1_A1 ; EL1_A2) et la différence de potentiel est mesurée entre deux électrodes (P1 et P2) appartenant à ces mêmes anneaux (EL2_A1 ; EL2_A2 puis EL3_A1 ; EL3_A2...). Nous obtenons 7 valeurs de résistivité apparente (en faisant le tour complet des anneaux) qui seront moyennées. La résistivité apparente mesurée est représentée en profondeur au milieu des deux dispositifs Anneau interrogés.

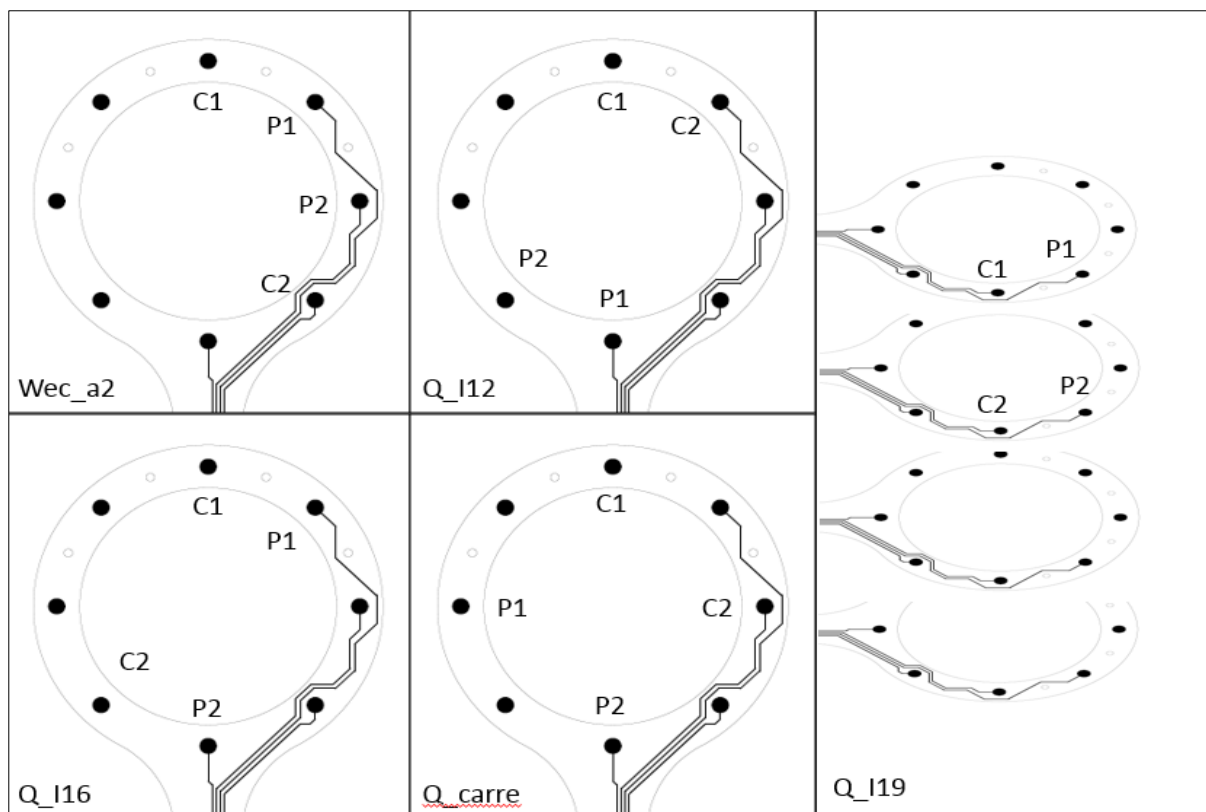
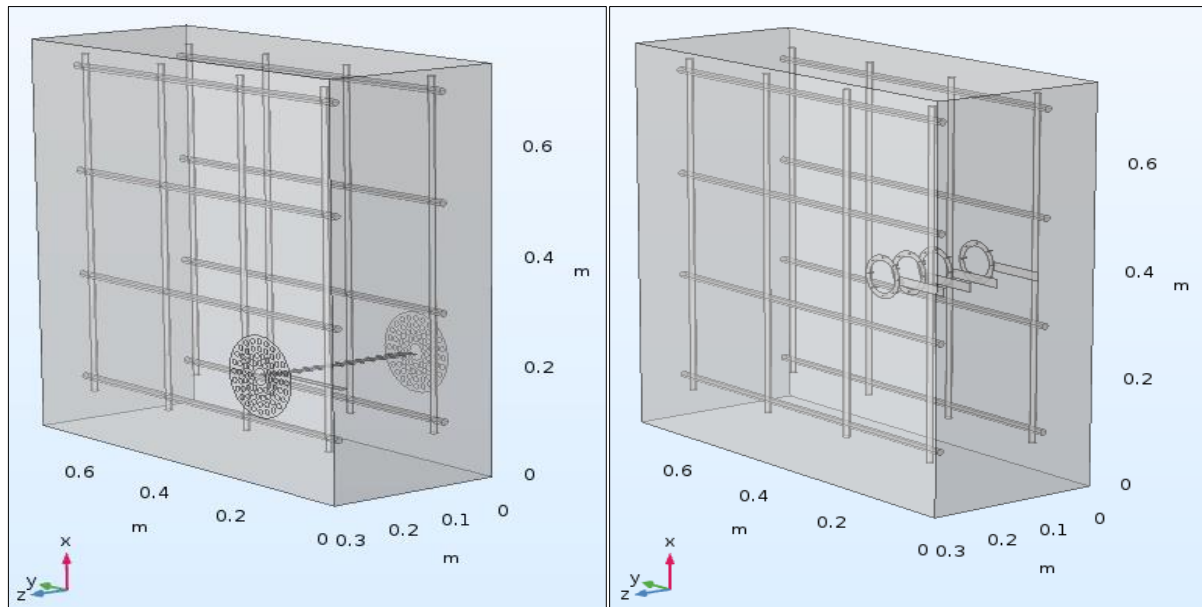


Figure 5-15 Schémas des différentes configurations d'interrogation d'électrodes pour le dispositif Anneau.

5.4.5 Facteurs géométriques

Les mesures brutes fournies par les résistivimètres sont des résistances électriques, dites résistances de transfert (rapport entre la différence de potentiel mesurée entre P1 et P2 et l'intensité du courant injectée entre C1 et C2). Afin de pouvoir remonter à la résistivité apparente, la résistance est multipliée par un facteur géométrique calculé à l'aide des modélisations EF sous COMSOL Multiphysics.

Dans le but de simplifier le maillage en éléments finis du modèle numérique, et comme les dispositifs se situent dans des mailles d'armatures différentes, nous avons découplé le calcul du facteur géométrique en modélisant les dispositifs séparément (Figure 5-16) et ceci en faisant l'hypothèse que l'influence des autres dispositifs sur le calcul du facteur géométrique est négligeable (hypothèse vérifiée lors de plusieurs calculs).



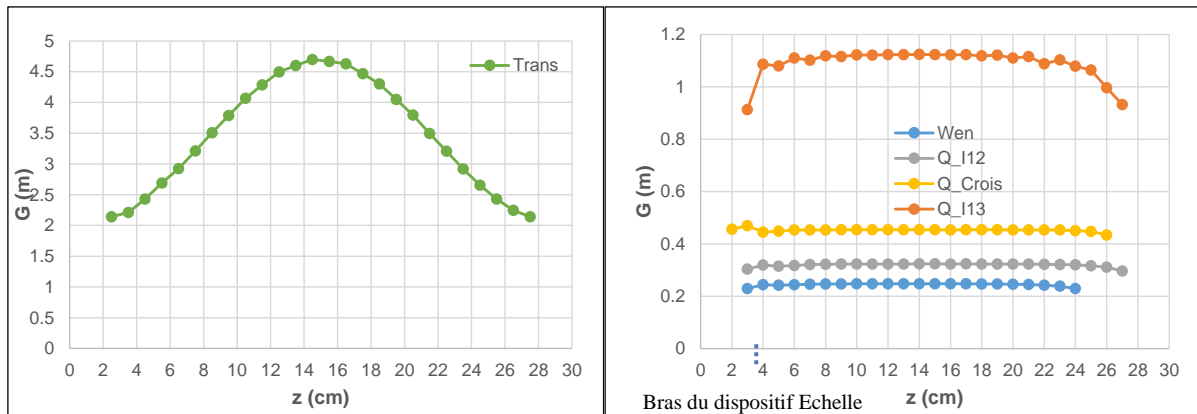
(a)

(b)

Figure 5-16 Géométrie 3D des dispositifs dans les dalles armées pour le calcul des facteurs géométriques sous COMSOL Multiphysics : (a) Dispositif Echelle, (b) Dispositifs Anneau.

Nous rappelons que le calcul est réalisé en milieu homogène et que nous obtenons une valeur du facteur géométrique pour chaque configuration d'électrodes en utilisant l'équation 3.8.

La variation du facteur géométrique en fonction de la profondeur pour le dispositif Echelle est représentée dans la Figure 5-17 pour toutes les configurations. Nous pouvons remarquer que le facteur géométrique ne dépend presque pas de la profondeur (à l'exception de faibles variations au voisinage des grilles et du bras du dispositif Echelle) pour les configurations quadripôles n'utilisant pas les grilles pour injecter le courant. En revanche, en configuration Transmission, la valeur du facteur géométrique diminue très sensiblement en s'approchant des grilles aux extrémités de la dalle.



(a)

(b)

Figure 5-17 Facteur géométrique en fonction de la profondeur des électrodes interrogées pour le dispositif Echelle pour les configurations : (a) Trans, (b) Wen, Q_{I12} , Q_{Crois} et Q_{I13} .

Une étude similaire est réalisée avec les dispositifs Anneau pour toutes les configurations. Nous présentons dans la Figure 5-18 la variation du facteur géométrique en fonction de la position angulaire de l'électrode C1 d'injection du courant pour le premier anneau situé à droite dans la dalle (Ad_A1). On remarque qu'en tournant autour de l'anneau, la variation du facteur géométrique est négligeable, ce qui est cohérent avec la géométrie (symétrie de révolution autour de l'Anneau). Une variation plus grande est observée pour la configuration inter-anneaux Q_{I19} (Figure 5-18 (e)).

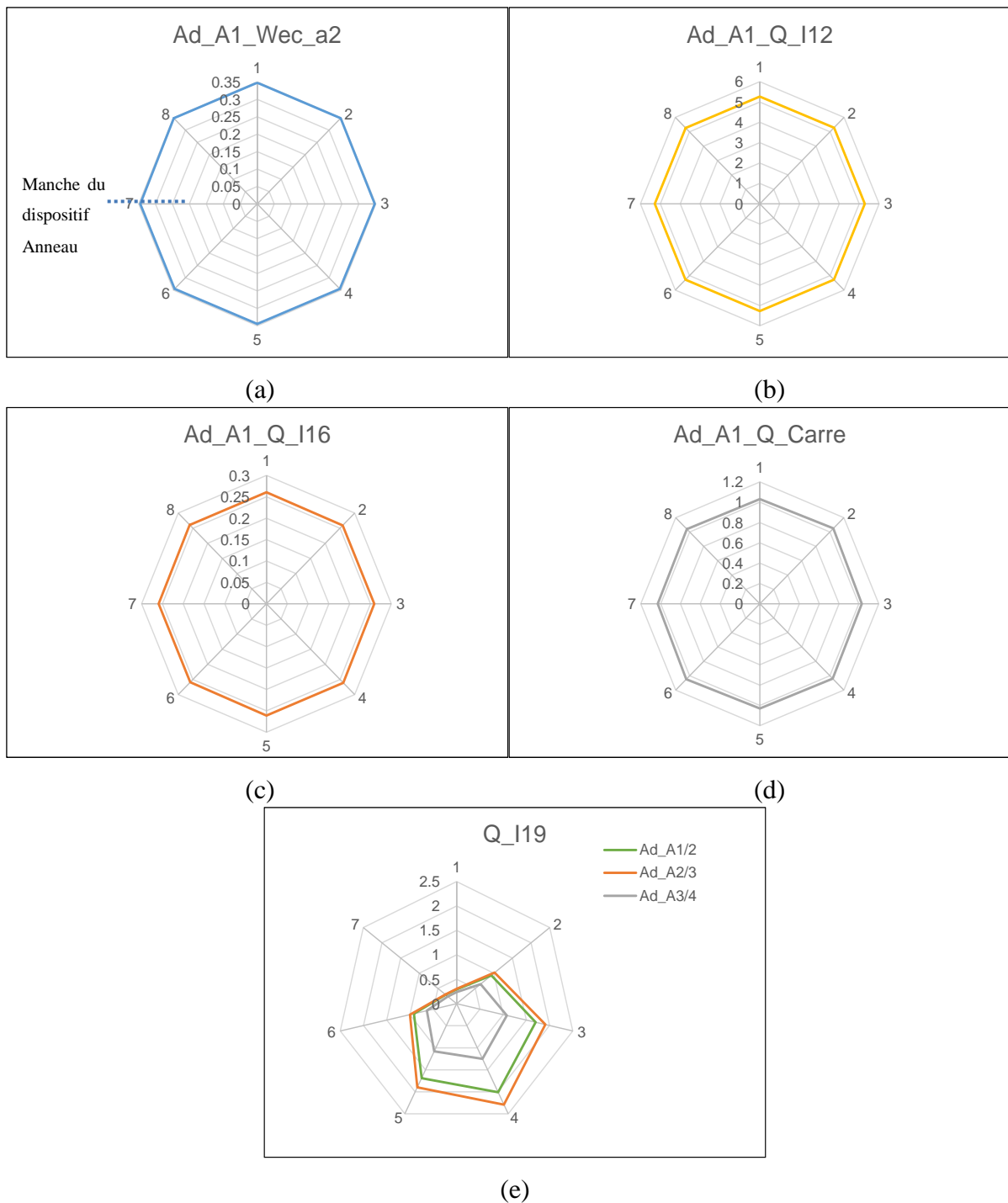
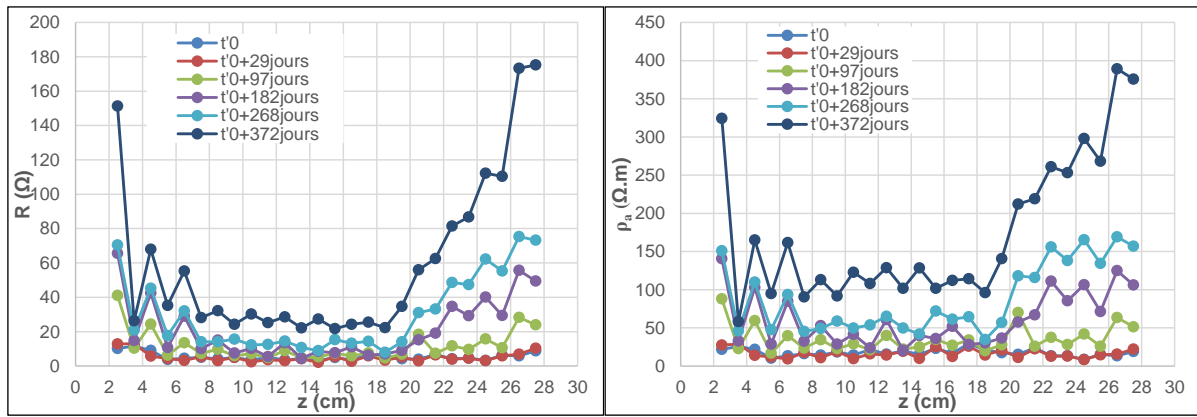


Figure 5-18 Facteur géométrique en fonction de la position angulaire (tous les 45°) de l'électrode C1 d'injection du courant pour le dispositif Anneau et pour les configurations : (a) Wec_a2, (b) Q_I12, (c) Q_I16, (d) Q_Carre, (e) Q_I19.

Nous présentons dans la Figure 5-19 un exemple de passage de la mesure brute, la résistance électrique, à la résistivité électrique apparente à chaque profondeur, dans le cas d'un dispositif Echelle FV_Ed, au cours d'une période de 372 jours de séchage à 45 °C en utilisant la configuration Transmission.



(a)

(b)

Figure 5-19 Profil mesuré avec le dispositif Echelle FV_Ed au cours d'une période de 372 jours de séchage à 45°C en utilisant la configuration Transmission : (a) de la résistance électrique, (b) de la résistivité apparente.

Notons que les oscillations observées sur ces profils sont dues aux écarts entre les réponses droites/gauches du dispositif (paragraphe 6.2.1.2) puisque les résultats de la Figure 5-19 incluent les deux côtés de l'Echelle.

5.5 Résistivimètres et métrologie

En vue d'un déploiement industriel rapide, il a été choisi d'utiliser des systèmes de mesure commerciaux. En pratique, pour effectuer des mesures de résistivité électrique dites « à courant continu », ces dispositifs génèrent un courant alternatif de basse fréquence, plutôt qu'un courant continu, afin de limiter les phénomènes de polarisation d'électrodes. Chaque fournisseur et modèle de résistivimètre utilise des paramètres spécifiques, dont nous avons souhaité quantifier la possible influence sur les performances métrologiques de la chaîne de mesure complète, utilisant nos capteurs noyés.

Les résistivimètres (appareils de mesure de résistivité) utilisés dans cette thèse sont :

- Un résistivimètre TIGRE (Terrascan) du LMDC, Toulouse

Le système d'acquisition (jusqu'à 4 voies en parallèle) permet d'interroger 64 électrodes. Le courant injecté est un courant alternatif basse fréquence (environ 5 Hz), et le signal injecté est un signal carré. L'intensité du courant injecté peut varier de 0,5 à 200 mA.

- Un résistivimètre SYSCAL Pro (IRIS Instruments) de l'IFSTTAR, Nantes

Le système d'acquisition (jusqu'à 10 voies en parallèle) permet de gérer jusqu'à 96 électrodes. Le courant injecté est un courant alternatif basse fréquence (0,0625 à 2 Hz), et le

signal injecté est un signal carré. L'intensité du courant injecté peut varier de 0,1 à 2500 mA. La fréquence utilisée pour toutes les mesures de cette thèse est de 2 Hz.

- Un résistivimètre Terrameter LS (ABEM) prêté par l'IRSN ou EDF ou le CEREMA à des échéances données.

Le système d'acquisition (jusqu'à 2 voies en parallèle) permet de gérer jusqu'à 64 électrodes. Le courant injecté est un courant alternatif basse fréquence (environ 0.1 à 1 Hz), et le signal injecté est un signal de type carré (légèrement plus élaboré que celui des deux autres appareils décrits ci-dessus. L'intensité du courant injecté peut varier de 0,1 jusqu'à 2500 mA.

Nous utilisons dans l'ensemble de nos études des courants de 0,5, 1, 5, 10 et 50 mA (en particulier pour le TIGRE et le LS, qui sont réglés en courant). Pour le SYSCAL, réglé en potentiel, le courant d'injection est ajusté automatiquement pour assurer une différence de potentiel V_{MN} minimale et donc une meilleure qualité de la mesure.

Dans la suite du travail, les mesures acquises avec les trois appareils seront comparées sur les mêmes corps d'épreuve à une même échéance.

5.6 Calibration de la résistivité

Afin de calibrer les mesures, la relation entre la résistivité et le degré de saturation est établie expérimentalement. Les éprouvettes de béton sont conditionnées à différents degrés de saturation. Pour déterminer la résistivité électrique correspondante, nous avons utilisé la méthodologie développée par Villain *et al.* (2018) avec deux dispositifs de mesure. Le premier est la cellule cylindrique de résistivité développée dans la thèse de Du Plooy (2013) (Figure 3-3), et le second est le dispositif Echelle conçu dans cette thèse. En effet, dans le paragraphe 4.3.6.2, nous avons remarqué que la valeur de la résistivité en milieu saturé est faible (10 à 14 $\Omega.m$) par rapport aux valeurs trouvées dans la littérature (entre 50 et 200 $\Omega.m$) dans des conditions saturées (Balayssac and Garnier, 2017; Polder et al., 2000). C'est pourquoi une seconde méthode de calibration est proposée en utilisant le capteur noyé étudié. Une comparaison des deux courbes de calibration sera présentée dans le paragraphe 5.6.4.

5.6.1 Protocole expérimental

Les différentes éprouvettes de béton sont d'abord saturées (M_{sat} ; $S_r = 100\%$) puis séchées à 45 °C pour atteindre diverses masses M_t et donc différents degrés de saturation S_r . Elles sont

ensuite recouvertes de papier aluminium adhésif qui assure l'étanchéité puis placées dans une étuve à une température $T = 45\text{ °C}$ pour l'homogénéisation de la quantité d'eau dans la porosité pendant une durée égale à la durée du séchage (Parrott, 1994). A la fin de l'expérience, les éprouvettes sont séchées à 105 °C (M_{sec}) pour calculer les vrais degrés de saturation S_r à partir de l'équation 5.2.

$$S_r = \frac{\text{volume d'eau}}{\text{volume des vides}} = \frac{(M_t - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sec})} \quad (5.2)$$

5.6.2 Calibration avec la cellule cylindrique de résistivité

Une série de mesures sur des carottes cylindriques, de diamètre 75 mm et de hauteur 70 mm, est effectuée avec la cellule cylindrique (Figure 3-3) à différents degrés de saturation. Pour le béton d'étude (coulage 3) nous disposons de 13 éprouvettes des différentes gâchées (G1 à G7), tandis que pour le béton de référence (coulage 4) nous disposons de 6 éprouvettes (G8). La répartition des éprouvettes est présentée dans le Tableau 5-7. Les mesures sont réalisées avec les 3 résistivimètres (SYSCAL Pro, TIGRE et Terrameter LS) à $T = 20\text{ °C}$.

Tableau 5-7 Répartition des éprouvettes de calibration de la résistivité en utilisant la cellule cylindrique

Eprouvetttes / Sr (%)		SYSCAL Pro				TIGRE				Terrameter LS			
		100	80	60	40	100	80	60	40	100	80	60	40
Béton d'étude	G1H	x		x		x		x		x		x	
	G1M	x	x	x	x		x		x		x		x
	G2M	x	x	x	x		x		x		x		x
	G2B	x	x	x	x		x		x		x		x
	G3M	x	x	x	x		x		x		x		x
	G3B	x		x		x		x		x		x	
	G4M	x	x	x	x		x		x		x		x
	G5M	x	x	x	x		x		x		x		x
	G5H	x	x	x	x		x		x		x		x
	G6M	x	x	x	x		x		x		x		x
	G7H	x	x	x	x		x		x		x		x
	G7M	x		x		x		x		x		x	
G7B	x	x	x	x		x		x		x		x	
Béton de référence	G8A1	x	x	x	x		x		x		x		x
	G8B1	x	x	x	x		x		x		x		x
	G8C1	x	x	x	x		x		x		x		x
	G8A2			x		x		x		x		x	
	G8B2	x	x	x	x		x		x				
	G8C2	x	x	x	x		x		x				

Les notations H, M et B désignent respectivement la position du carottage haut, moyen et bas de l'éprouvette. Pour chacune des éprouvettes, nous obtenons 6 mesures de résistivité à différentes hauteurs et 6 autres en inversant le sens de l'éprouvette dans la cellule. Une moyenne et un écart-type des 12 mesures sont calculés. Par ailleurs, une moyenne des éprouvettes par gâchée est présentée.

Les courbes de calibration résistivité–saturation pour le béton d'étude (G1 à G7), en utilisant les différents résistivimètres SYSCAL Pro, Terrameter LS et TIGRE, sont présentées respectivement dans les Figure 5-20 (a), (b) et (c). Une moyenne de toutes les gâchées (G1 à G7) est présentée dans la Figure 5-20 (d) pour chaque résistivimètre.

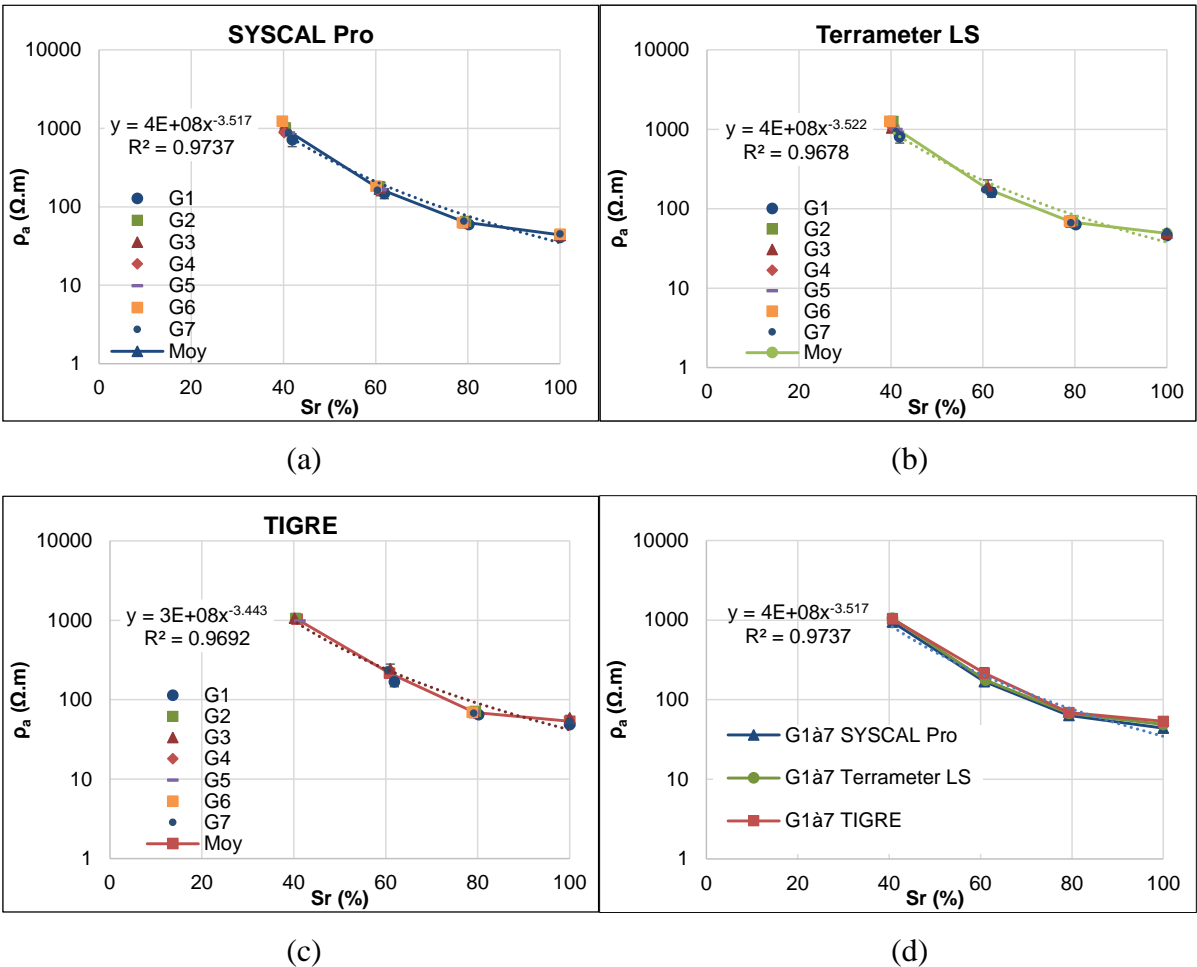


Figure 5-20 Courbe de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation pour le béton d'étude en utilisant différents résistivimètres : (a) SYSCAL Pro, (b) Terrameter LS, (c) TIGRE, (d) comparaison des moyennes sur toutes les gâchées pour les 3 appareils

Une régression par une loi en puissance est appliquée avec un coefficient de détermination supérieur à 0,96. La tendance en puissance ($\rho = AS_r^{-u}$) est conforme à la loi d'Archie (équation 3.3). Les valeurs de u obtenues qui sont autour de 3,5 pour le béton d'étude et

autour de 4,1 pour le béton de référence sont dans la gamme de valeurs obtenues par Fares (2015) qui sont entre 2,3 et 4,1.

Pour un béton saturé, les résistivités apparentes obtenues sont $43,1 \pm 2,9 \Omega.m$ (SYSCAL Pro), $48,8 \pm 2,2 \Omega.m$ (Terrameter LS) et $53,6 \pm 4,4 \Omega.m$ (TIGRE). Pour un béton relativement sec ($Sr = 40\%$), nous obtenons des résistivités aux alentours de $1000 \Omega.m$. Ainsi les résistivités obtenues sont conformes aux valeurs reportées dans la littérature (Polder et al., 2000) : la résistivité d'un béton avec du CEM I se situant entre $50 \Omega.m$ (environnement humide) et $1000-3000 \Omega.m$ (environnement sec). Pour des faibles degrés de saturation, les valeurs de résistivité deviennent fortes ce qui induit une résistance de contact des électrodes élevée, générant ainsi une variabilité plus forte des mesures. En outre, la connectivité de la phase liquide n'est plus assurée et la résistivité atteint des valeurs tellement élevées qu'il devient difficile de les mesurer.

La comparaison des courbes de calibration entre les 3 résistivimètres utilisés (Figure 5-20 (d)) montre des courbes relativement proches. Un écart relatif variant de 3,2 % à 10,4 % est obtenu entre les 3 appareils de mesure testés.

Pour le béton de référence (G8), les courbes de calibration résistivité–saturation, en utilisant les différents résistivimètres SYSCAL Pro, Terrameter LS et TIGRE, sont présentées dans la Figure 5-21 (a). Une comparaison des courbes de calibration entre le béton de référence et le béton d'étude est présentée dans la Figure 5-21 (b).

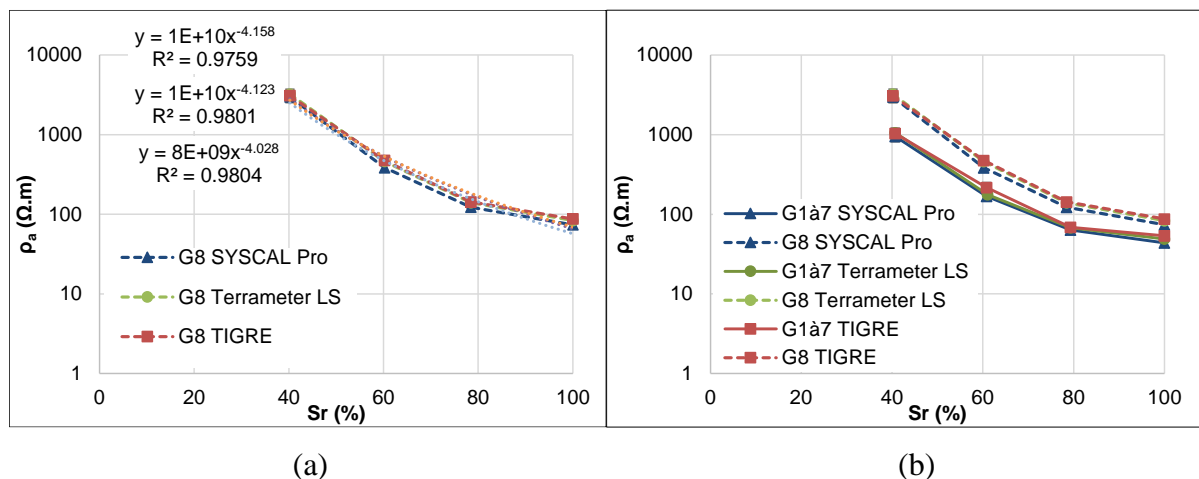


Figure 5-21 Courbe de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation en comparant les trois résistivimètres pour différents bétons : (a) béton de référence, (b) comparaison entre béton de référence et béton d'étude.

Dans l'intervalle des degrés de saturation mesurés, la comparaison des courbes de calibration montre que les valeurs de résistivité du béton de référence ayant un rapport E/C = 0,43 sont bien supérieures à celles du béton d'étude ayant un rapport E/C = 0,59. Un résultat similaire est trouvé par Fares (2015) et Lataste (2002) entre des bétons ayant des rapports E/C différents. Une résistivité plus grande est observée pour le béton avec le plus petit rapport E/C.

5.6.3 Calibration avec le dispositif Echelle

Les éprouvettes E1 à E5 sont conditionnées à différents degrés de saturation pour établir les nouvelles courbes de calibration avec le dispositif Echelle. Un calcul de la moyenne des résistivités en fonction de la profondeur (en enlevant les points aberrants observés) a été réalisé, afin d'attribuer à chaque éprouvette une valeur de résistivité pour une température et un degré de saturation fixés. Les essais ont été réalisés après homogénéisation à trois températures différentes : 20, 45 et 60 °C pour appréhender également l'effet de la température sur la courbe de calibration. Les essais à $S_r = 60\%$ et $S_r = 40\%$ ont été réalisés par Elie Mahfoud, dans le cadre de son stage de master M2 à l'INSA – Toulouse, que j'ai co-encadré (Mahfoud, 2019).

Après avoir calculé les vrais taux de saturation des éprouvettes E1 et E4 par pesée, nous avons remarqué un décalage des valeurs de S_r par rapport aux valeurs visées : $72,2 \pm 1\%$ à la place de 80%, $53,3 \pm 0,3\%$ à la place de 60% et $33,8 \pm 0,5\%$ à la place de 40%. Cet écart peut être dû à une surestimation du degré de saturation à l'état initial, les éprouvettes n'étant pas saturées sous vide, nous avons estimé que $S_r = 100\%$.

La Figure 5-22 représente un exemple des profils de la résistivité apparente en fonction de la profondeur avec le dispositif Echelle E1 à $T = 20\text{ °C}$ pour les configurations Trans et Wen. Les graphes sont présentés en deux parties (a) & (b) pour la configuration Trans et (c) & (d) pour la configuration Wen. Les graphes (b) et (d) présentent les profils de (a) et (c) sans les mesures à $S_r = 34\%$ afin de mieux observer les écarts.

Tableau 5-8 Coefficients des courbes de calibration de la résistivité moyenne en fonction du degré de saturation pour les configurations Trans et Wen à $T = 20\text{ °C}$

Configurations	$S_r = 100\%$	$S_r = 72\%$	$S_r = 53\%$	$S_r = 34\%$
ρ_a Trans [$\Omega.m$]	$14,4 \pm 4,4$	$41,7 \pm 7,6$	$170,9 \pm 19,5$	1900 ± 700
ρ_a Wen [$\Omega.m$]	$13,9 \pm 2,9$	$40,0 \pm 7,1$	$134,9 \pm 27,2$	1660 ± 750

Une moyenne en fonction de la profondeur est calculée pour chaque type de configuration. La valeur de la moyenne et de l'écart-type sont présentées dans le Tableau 5-8.

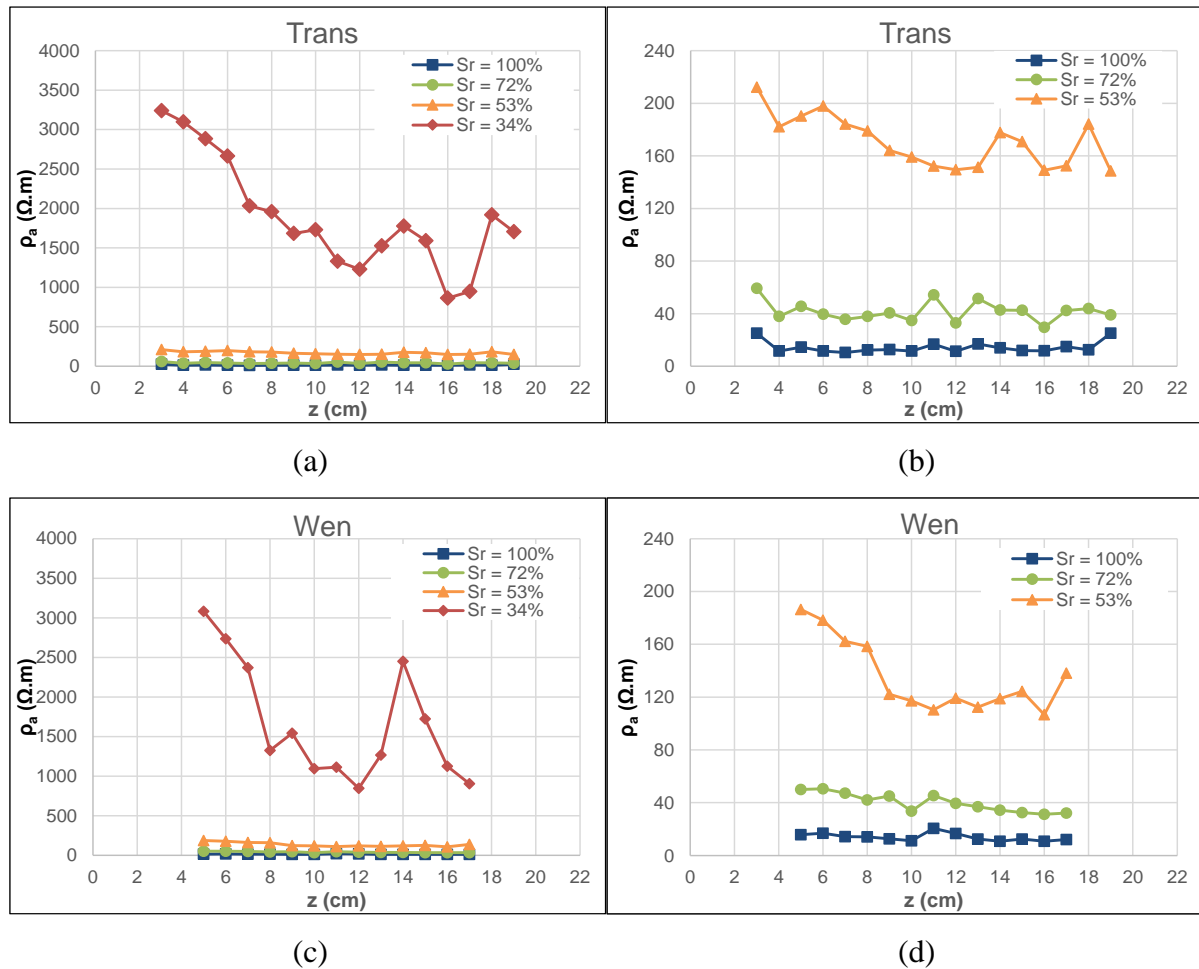


Figure 5-22 Profils de la résistivité apparente en fonction de la profondeur avec le dispositif Echelle E1 à $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les configurations : (a)(b) Trans, (c)(d) Wen.

Nous remarquons dans la Figure 5-22 et dans le Tableau 5-8 que l'éprouvette est moins homogène à $S_r = 34\%$, une grande variation de la résistivité apparente est observée en fonction de la profondeur (écart-type élevé). Cette variation peut être expliquée par la durée d'attente, trop courte pour que l'éprouvette soit homogénéisée, d'où la perspective d'augmenter le temps d'homogénéisation (de 1 à 2 mois). Par ailleurs, comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe 5.6.2, la connectivité de la phase liquide n'est plus assurée aux faibles degrés de saturation ce qui limite le passage du courant électrique

Un travail similaire est réalisé à différentes températures ($T = 20, 45$ et $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour toutes les configurations possibles avec le dispositif Echelle. La Figure 5-23 représente les courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation à différentes températures

présentées séparément pour chacune des configurations Trans, Wen, Q_I12, Q_Crois et Q_I13.

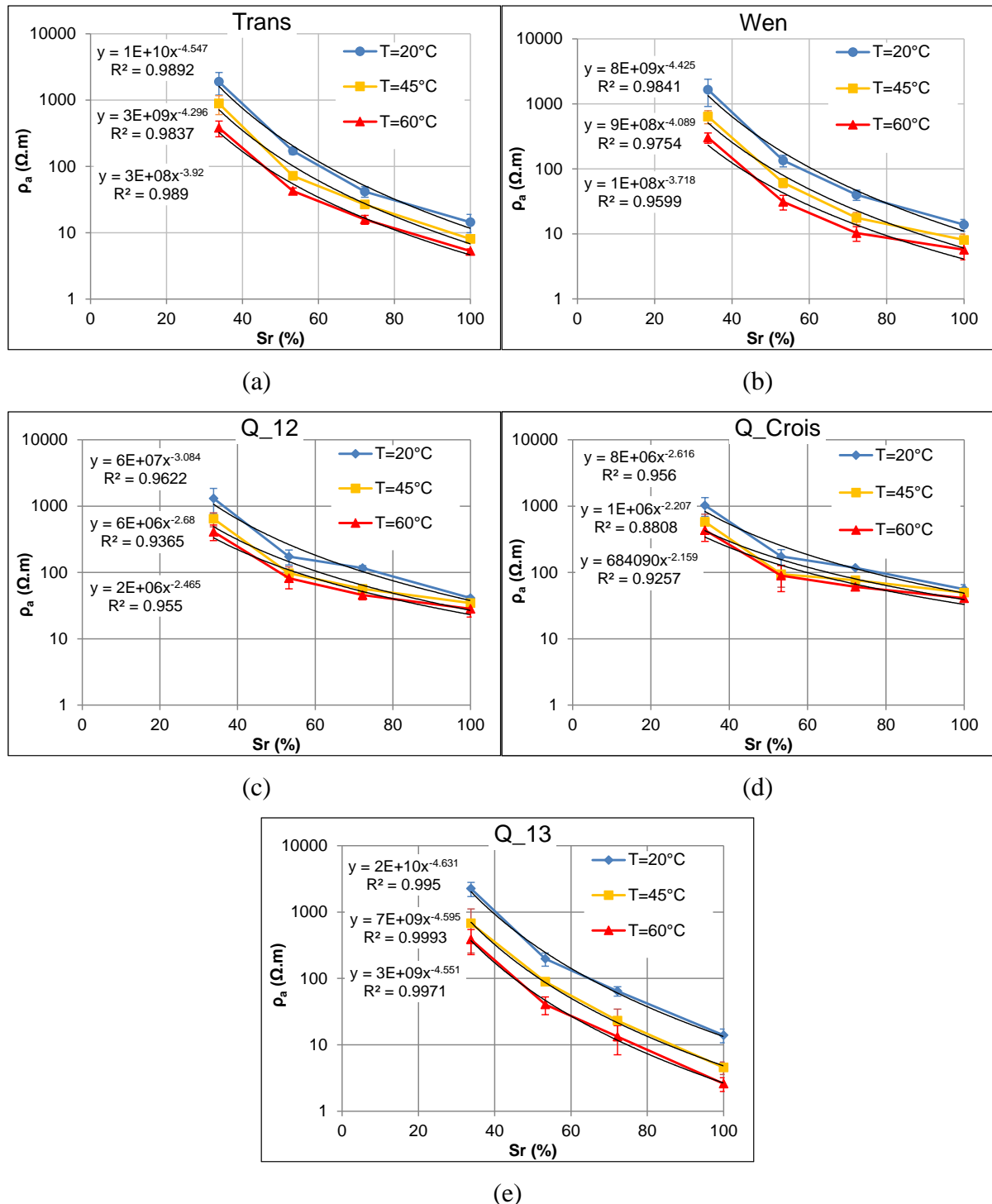


Figure 5-23 Courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle à différentes températures en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.

Les résultats de la Figure 5-23 montrent qu'une augmentation du degré de saturation cause une diminution de la résistivité, en particulier aux faibles degrés de saturation. Ce résultat est

conforme à de nombreux résultats publiés (Du Plooy, 2013; Fares, 2015; Hunkeler, 1996). Ainsi, nous remarquons que la résistivité électrique augmente de façon très significative lors du passage de $S_r = 53\%$ à 34% .

En outre, nous observons dans la Figure 5-23 qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de la résistivité électrique. En effet, l'étude de Lataste (2002) montre que les changements de température ont des effets importants sur la résistivité du béton et qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de la résistivité et inversement (pour une humidité relative constante). Ceci est dû à une plus grande mobilité des ions dans la solution des pores et à des changements dans les interactions ion-solide avec la pâte de ciment (Polder et al., 2000).

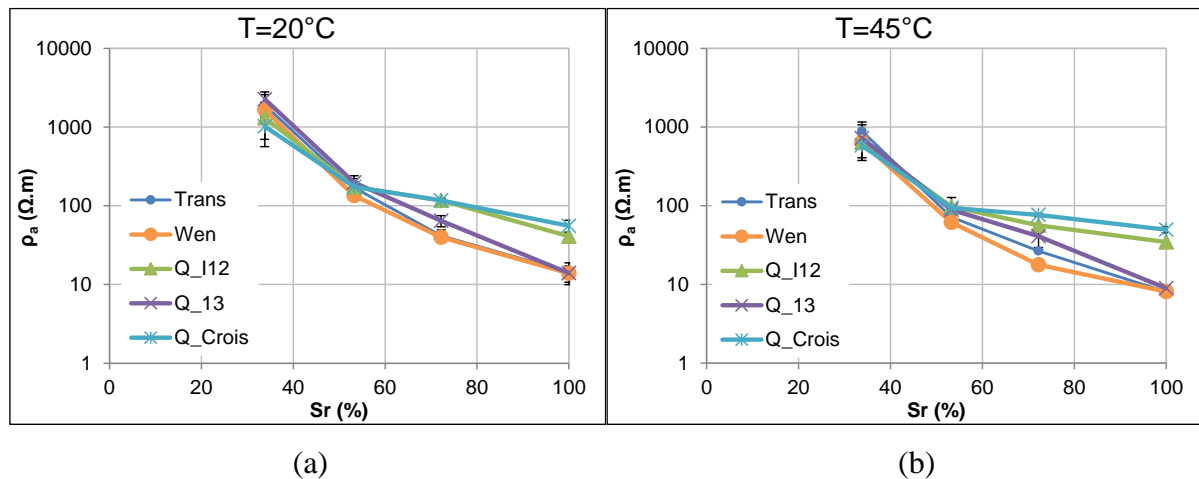


Figure 5-24 Courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle en comparant toutes les configurations : (a) $T = 20^\circ C$, (b) $T = 45^\circ C$.

La Figure 5-24 représente les courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle pour deux températures $T = 20^\circ C$ et $T = 45^\circ C$ (cas de notre étude), en comparant toutes les configurations.

Nous remarquons sur la Figure 5-24 qu'aux forts degrés de saturation, les configurations Trans, Wen et Q_I13 donnent des courbes de calibration proches. Cependant, les configurations Q_I12 et Q_Crois, semblables, donnent des valeurs de résistivité plus élevées que les autres configurations. En effet, en utilisant Q_I12 et Q_Crois, l'injection du courant peut être perturbée par la présence du circuit imprimé, ce qui pourrait expliquer le décalage de ces courbes de calibration par rapport à celles des autres configurations.

5.6.4 Comparaison des courbes de calibration

L'objectif de ce paragraphe est de comparer les courbes de calibration obtenues avec le dispositif Echelle avec celle obtenue en utilisant la cellule cylindrique de résistivité. Nous avons choisi de montrer les résultats de la cellule cylindrique pour l'appareil TIGRE.

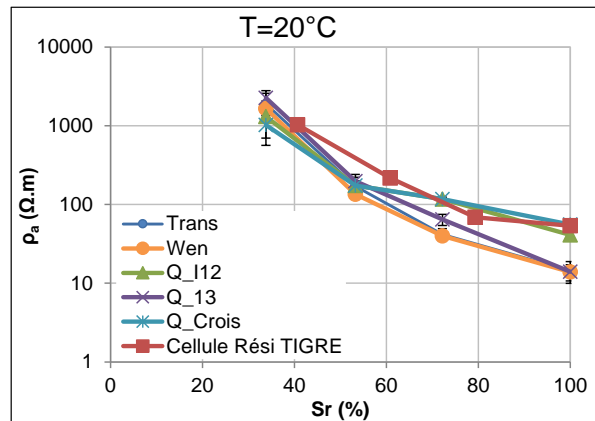


Figure 5-25 Courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle à 20 °C et la cellule cylindrique de résistivité

La Figure 5-25 représente les courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle à 20 °C et avec la cellule cylindrique de résistivité.

Afin de pouvoir comparer entre les différentes configurations, les valeurs des coefficients A et u pour chaque courbe de tendance obtenue (Figure 5-20 et Figure 5-23) sont présentées dans le Tableau 5-9.

Tableau 5-9 Coefficients des courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation pour différentes configurations

Configurations	T = 20 °C			T = 45 °C		
	A	u	R ²	A	u	R ²
Trans	2E+10	4,59	0,98	3E+09	4,29	0,98
Wen	2E+09	4,12	0,99	9E+08	4,08	0,97
Q_I12	5E+07	3,04	0,96	5E+06	2,56	0,97
Q_I13	2E+10	4,63	0,99	9E+09	4,64	0,99
Q_Crois	8E+06	2,57	0,97	1E+06	2,22	0,98
Cellule Rési TIGRE	3E+08	3,44	0,96			

Les résultats de la Figure 5-25 et du Tableau 5-9 montrent une différence significative entre les courbes de calibration utilisant le dispositif Echelle et celle utilisant la cellule cylindrique de résistivité. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les éprouvettes E1 à E5 sont coulées, non carottées, et l'effet de la ségrégation peut donc être plus important. De plus, avec le dispositif Echelle, le volume du béton est plus grand et donc l'homogénéisation est plus

difficile à établir sur la hauteur de l'éprouvette. Nous estimons aussi que les volumes investigués sont différents entre la cellule cylindrique de résistivité et le dispositif Echelle à cause de la dimension et de la forme des électrodes dans chacune.

Par conséquent, à cause de la différence significative des mesures et n'ayant pas la calibration des mesures avec la cellule cylindrique de résistivité à 45 °C, nous utiliserons dans la suite de notre travail les courbes de calibration avec le dispositif Echelle, pour chaque type de configuration, indépendamment.

5.7 Calibration de la permittivité

Tableau 5-10 Répartition des éprouvettes de calibration de permittivité

Eprouvettes		Sr (%)	100	80	60	40	5
Béton d'étude	G1H		x				
	G1M		x	x	x	x	x
	G2M		x	x	x	x	
	G2B		x	x	x	x	x
	G3M		x	x	x	x	
	G3B						
	G4M		x	x	x	x	x
	G5M		x	x	x	x	x
	G5H		x	x	x	x	
	G6M		x	x	x	x	x
	G7H		x	x	x	x	x
	G7M						
Béton de référence	G7B		x	x	x	x	x
	G8A1		x	x	x	x	x
	G8B1		x	x	x	x	x
	G8C1		x	x	x	x	x
	G8A2						
	G8B2		x	x	x	x	x
	G8C2		x	x	x	x	x

Parallèlement à la calibration de la résistivité, la relation entre la permittivité diélectrique et le degré de saturation est établie grâce à une série de mesures effectuées sur les mêmes carottes (Tableau 5-10), aux mêmes échéances, avec la cellule coaxiale cylindrique (paragraphe 3.3.4) (Adous et al., 2006). La cellule permet d'obtenir les courbes de dispersion c'est-à-dire la variation de la permittivité réelle et imaginaire en fonction de la fréquence dans la bande 50 à 600 MHz. Les mesures sont effectuées dans les deux sens de l'éprouvette ; une moyenne est ensuite déterminée. Ensuite, un algorithme basé sur le modèle de Jonscher (Ihamouten et al.,

2011) permet d'extrapoler les résultats aux basses fréquences pour déduire la constante diélectrique ϵ' à 33 MHz pour les mesures capacitives (Fares et al., 2015; Villain et al., 2015) et 950 MHz pour les mesures radar ou TDR.

Les courbes de calibration de la permittivité en fonction du degré de saturation pour les bétons de référence et d'étude sont présentées dans les Figures 5-26 (33 MHz) et 5-27 (950 MHz).

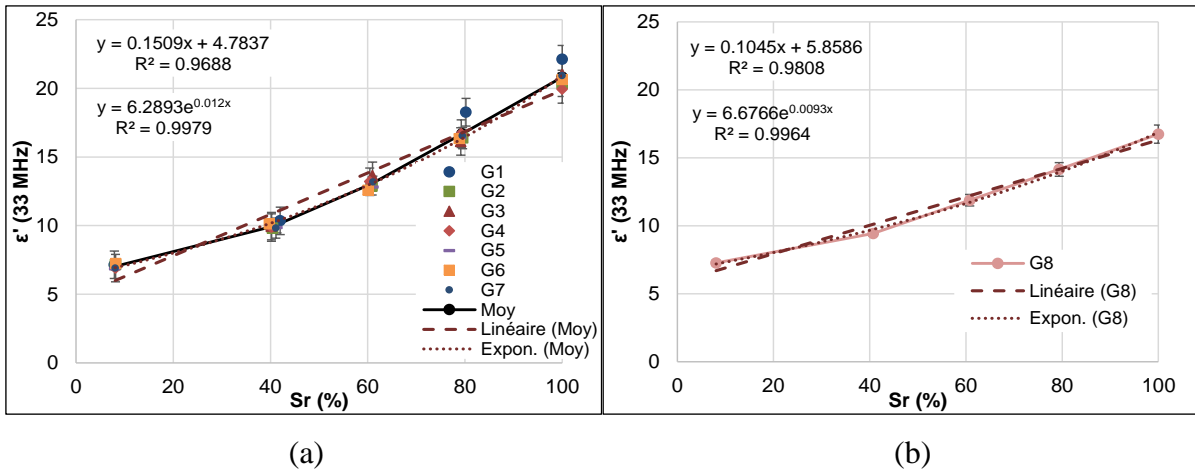


Figure 5-26 Courbes de calibration de la permittivité (33 MHz) en fonction du degré de saturation pour différents bétons : (a) béton d'étude, (b) béton de référence.

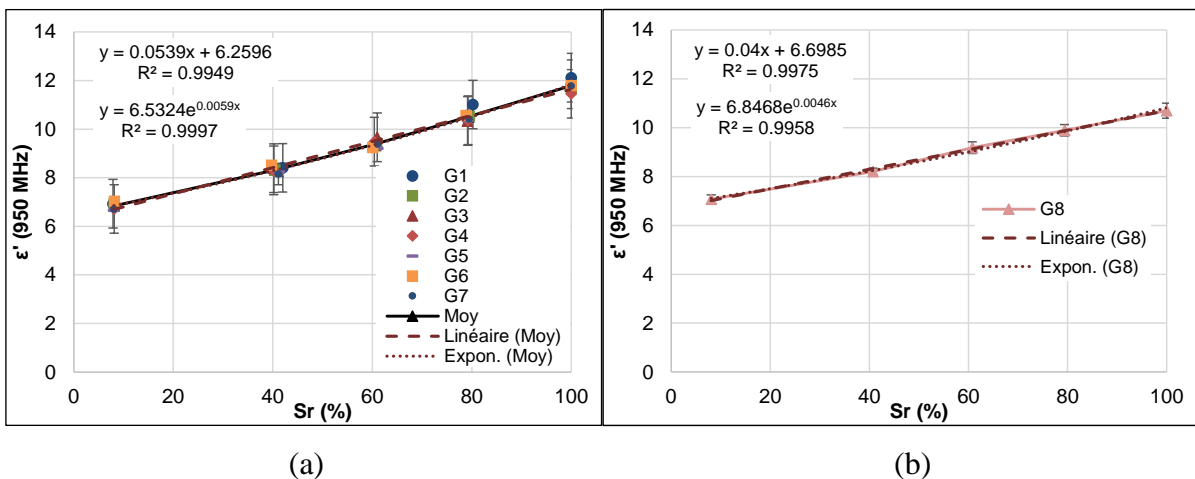


Figure 5-27 Courbes de calibration de la permittivité (950 MHz) en fonction du degré de saturation pour différents bétons : (a) béton d'étude, (b) béton de référence.

La courbe de calibration de la permittivité en fonction du degré de saturation présente une tendance linéaire comme démontré dans les travaux précédents (Du Plooy, 2013; Fares, 2015; Ihamouten, 2011) ou exponentielle (Balayssac et al., 2012). Nous remarquons que la pente de la courbe de calibration augmente quand la porosité augmente car le volume d'eau est plus important pour un même degré de saturation, comme déjà souligné par Fares (2015). Ainsi la

la pente de la courbe correspondant au béton d'étude (G1 à G7) est plus élevée que celle correspondant au béton de référence (G8) pour les deux fréquences 33 et 950 MHz.

5.8 Isothermes de désorption

Nous nous intéressons particulièrement dans ce paragraphe aux isothermes de désorption d'eau afin de pouvoir calculer les degrés de saturation à partir des valeurs d'humidité relative déterminées par les capteurs noyés de type THR (Honeywell).

Rappelons que les essais sont réalisés à deux températures, 20 et 45 °C, pour étudier l'effet de la température sur l'isotherme.

Les isothermes sont réalisées dans plusieurs dessiccateurs de conservation (d'abord en salle climatisée à 20 °C puis dans une enceinte à 45 °C (Figure 5-28)). L'humidité relative au sein des dessiccateurs est réglée au moyen de solutions salines saturées disposées dans des coupelles et contrôlées régulièrement via un thermohygromètre relié à une sonde dont la plage de mesure s'étend de 0 à 100 % HR.

Le Tableau 5-11 donne les différentes humidités relatives (HR) auxquelles sont soumis les échantillons avec les différentes solutions salines correspondantes. Les valeurs d'HR mesurées dans les dessiccateurs au moyen de la sonde thermohygrométrique ne diffèrent en moyenne que de 1,8% par rapport aux valeurs visées. Un petit ventilateur fonctionnant en permanence assure une homogénéisation de l'hygrométrie au sein de chaque dessiccateur. Les échéances de pesée des échantillons sont de 24 h, 2 jours, 3 jours, 7 jours puis toutes les semaines jusqu'à stabilisation de la masse. On suppose que l'équilibre est atteint lorsque la variation relative de la masse du matériau entre deux pesées successives espacées d'une semaine est inférieure à 0,05%. On considère à chaque fois une moyenne sur 4 échantillons par gâchée (G1 à G7) pour une bonne représentativité des mesures. Comme l'équilibre à chaque palier d'humidité est long à atteindre, les échantillons choisis sont des quarts de disque (ϕ 11 cm) d'1 cm d'épaisseur (Figure 5-29). Les essais sont réalisés sur une période moyenne supérieure à 18 mois.



Figure 5-28 Vue d'un dessiccateur dans une enceinte à 45°C



Figure 5-29 Vue de quelques échantillons utilisées dans les isothermes de désorption

Tableau 5-11 Humidités relatives auxquelles sont soumis les échantillons (NFX 15.015).

Solutions salines utilisées	Acétate de potassium	Chlorure de magnésium	Carbonate de potassium	Nitrate d'ammonium	Nitrite de sodium	Chlorure de sodium	Chlorure de potassium	Sulfate de potassium
HR (%) (T = 20 °C)	22		44	65		76	86	97
HR (%) (T = 45 °C)	24	32	41	49	60	76	82	96

Six humidités relatives sont considérées à T = 20 °C. La valeur basse est limitée à 22% car il est rare d'avoir des conditions de conservation du béton au-dessous de cette valeur. Les essais commencent par la désorption à 97% HR puis à 86% HR et à 76% HR. En parallèle, sur d'autres échantillons, la désorption a lieu à 65% HR, 44% HR et 22% HR. A 45 °C, les solutions salines donnent des humidités relatives différentes (Tableau 5-11). La solution de

carbonate de potassium donne des résultats variables à 45 °C avec un écart-type élevé. La solution est donc remplacée par une autre solution de chlorure de magnésium ($MgCl_2, 6H_2O$) avec $HR = 32\%$. Une solution de nitrite de sodium ($NaNO_2$) avec $HR = 60\%$ est également ajoutée pour augmenter le nombre de mesures dans la courbe isotherme à $T = 45\text{ °C}$ (NFX 15.015).

Les isothermes de désorption à 20 °C pour les gâchées G1 à G7 du béton d'étude sont présentées dans la Figure 5-30 (a). Une moyenne des 7 gâchées est présentée dans la Figure 5-30 (b) à $T = 20\text{ °C}$ et $T = 45\text{ °C}$.

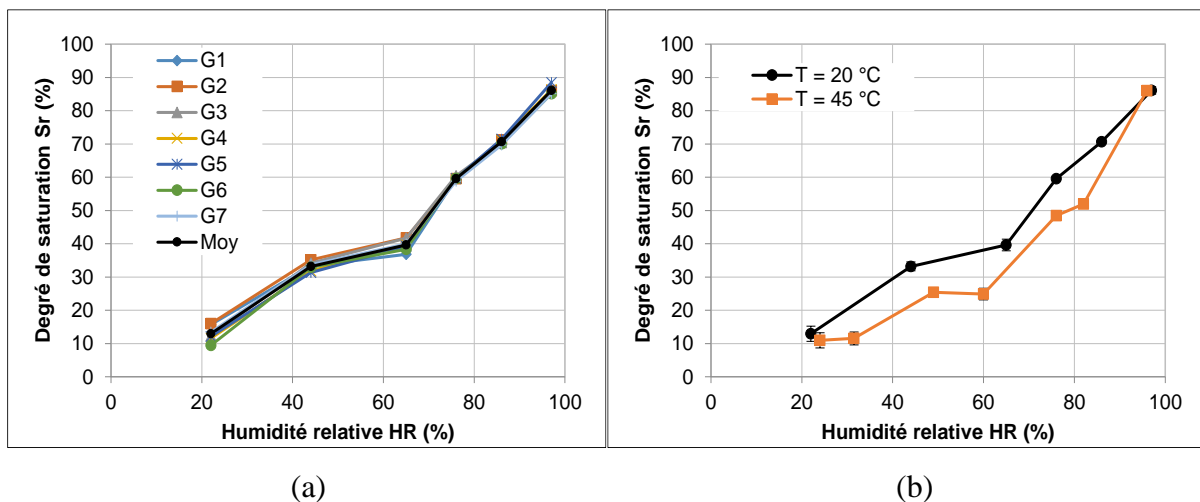


Figure 5-30 Courbes isothermes de désorption : (a) gâchées G1 à G7 à $T = 20\text{ °C}$, (b) moyenne des gâchées à $T = 20\text{ °C}$ et $T = 45\text{ °C}$.

La Figure 5-30 (a) montre que les sept gâchées sont assez reproductibles. Nous obtenons un écart relatif variant de 0,8 à 4,4 % en moyenne pour HR variant de 44 à 97 %. Un écart plus élevé (17,7 %) est obtenu pour $HR = 22\%$, la solution d'acétate de potassium n'étant probablement pas complètement en équilibre.

Les résultats de la Figure 5-30 (b) montrent que, pour une même humidité relative, l'augmentation de la température de 20 °C à 45 °C implique une diminution du degré de saturation, ce qui est semblable aux résultats obtenus par Brue (2009) qui étudie l'effet thermique sur les transferts hydriques et explique la diminution du degré de saturation par :

- la diminution du rayon des pores vidangés à une valeur de HR (%) donnée,
- l'augmentation de la perméation liquide dans le cas des fortes HR (%) due à la diminution de la viscosité de l'eau tout en augmentant la température,
- l'augmentation des transports gazeux avec la température dans le cas des HR (%) intermédiaires,

- l'agitation thermique des molécules de fluides qui augmente avec la température et entraîne une augmentation des coefficients de diffusion.

Un modèle de Van Genuchten (Thiery, 2005; Van Genuchten, 1980) permet de modéliser numériquement les courbes isothermes de désorption (Figure 5-31).

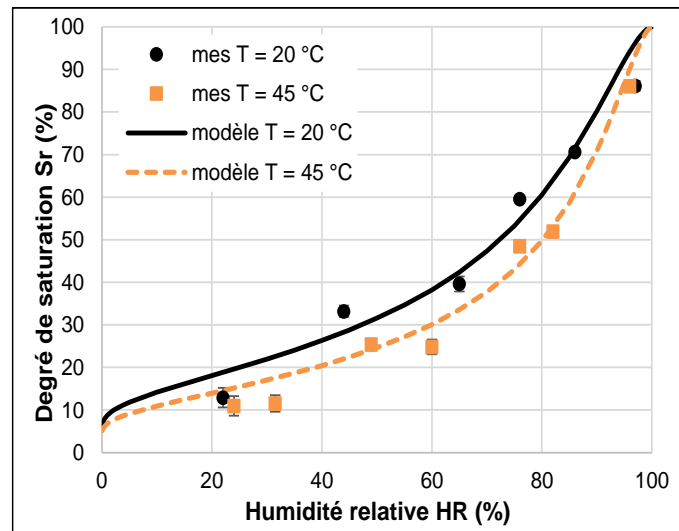


Figure 5-31 Courbes expérimentales et numériques des isothermes de désorption à $T = 20$ °C et $T = 45$ °C.

Ces courbes isothermes de désorption permettront de transformer en degré de saturation l'humidité relative mesurée par les sondes thermo-hygrométriques THR noyées dans les dalles.

5.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude pour obtenir des profils de degré de saturation en fonction de la profondeur, à partir des mesures de résistivité obtenues par les dispositifs conçus sur la base de CI. La procédure proposée implique l'utilisation des courbes de calibration reliant la résistivité à la teneur en eau.

Ainsi, au début du chapitre, nous avons présenté le programme expérimental (caractéristiques des bétons testés, instrumentation des dalles, résistivimètres...) mené dans cette thèse. Ensuite, nous avons présenté les courbes de calibration effectuées avec la cellule cylindrique de résistivité et avec le dispositif Echelle pour des éprouvettes conditionnées à différents degrés de saturation. Une comparaison des deux méthodes de calibration conduit à choisir celle utilisant le dispositif Echelle avec différentes configurations de mesure à 20 °C et à

45 °C. Par ailleurs, nous avons présenté les courbes de calibration de la permittivité ainsi que les courbes isothermes de désorption qui permettront de transformer l'humidité relative HR en degré de saturation.

Dans le chapitre 6, les profils de résistivités apparentes obtenus au cours des essais de séchage ainsi que les profils du degré de saturation en fonction de la profondeur seront présentés.

Chapitre 6 Suivi du séchage par des profils de degré de saturation obtenus par les dispositifs noyés

Ce chapitre présente tout d'abord les profils de résistivité apparente mesurés par les dispositifs conçus, Echelle et Anneau, dans les éprouvettes cylindriques lors du séchage du béton. Nous caractérisons ensuite les dispositifs dans les deux dalles en béton armé avec des barres en acier ou en fibre de verre (HA et FV) avant de présenter les profils de résistivité apparente correspondants, en cure et pendant le séchage des dalles. Enfin, les profils de degré de saturation sont obtenus en utilisant les courbes de calibration reliant la résistivité à la teneur en eau établies précédemment dans le chapitre 5. Ces profils sont comparés à des profils obtenus par des méthodes de référence (capteurs thermohygro-métriques THR et gammadensimétrie).

6.1 Profils de résistivité apparente dans les éprouvettes cylindriques

Nous présentons dans ce paragraphe les profils de résistivité apparente obtenus avec les dispositifs Echelle noyés dans les éprouvettes cylindriques E6 et E7 et les dispositifs Anneau noyés dans les éprouvettes cylindriques An1 et An2 présentés au paragraphe 4.3.6.

A l'état saturé, au temps initial t_0 , la résistivité apparente mesurée dans les éprouvettes E6 et E7 est en moyenne de $9,6 \pm 0,6 \Omega.m$ en configuration Transmission et de $14,9 \pm 3,3 \Omega.m$ en configuration Wenner. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans les éprouvettes E1 à E5 présentés au paragraphe 4.3.6, à savoir $11,9 \pm 0,8 \Omega.m$ en configuration Transmission et $11,9 \pm 0,5 \Omega.m$ en configuration Wenner.

Afin d'étudier la sensibilité du dispositif Echelle au séchage, les variations temporelles des profils de résistivité apparente dans l'éprouvette E6 sont illustrées dans la Figure 6-1 pour la configuration Transmission et dans la Figure 6-2 pour la configuration Wenner. L'échéance t_0 correspond au début du séchage du béton à 20 °C alors que t'_0 marque le début du séchage du béton à 45 °C. A noter que les résultats obtenus dans l'éprouvette E7 sont similaires. Nous avons étudié l'évolution de la résistivité durant 28 jours de séchage à 20 °C et 134 jours de séchage à 45 °C pour accélérer l'établissement du gradient. Rappelons que les éprouvettes

cylindriques sont recouvertes de 2 couches d'aluminium adhésif sur le pourtour et sur le fond, assurant ainsi un séchage unidirectionnel par la face supérieure en $z = 0$.

De fortes variations de la résistivité apparente sont observées entre $z = 10$ cm et $z = 12$ cm en configuration Wenner et d'une façon moins prononcée en configuration Transmission. On attribue ces variations à un biais de la mesure à ces profondeurs, potentiellement causé par une anomalie de contact entre le béton et le matériau, par exemple liée à une hétérogénéité locale du matériau (présence d'un granulat, d'une bulle d'air...). Nous observons aussi une différence d'amplitude des résistivités apparentes entre les deux configurations, Transmission et Wenner, pouvant remettre en question la profondeur à laquelle chaque résistivité apparente est affectée. Cette différence peut être liée à l'effet de la variabilité 3D (x,y,z) du milieu sur le calcul des sensibilités des configurations (Figure 4-24).

Par ailleurs, la résistivité apparente mesurée montre globalement une augmentation au fil du temps, ce qui est cohérent avec une diminution de la teneur en eau due au processus de séchage. Un profil de teneur en eau doit apparaître entre les deux extrémités du cylindre, généré par le séchage unidirectionnel du béton par une seule face. Nous vérifions bien dans les Figures 6-1 et 6-2 que l'augmentation de la résistivité apparente près de la surface en contact avec l'air ($z = 0$ cm) est supérieure à celle à cœur, surtout pendant le séchage accéléré à 45 °C. Des tendances similaires ont été observées dans des études antérieures concernant la détermination du gradient de teneur en eau, telles que (Balayssac et al., 2015; Fares et al., 2015; Villain et al., 2015).

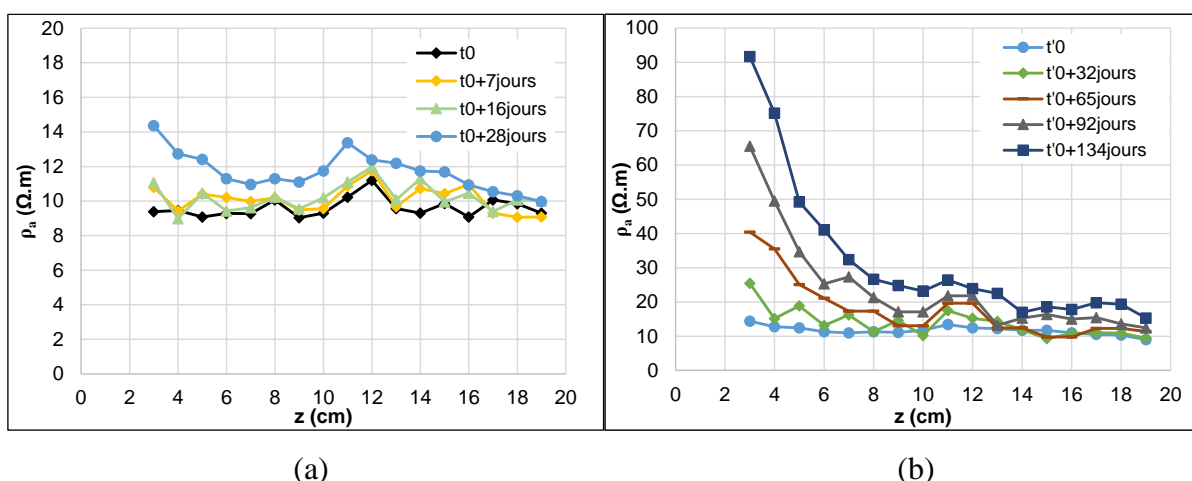
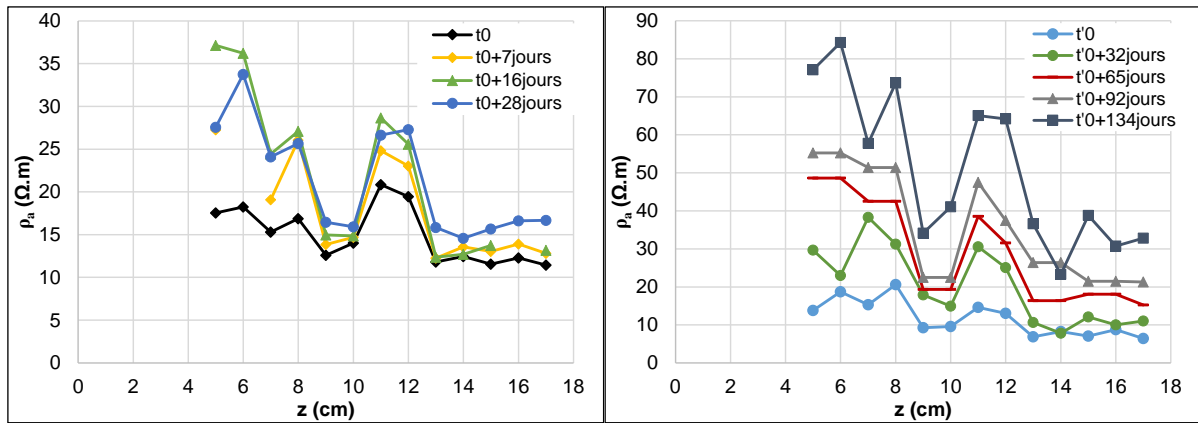


Figure 6-1 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur en utilisant la configuration Transmission au cours du séchage de l'éprouvette E6 : (a) à 20 °C, (b) à 45 °C.



(a)

(b)

Figure 6-2 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur en utilisant la configuration Wenner au cours du séchage de l'éprouvette E6 : (a) à 20 ° C, (b) à 45 ° C.

Pour le dispositif Anneau, la variation du profil de résistivité apparente en fonction du temps est représentée dans la Figure 6-3, où t0 marque le début du séchage à 20 °C. Nous avons étudié l'évolution de la résistivité durant 186 jours de séchage à 20 °C. Le dispositif Anneau, dans l'éprouvette An1, n'a pas été testé avec un séchage accéléré à 45 °C.

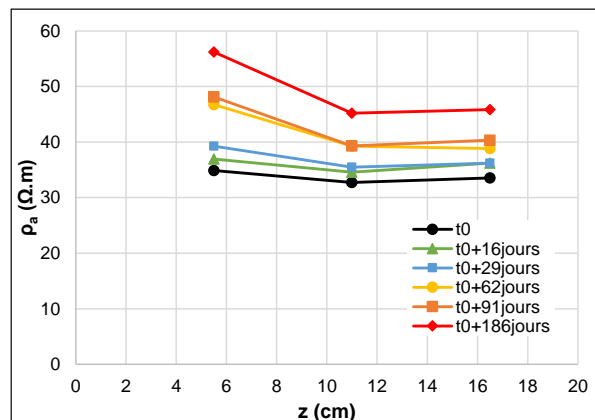


Figure 6-3 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur en utilisant le dispositif Anneau au cours du séchage de l'éprouvette An1 à 20 ° C.

La Figure 6-3 montre une augmentation des valeurs de résistivités apparentes au cours du temps lors du séchage, en particulier pour l'anneau situé à 5,5 cm de profondeur et celui le plus proche de la surface en contact avec l'air. A t0+186 jours, le coefficient de variation des valeurs de résistivités apparentes obtenues avec les configurations Wec_a2, Q_I12, Q_I16 et Q_carre pour chaque profondeur est compris entre 1,4 à 1,7%, ce qui est conforme aux attentes.

Nous avons ainsi démontré dans ce paragraphe la capacité des dispositifs Echelle et Anneau à suivre l'évolution du profil de résistivité durant le séchage du béton. Dans le paragraphe

suisant, nous augmentons la taille des corps d'épreuve pour nous approcher des structures réelles et nous caractérisons les dispositifs dans les dalles en béton armé HA et FV.

6.2 Caractérisation des systèmes de mesure dans les dalles en béton armé

Cette partie de notre travail étudie la caractérisation des dispositifs Echelle et Anneau dans les deux dalles en béton armé par des aciers haute adhérence (HA) ou par des barres en fibre de verre (FV). Nous vérifions tout d'abord la répétabilité et la reproductibilité des mesures réalisées avec chaque dispositif, puis nous montrons l'influence des armatures (acier et fibre de verre) en comparant la réponse des dispositifs dans les deux dalles. Une comparaison des différentes configurations du dispositif Echelle est également présentée suivie d'une comparaison des mesures effectuées avec différents résistivimètres à une même échéance.

6.2.1 Répétabilité et reproductibilité des mesures avec le dispositif Echelle

Avant de présenter les résultats des mesures de résistivité électrique, une étude de répétabilité et de reproductibilité des mesures est réalisée avec les dispositifs Echelle dans les dalles HA et FV afin de vérifier la qualité de la mesure des dispositifs et des appareils de mesure.

6.2.1.1 Répétabilité du dispositif Echelle

Tableau 6-1 Résistivités apparentes mesurées à l'état saturé t_0 avec les dispositifs Echelle pour toutes les configurations dans les dalles HA et FV.

ρ_a [$\Omega.m$]	FV_Ed	FV_Eg	HA_Ed	HA_Eg
Trans CV rép. %	15,5 ± 1,5 9,6 %	9,5 ± 0,9 9,4 %	9,1 ± 0,3 3,3 %	17,7 ± 0,9 5,1 %
Wen CV rép. %	13,5 ± 0,1 0,7 %	13,8 ± 0,1 0,7 %	16,3 ± 0,1 0,6 %	16,1 ± 0,2 1,2 %
Q_I12 CV rép. %	63,8 ± 0,9 1,4 %	42,2 ± 0,9 2,1 %	55,8 ± 0,9 1,6 %	63,7 ± 0,3 0,5 %
Q_I13 CV rép. %	21,7 ± 0,1 0,5 %	20,9 ± 0,2 0,9 %	21,7 ± 0,3 1,4 %	21,2 ± 0,3 1,4 %
Q_Crois CV rép. %	62,3 ± 0,2 0,3 %	41,2 ± 0,2 0,5 %	-	-

Tableau 6-2 Résistivités électriques apparentes mesurées à un état non saturé avec les dispositifs Echelle pour toutes les configurations dans les dalles HA et FV.

ρ_a [Ω .m]	t'0+268jours		t'0+62jours	
	FV_Ed	FV_Eg	HA_Ed	HA_Eg
Trans CV rép. %	71,9 ± 3,2 4,5 %	69,9 ± 4,1 5,9 %	24,1 ± 1,1 4,6 %	8,7 ± 0,8 9,2 %
Wen CV rép. %	103,5 ± 0,6 0,6 %	82,7 ± 0,8 1,0 %	12,6 ± 0,2 1,6 %	19,9 ± 0,2 1,0 %
Q_I12 CV rép. %	156,1 ± 0,9 0,6 %	161,6 ± 1,2 0,7 %	43,3 ± 0,9 2,1 %	37,1 ± 0,5 1,3 %
Q_I13 CV rép. %	43,5 ± 0,5 1,1 %	54,5 ± 0,7 1,2 %	23,5 ± 0,5 2,1 %	23,7 ± 0,3 1,3 %
Q_Crois CV rép. %	232,1 ± 1,2 0,5 %	169,9 ± 1,1 0,6 %	56,6 ± 0,3 0,5 %	52,1 ± 0,4 0,8 %

L'évaluation de la répétabilité de la mesure de résistivité apparente est obtenue en réalisant trois mesures, dans des conditions saturées (Tableau 6-1) et non saturées (Tableau 6-2), à une même échéance pour une configuration d'électrodes choisie au milieu de la dalle ($z = 15 \pm 0,5$ cm), suivant l'orientation du dispositif et la position associée à chaque configuration. Les 3 mesures sont espacées de 5 minutes pour éviter une éventuelle polarisation des électrodes. Nous rappelons que les notations Ed et Eg désignent les dispositifs placés respectivement à droite et à gauche par rapport à la surface de la dalle exposée au séchage.

A l'état saturé, le CV de répétabilité varie entre 3,3% et 9,6% pour la configuration Transmission et entre 0,3% et 2,1% pour les autres configurations. A l'état non saturé, le CV de répétabilité varie entre 4,5% et 9,2% pour la configuration Transmission et entre 0,5% et 2,1% pour les autres configurations. Nous remarquons que le CV de répétabilité est systématiquement plus grand en configuration Transmission. Nous rappelons qu'avec cette configuration, le courant est injecté par les grilles métalliques et la différence de potentiel est mesurée entre deux électrodes consécutives du CI. Il existe donc une différence entre les électrodes d'injection et les électrodes de mesure concernant leur taille et la nature du matériau qui les constitue. Ceci peut justifier une plus mauvaise répétabilité par rapport aux autres configurations dont les électrodes d'injection et de mesure sont identiques. Nous avons aussi vérifié que ces CV n'augmentent pas avec le séchage du béton ce qui est rassurant pour notre application.

6.2.1.2 Comparaison entre profils mesurés côté droit et côté gauche du dispositif Echelle

Nous avons expliqué dans les Figures 5-14 (a) et 5-14 (b) la façon d'interroger les électrodes, à droite ou à gauche de l'axe du CI, en configurations Transmission et Wenner respectivement. Dans ce paragraphe, notre objectif est d'évaluer la symétrie des réponses du dispositif (côtés droit/gauche) en comparant les configurations Trans_d et Trans_g, puis Wen_d et Wen_g. Nous présentons les résultats obtenus dans la dalle FV où le séchage est avancé pour montrer les états extrêmes (saturé et non saturé), sachant que des comportements similaires sont observés dans la dalle HA. La Figure 6-4 montre les profils mesurés avec les deux dispositifs Echelle en utilisant la configuration Transmission. L'échéance de mesure choisie à l'état non saturé est la dernière réalisée dans le cadre de cette thèse pour la dalle FV, c'est-à-dire t_0+372 jours. Nous remarquons que les écarts entre les profils de résistivité à droite et à gauche de chaque circuit imprimé sont raisonnablement faibles à toutes les profondeurs. Seul un écart important est observé avec le dispositif FV_Ed pour $z > 24$ cm que nous expliquons par la proximité de la dernière électrode avec la grille d'injection du courant (décalage de la position du dispositif au moment du coulage) perturbant ainsi la mesure de résistivité électrique, surtout en configuration Trans.

Les écarts observés entre les mesures de droite et celles de gauche (pour chaque CI) peuvent être expliqués par l'hétérogénéité du matériau. En effet, comme indiqué par la Figure 4-24, une mesure en configuration Trans est essentiellement sensible à un volume de matériau restreint entre (et autour) des deux électrodes de mesure de potentiel. Ce volume est inférieur au volume élémentaire représentatif (VER) d'une mesure électrique sur béton, les dimensions du VER devant être au moins égales à trois fois la taille maximale des granulats (Du Plooy et al., 2013), c'est-à-dire ici $3D_{max} = 36$ mm. A l'échelle de ces mesures très locales, le matériau ne peut être considéré comme homogène. On s'attend donc à ce que les mesures soient sensibles à la variabilité naturelle du matériau, et notamment à la distribution des granulats au voisinage immédiat des électrodes.

En revanche, d'un point de vue des tendances globales, nous suivons la même évolution de l'état hydrique entre t_0 et t_0+372 jours (Figure 6-4 (b)) à gauche et à droite de chacun des dispositifs, ce qui est prometteur pour notre application.

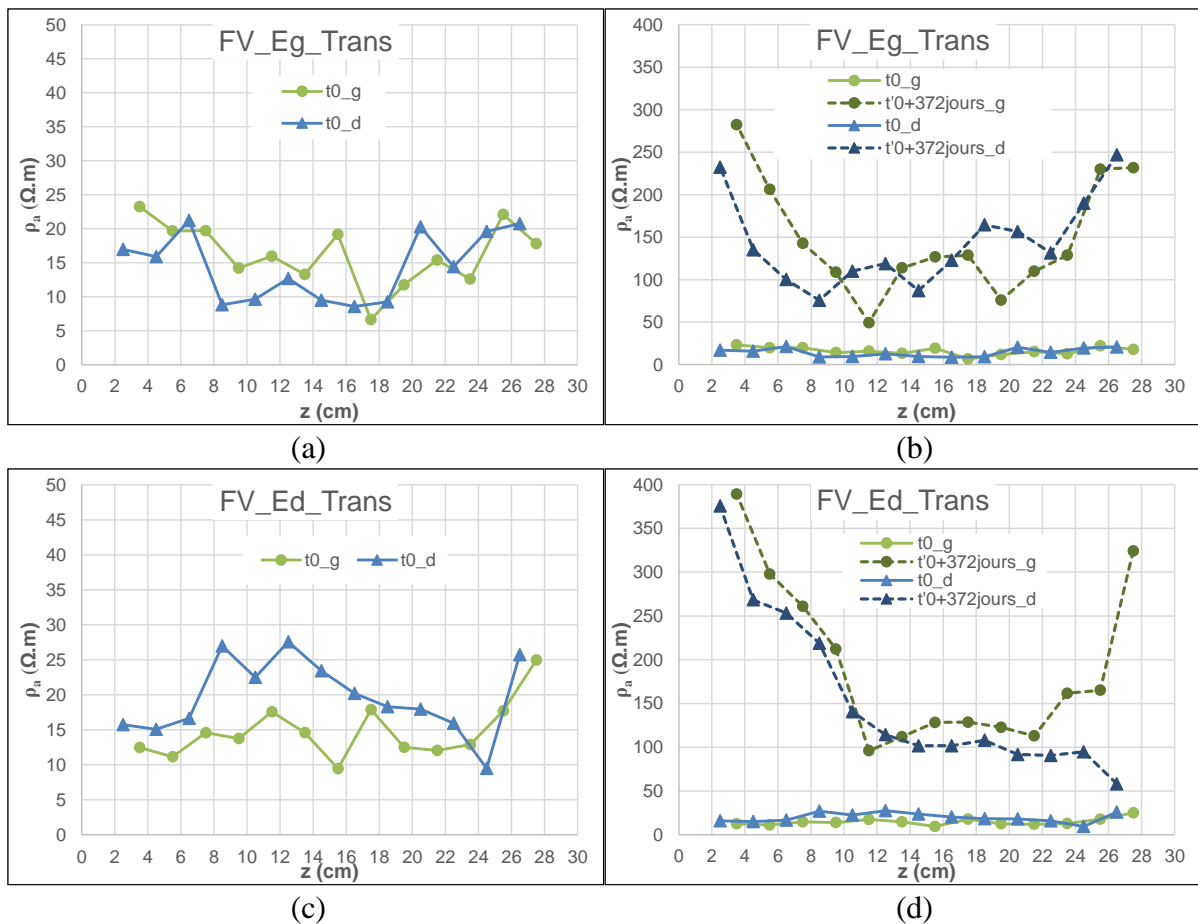
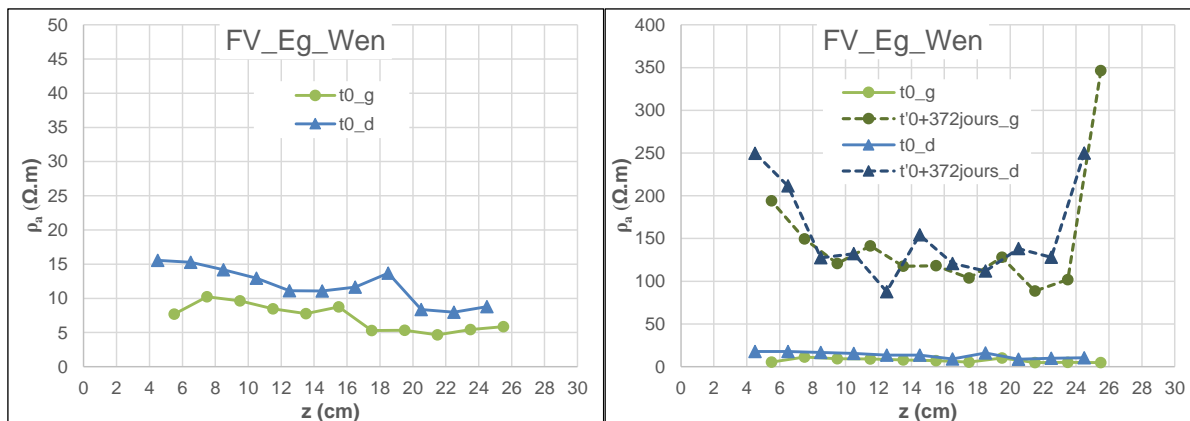


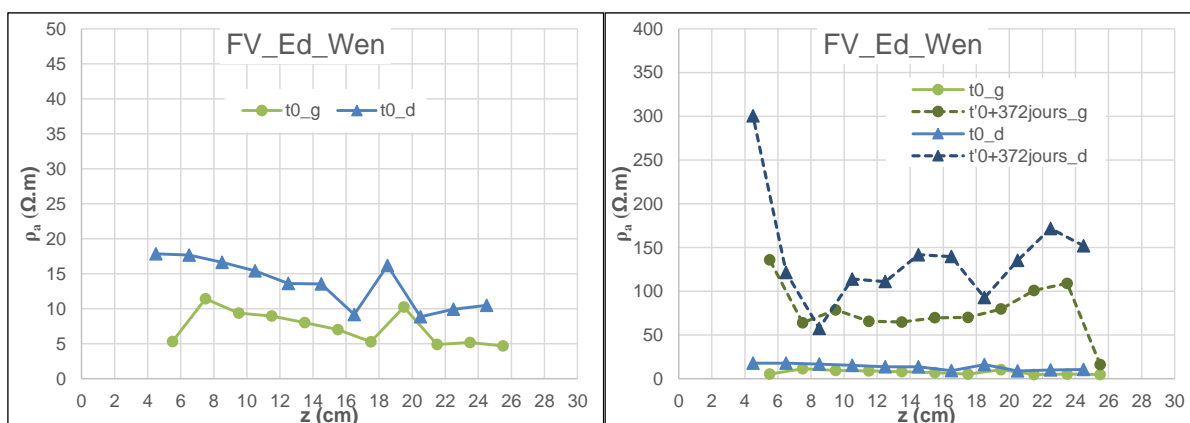
Figure 6-4 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec le dispositif Echelle en utilisant la configuration Transmission (droite et gauche du dispositif) : (a) Etat saturé, côté gauche de FV, (b) Etat non saturé, côté gauche de FV, (c) Etat saturé, côté droit de FV, (d) Etat non saturé, côté droit de FV.

De la même manière, nous comparons dans la Figure 6-5 les profils mesurés par le dispositif Echelle aux états saturé et non saturé en utilisant la configuration Wenner pour la dalle FV. Les mêmes remarques peuvent être faites en configuration Wenner. Globalement, la même évolution de l'état hydrique est observée à gauche et à droite du dispositif et ce, aussi bien pour la dalle HA que pour la dalle FV.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure 6-5 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec le dispositif Echelle en utilisant la configuration Wenner (droite et gauche du dispositif) à différents degrés de saturation : (a) Etat saturé, côté gauche de FV, (b) Etat non saturé, côté gauche de FV, (c) Etat saturé, côté droit de FV, (d) Etat non saturé, côté droit de FV.

6.2.1.3 Reproductibilité entre les dispositifs Echelle côté droit et côté gauche de chaque dalle

Il s'agit d'analyser la différence de réponse entre les dispositifs Echelle situés à droite et à gauche de chacune des dalles (respectivement notés Eg et Ed et indiqués sur la Figure 5-11 au chapitre précédent). La mesure est reproductible entre les dispositifs Echelle côté droit et côté gauche de chaque dalle si les variations sont identiques. La reproductibilité est associée ici à la fois au changement de dispositif et à la variabilité du matériau béton. Les Figures 6-6 et 6-7 montrent les résultats sur la dalle FV aux états saturé et non saturé en utilisant les configurations Transmission et Wenner respectivement. Des comportements similaires sont observés dans la dalle HA.

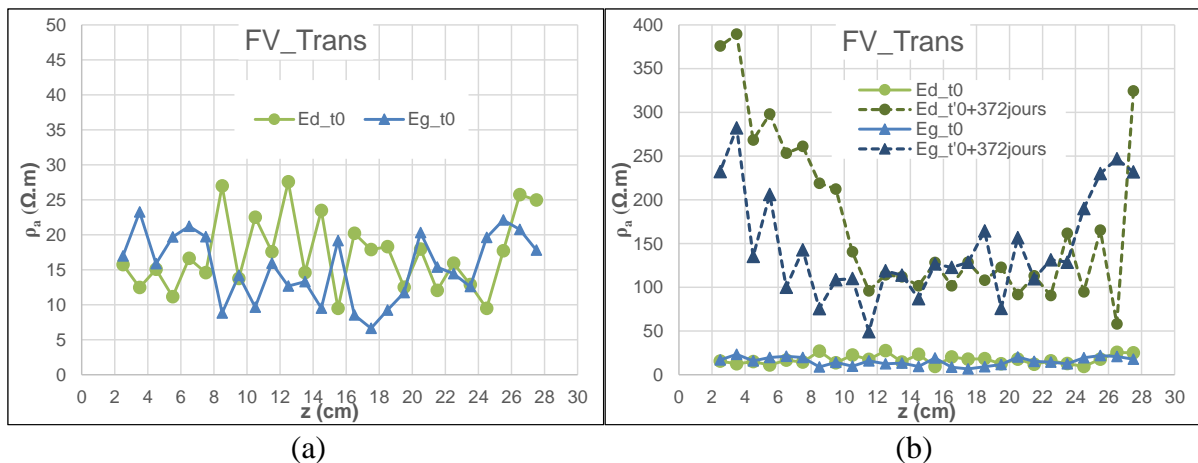


Figure 6-6 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec les dispositifs Echelle à droite et à gauche de la dalle FVen utilisant la configuration Transmission : (a) à l'état saturé, (b) aux états saturé et non saturé.

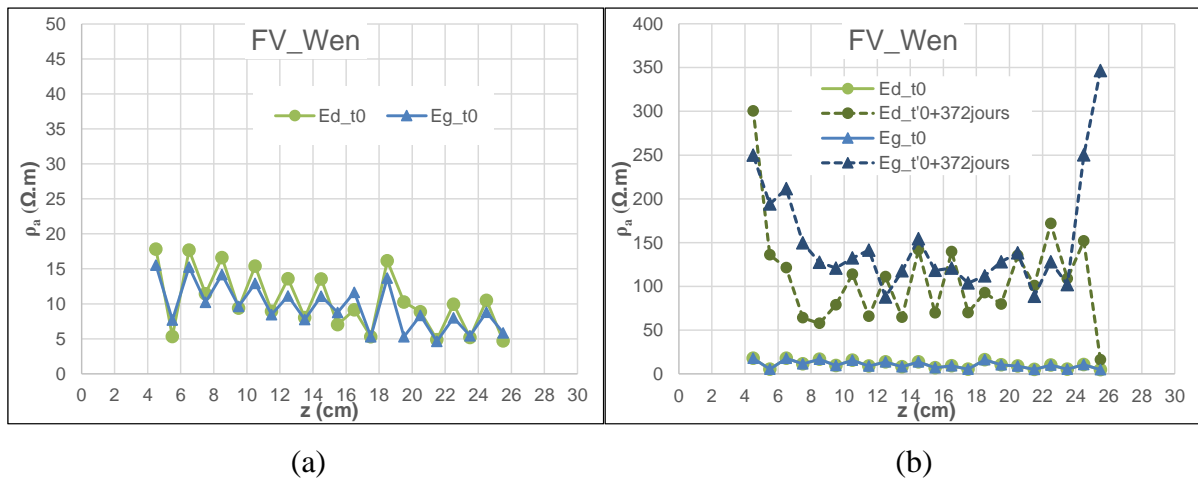


Figure 6-7 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec les dispositifs Echelle à droite et à gauche de la dalle FV en utilisant la configuration Wenner : (a) à l'état saturé, (b) aux états saturé et non saturé.

Les écarts observés dans les Figures 6-6 et 6-7 peuvent être liés à la variabilité du béton et de son degré de saturation entre les deux côtés de la dalle. Les réponses en dents de scie (oscillations spatiales) sont liées à la différence des mesures droites et gauches du CI précédemment remarquée et discutée au paragraphe 6.2.1.2. Globalement nous suivons l'état hydrique du matériau, les deux courbes (Ed et Eg) se situent dans le même fuseau à la même échéance.

La reproductibilité entre les dispositifs Echelle côté droit et côté gauche de chaque dalle est ainsi vérifiée.

Dans la suite de notre travail, nous présenterons uniquement les résultats des dispositifs Ed pour simplifier la lisibilité et l'interprétation des résultats. Les mesures des dispositifs Eg sont similaires.

6.2.2 Répétabilité et reproductibilité du dispositif Anneau

Une étude de répétabilité et de reproductibilité des mesures est également réalisée avec les dispositifs Anneau dans les dalles HA et FV. Comme précédemment, l'évaluation de la répétabilité de la résistivité apparente est réalisée par le biais de trois mesures espacées de 5 min (pour éviter une éventuelle polarisation des électrodes), dans des conditions saturées (Tableau 6-3) et non saturées (Tableau 6-4) avec le dispositif A3 pour différentes configurations d'électrodes dans les dalles HA et FV. En moyenne, pour les différentes configurations, le CV de répétabilité varie entre 0,4% et 2,3% à l'état saturé et entre 0,2% et 1,1% à l'état non saturé. Ces valeurs de CV sont faibles et encourageantes pour notre application.

6.2.2.1 Répétabilité du dispositif Anneau

Tableau 6-3 Résistivités électriques apparentes mesurées à l'état saturé (à t_0) avec le dispositif A3 pour différentes configurations dans les dalles HA et FV.

ρ_a [$\Omega.m$]	FV_Ad_A3	FV_Ag_A3	HA_Ad_A3	HA_Ag_A3
Wec_a2	8,1 ± 0,1	20,6 ± 0,3	23,8 ± 0,2	8,7 ± 0,2
CV rép. %	1,2 %	1,4 %	0,8 %	2,3 %
Q_I12	106,3 ± 1,1	28,3 ± 0,6	13,6 ± 0,2	20,5 ± 0,1
CV rép. %	1,0 %	2,1 %	1,5 %	0,5 %
Q_I16	11,6 ± 0,1	43,2 ± 0,3	47,2 ± 0,2	48,9 ± 0,3
CV rép. %	0,9 %	0,7 %	0,4 %	0,6 %
Q_Carre	14,6 ± 0,1	14,1 ± 0,1	10,7 ± 0,1	13,5 ± 0,2
CV rép. %	0,7 %	0,7 %	0,9 %	1,5 %
Q_I19	15,0 ± 0,1	45,5 ± 0,1	50,5 ± 0,2	62,0 ± 0,3
CV rép. %	0,7 %	0,9 %	0,4 %	0,5 %

Tableau 6-4 Résistivités électriques apparentes mesurées à un état non saturé avec le dispositif A3 pour différentes configurations dans les dalles HA et FV.

ρ_a [$\Omega.m$]	t'0+268jours		t'0+62jours	
	FV_Ad_A3	FV_Ag_A3	HA_Ad_A3	HA_Ag_A3
Wec_a2	82,0 ± 0,5	328,4 ± 2,3	22,6 ± 0,2	34,9 ± 0,2
CV rép. %	0,6 %	0,7 %	0,9 %	0,6 %
Q_I12	65,9 ± 0,4	82,4 ± 0,6	10,8 ± 0,1	28,8 ± 0,1
CV rép. %	0,6 %	0,7 %	0,9 %	0,3 %
Q_I16	105,6 ± 1,1	297,2 ± 3,3	29,2 ± 0,1	52,3 ± 0,2
CV rép. %	1,0 %	1,1 %	0,3 %	0,4 %
Q_Carre	49,5 ± 0,3	66,4 ± 0,5	14,4 ± 0,1	25,5 ± 0,2
CV rép. %	0,6 %	0,8 %	0,7 %	0,8 %
Q_I19	124,7 ± 1,2	287,2 ± 2,1	64,1 ± 0,1	75,0 ± 0,2
CV rép. %	0,9 %	0,7 %	0,2 %	0,3 %

Comme précédemment, l'évaluation de la répétabilité de la résistivité apparente est réalisée par le biais de trois mesures espacées de 5 min (pour éviter une éventuelle polarisation des électrodes), dans des conditions saturées (Tableau 6-3) et non saturées (Tableau 6-4) avec le dispositif A3 pour différentes configurations d'électrodes dans les dalles HA et FV. En moyenne, pour les différentes configurations, le CV de répétabilité varie entre 0,4% et 2,3% à l'état saturé et entre 0,2% et 1,1% à l'état non saturé. Ces valeurs de CV sont faibles et encourageantes pour notre application.

6.2.2.2 Reproductibilité du dispositif Anneau

La reproductibilité est évaluée en testant la variabilité de la réponse de chaque dispositif Anneau placé à des profondeurs différentes dans une même dalle. La reproductibilité est ici également associée au changement de dispositif et à la variabilité du matériau béton. La Figure 6-8 montre le profil de résistivité apparente en fonction de la position de l'électrode d'injection de courant C1 pour les dispositifs A1, A2, A3 et A4 de la dalle FV en utilisant la configuration Wec_a2 aux états saturé et non saturé.

Nous estimons que tous les quadripôles interrogés avec le dispositif Anneau placé à une profondeur donnée, sont dans le même plan perpendiculaire à z et donc parallèles à la surface de séchage. La variation de la résistivité sur un même dispositif Anneau devrait donc être faible.

Nous remarquons sur la Figure 6-8 que les résistivités apparentes sont très différentes en faisant le tour complet de l'Anneau : la position azimutale de l'électrode C1 d'injection de courant dans le dispositif Anneau influe significativement sur la mesure obtenue. Pourtant ces dispositifs avaient été testés dans les éprouvettes An1 et An2 (paragraphe 4.3.6) et dans les essais en solution (paragraphe 4.3.5) ; la résistivité mesurée était indépendante de la position autour de l'Anneau. Une fois les dispositifs noyés dans les dalles, les résistivités varient de manière importante pour les 4 dispositifs Anneau Ag. Des comportements similaires, non présentés ici, sont également observés pour les 4 dispositifs Anneau Ad dans les 2 dalles FV et HA. Ceci ne peut pas être uniquement en lien avec la variabilité latérale du matériau dans les dalles. Des soucis de contact que nous avons étudiés ou de proximité de granulats ne peuvent pas non plus expliquer ces comportements répétables. Nous suspectons donc d'autres phénomènes liés spécifiquement à la réponse de ce capteur dans ce matériau, par exemple des effets capacitifs. Néanmoins, après avoir démontré la répétabilité des mesures au paragraphe précédent, nous remarquons dans la Figure 6-8 (a) que les mesures des dispositifs Anneau

sont reproductibles : l'écart relatif de la résistivité apparente est inférieur à 5,5% en moyenne (valeur calculée entre les quatre dispositifs A1, A2, A3 et A4 à l'état saturé). En outre, la résistivité apparente augmente en fonction du séchage du béton (Figure 6-8 (b)) et de façon plus significative pour le dispositif A1 le plus proche de la surface en contact direct avec l'air ($z = 4,5$ cm).

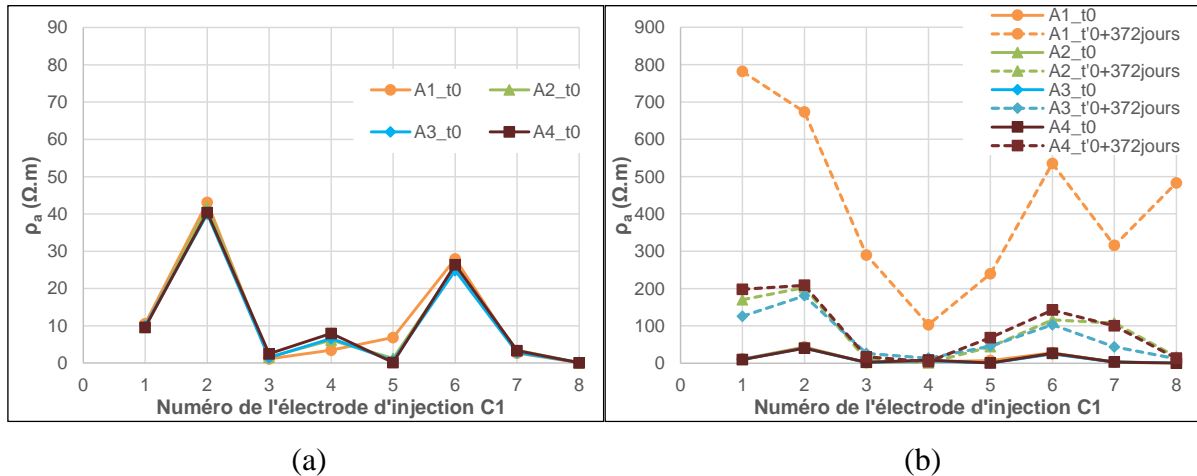
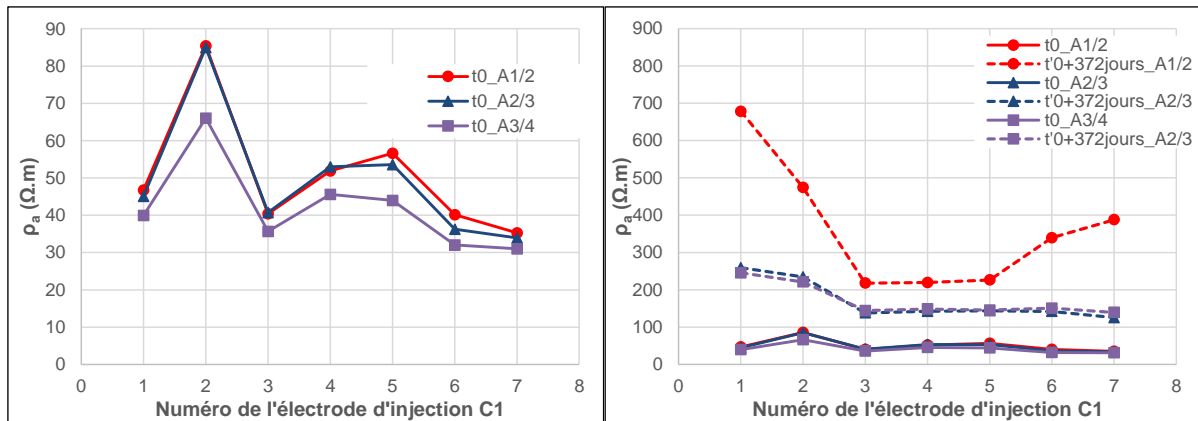


Figure 6-8 Comparaison des résistivités apparentes mesurées avec les dispositifs Anneau A1, A2, A3 et A4 du côté gauche de la dalle FV en utilisant la configuration Wec_a2 : (a) à l'état saturé, (b) aux états saturé et non saturé.

La Figure 6-9 montre la variation de résistivité apparente en fonction de la position azimutale de l'électrode C1 d'injection de courant pour les mesures inter-anneaux A1/2, A2/3 et A3/4 du côté gauche de la dalle FV en utilisant la configuration Q_I19 aux états saturé et non saturé. Nous constatons à nouveau des variations azimutales très similaires entre deux paires d'Anneau. Cependant, ces variations sont relativement moins élevées que les variations sur un même dispositif Anneau. A l'état saturé, la variation relative de résistivité apparente est en moyenne de 2,1% entre les dispositifs A1 et A2 et les dispositifs A2 et A3. La mesure moyenne entre les dispositifs A3 et A4 est légèrement inférieure. Rappelons que la distance entre les dispositifs A1 et A2 ainsi que A2 et A3 est de 5 cm alors que la distance entre les dispositifs A3 et A4 est de 8 cm. A l'état non saturé, nous remarquons que la résistivité apparente est plus grande entre les dispositifs A1 et A2 les plus proches de la surface exposée au séchage.



(a)

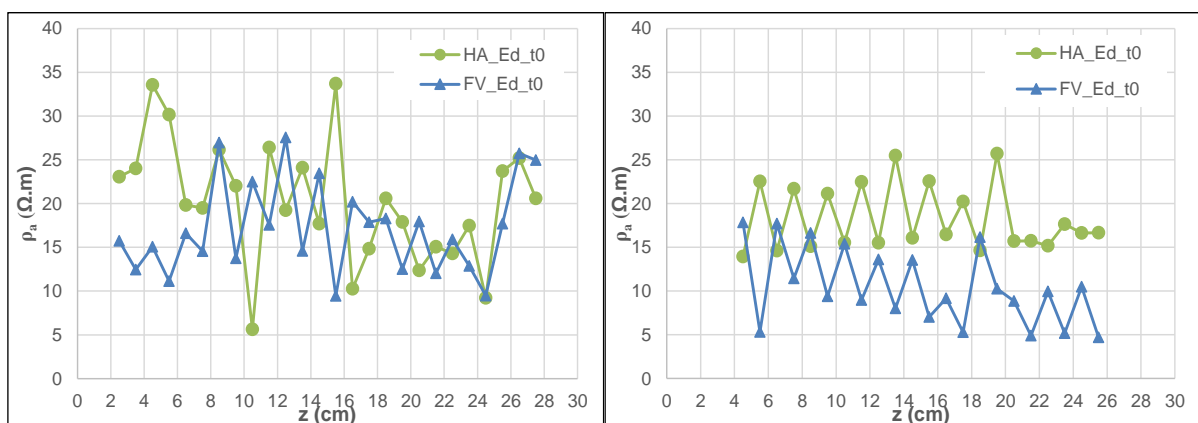
(b)

Figure 6-9 Comparaison des résistivités apparentes mesurées entre les Anneau A1/2, A2/3 et A3/4 du côté gauche de la dalle FV en utilisant la configuration Q_{I19} : (a) à l'état saturé, (b) aux états saturé et non saturé.

A cause de la variabilité des résultats obtenus avec les dispositifs Anneau, les résultats des dispositifs Anneau ne seront plus considérés dans la suite ; le travail se focalisera sur les dispositifs Echelle.

6.2.3 Influence des armatures

Nous comparons dans ce paragraphe la réponse des dispositifs Echelle entre les dalles HA et FV pour évaluer l'influence des armatures. À l'état saturé, les dalles HA et FV étant *a priori* similaires en tous points hormis la nature des armatures, il est donc légitime d'effectuer ces comparaisons à cet état.



(a)

(b)

Figure 6-10 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec les dispositifs Echelle dans les dalles HA et FV à l'état saturé : (a) Configuration Transmission, (b) Configuration Wenner.

La Figure 6-10 montre une comparaison des mesures avec les dispositifs Echelle dans les dalles HA et FV en utilisant les configurations Transmission et Wenner.

Nous observons des différences entre les dalles attribuées à la différence du matériau ausculté (différence entre les gâchées). A l'état saturé, une NRMSE de 9,1% est obtenue en configuration Transmission entre HA et FV, comparable à la NRMSE de 8,4% obtenue, pour la même configuration, entre les dispositifs Echelle à droite et à gauche de la dalle FV (paragraphe 6.2.1.3). Les oscillations observées sur ces profils en fonction de la profondeur sont dues aux écarts entre les réponses droites/gauches du dispositif (paragraphe 6.2.1.2) puisque les résultats présentés ici incluent les deux côtés de l'Echelle. Les écarts observés sont plus importants avec la configuration Wenner qu'avec la configuration Transmission mais l'ordre de grandeur de la résistivité apparente mesurée est identique dans les deux dalles. La différence de nature des armatures (acier HA ou fibre de verre FV) a donc une influence faible sur les mesures de résistivités apparentes mesurées par le dispositif Echelle placé au centre de la maille d'armatures.

La présence d'armatures en acier ne perturbe donc pas significativement la réponse des dispositifs Echelle, ce qui est cohérent avec les résultats de la modélisation numérique présentés dans le paragraphe 4.1.4.5. Par ailleurs, après avoir relié électriquement les deux lits d'armature de la dalle HA pour simuler l'effet d'une épingle, nous avons remarqué que cette connexion a un effet négligeable sur le profil de résistivité électrique apparente.

Le comportement est similaire avec les dispositifs Eg dans les dalles HA et FV.

En outre, on peut noter que la nature des armatures n'influence pas non plus les mesures de résistivités apparentes réalisées par les dispositifs Anneau.

6.2.4 Comparaison des différentes configurations de mesure du dispositif Echelle

Afin de comparer toutes les configurations de mesure mises en œuvre avec le dispositif Echelle, nous avons tracé sur la Figure 6-11 les profils de résistivité apparente du dispositif Ed dans les dalles HA et FV dans des conditions saturées et non saturées. Nous pouvons observer que les profils obtenus avec les configurations Trans, Wen et Q_I13 sont comparables et que les résistivités apparentes mesurées sont similaires. En revanche, les configurations Q_I12 et Q_Crois donnent des valeurs de résistivités apparentes plus grandes.

Les mêmes remarques avaient été faites pour les courbes de calibration établies dans le paragraphe 5.4.3. Une inversion pourrait éventuellement contribuer à rapprocher les différentes configurations.

Notons que les mesures de résistivités apparentes avec le dispositif HA_Ed n'ont pas été réalisées en configuration Q_Crois à l'état saturé (au temps t0).

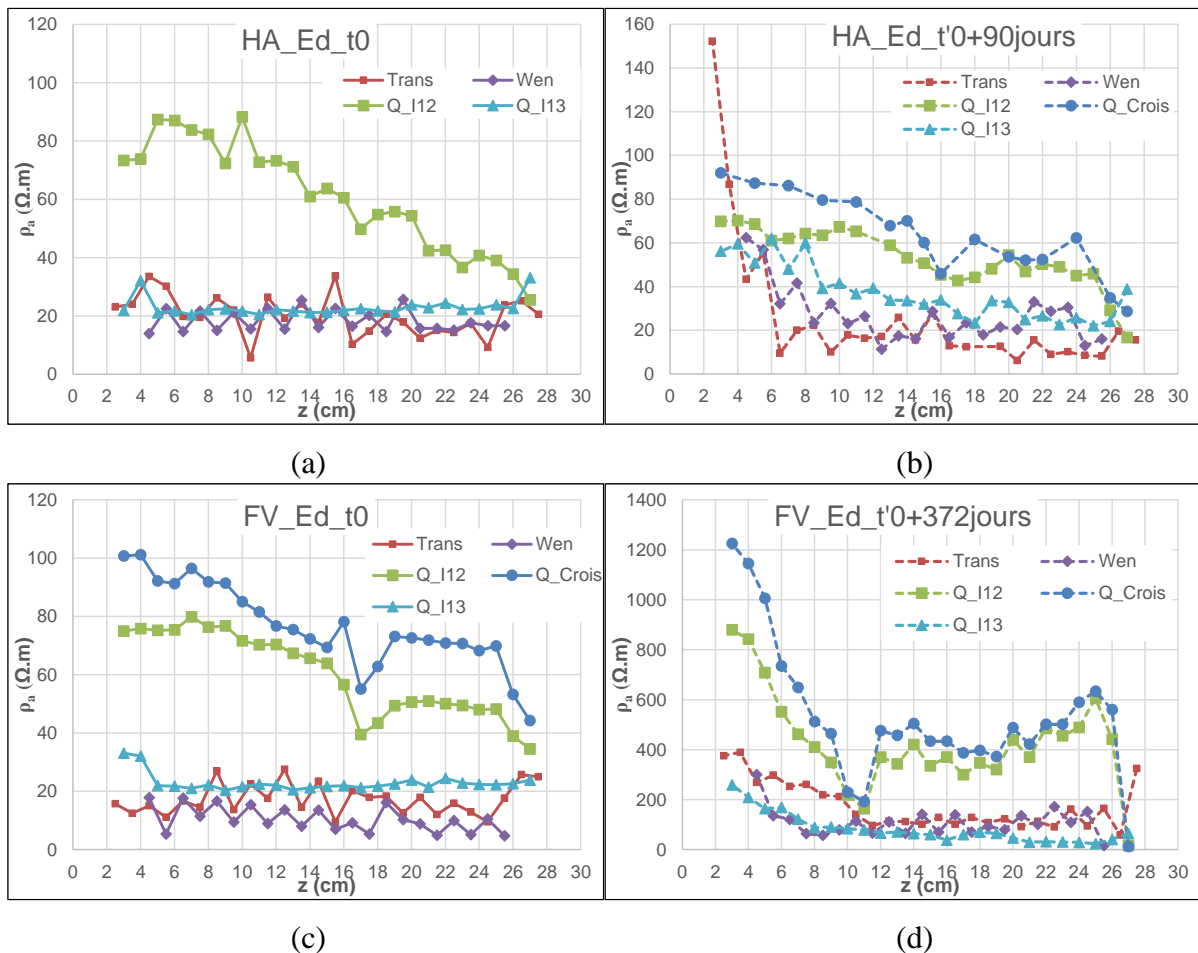


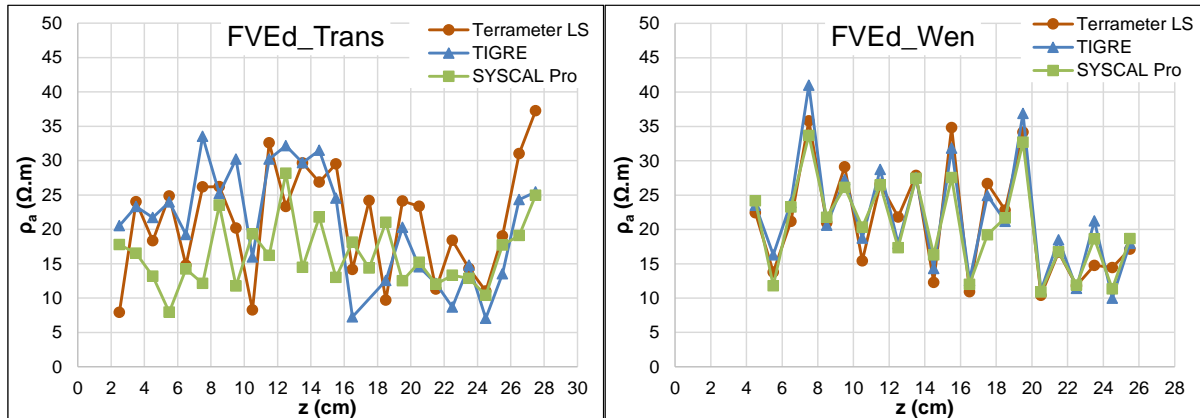
Figure 6-11 Comparaison des profils de résistivité apparente mesurés avec les dispositifs Echelle Ed dans les dalles HA et FV aux états saturé et non saturé en utilisant toutes les configurations : (a) dalle HA à t0, (b) dalle HA à t'0+90jours, (c) dalle FV à t0, (d) dalle FV à t'0+372 jours.

Le comportement est similaire avec les dispositifs Eg dans les dalles HA et FV.

6.2.5 Comparaison des résistivimètres

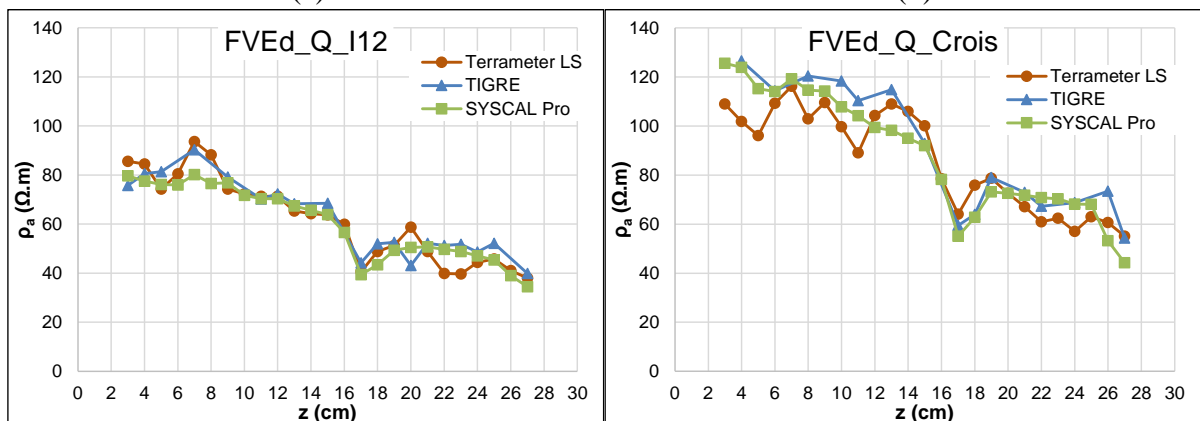
Dans la mesure où la teneur en eau du béton doit être mesurée sur des durées pluridécennales, pour assurer la durabilité et la qualité des mesures sur le long terme, une attention particulière a été portée sur la conception des sondes et leur mise en œuvre dans le béton lors de la construction de l'ouvrage. Le système de mesure sera a priori déporté dans une zone de

l'ouvrage accessible par des opérateurs. Au cours du temps, il pourra faire l'objet de maintenance, de remplacement. Il était donc important d'évaluer et de quantifier le possible impact de l'instrument branché sur la sonde sur la mesure obtenue.



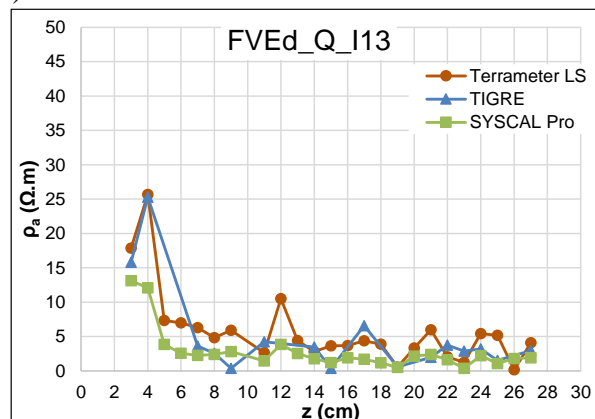
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

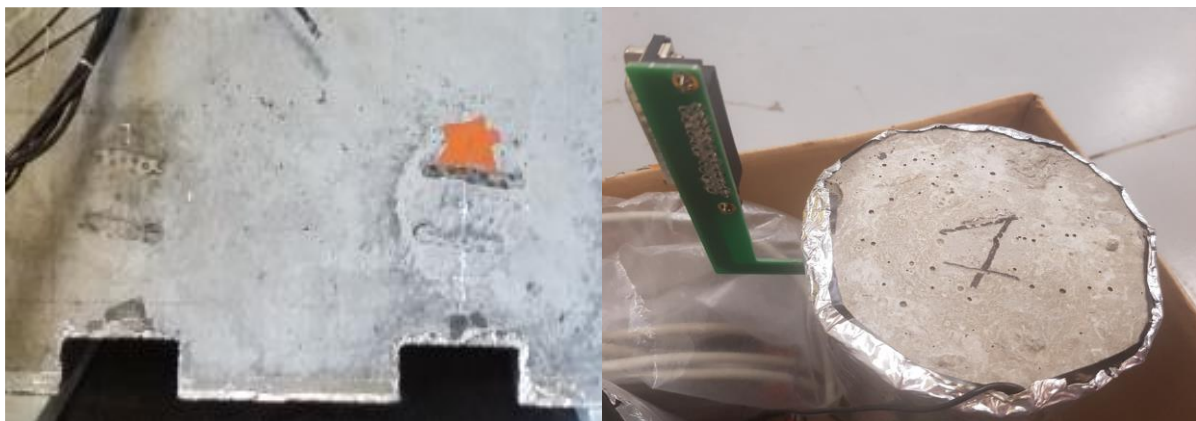
Figure 6-12 Profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur du dispositif Ed dans la dalle FV à t_0+21 jours en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_{I12} , (d) Q_{Crais} , (e) Q_{I13} .

Pour cela, nous avons comparé les profils de résistivité apparente obtenus avec les trois résistivimètres commerciaux, référence du domaine : SYSCAL Pro, Terrameter LS et TIGRE.

Cette étude a été menée à l'échéance correspondant à t_0+21 jours en utilisant les configurations Trans, Wen, Q_I12, Q_Crois et Q_I13 (Figure 6-12).

Les résultats de la Figure 6-12 montrent que les résistivités apparentes mesurées avec les différents résistivimètres sont plus proches dans le cas des mesures en configurations Wen, Q_I2, Q_Crois et Q_I13 qu'en configuration Trans. En effet, en configuration Trans, le coefficient de variation de répétabilité est plus élevé, comme nous l'avons montré dans le paragraphe 6.2.1.1. La différence entre les appareils de mesure est attribuée aux modes d'injection du courant électrique, le signal émis n'ayant pas exactement les mêmes caractéristiques (paragraphe 5.3). Le TIGRE et le Terrameter LS étant régulés en courant, les mesures avec ces deux résistivimètres sont proches et sensiblement éloignées de celles obtenues avec le SYSCAL Pro, régulé en potentiel, notamment pour la configuration Trans.

De plus, les grilles d'injection en inox, interrogées en configuration Trans dans la dalle FV, sont affleurantes à la surface et subissent donc plus fortement le séchage (Figure 6-13 (a)) que celles des éprouvettes 11x22 cm noyées plus profondément (Figure 6-13 (b)). Nous avons en effet remarqué que les résistances de contact des grilles dans la dalle augmentent fortement au cours du séchage par rapport aux résistances de contact des électrodes du circuit imprimé. Notons que les observations sont identiques pour la dalle HA. Ainsi nous recommandons, pour l'implémentation sur site, de positionner les grilles métalliques suffisamment profondément dans le béton pour conserver un bon contact électrique au cours du monitoring.



(a)

(b)

Figure 6-13 Zoom sur les grilles d'injection : (a) dalle FV (grille affleurant en surface), (b) Eprouvette E4 (grille noyée en surface).

6.3 Profils de résistivité apparente des dispositifs Echelle en cure

L'objectif de ce paragraphe est de présenter les profils de résistivité apparente des dispositifs Echelle pendant la période de cure du béton entre les instants t_c (coulage) et $t_0 = t_c + 41$ jours (début de séchage à 20 °C). La Figure 6-14 montre l'évolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur, mesurés avec le dispositif Ed dans la dalle FV pendant la cure en utilisant les configurations Trans, Wen, Q_I12 et Q_Crois. Notons qu'à l'échéance $t_c + 5$ jours, les mesures ne sont pas effectuées en configurations Trans, Wen et Q_Crois.

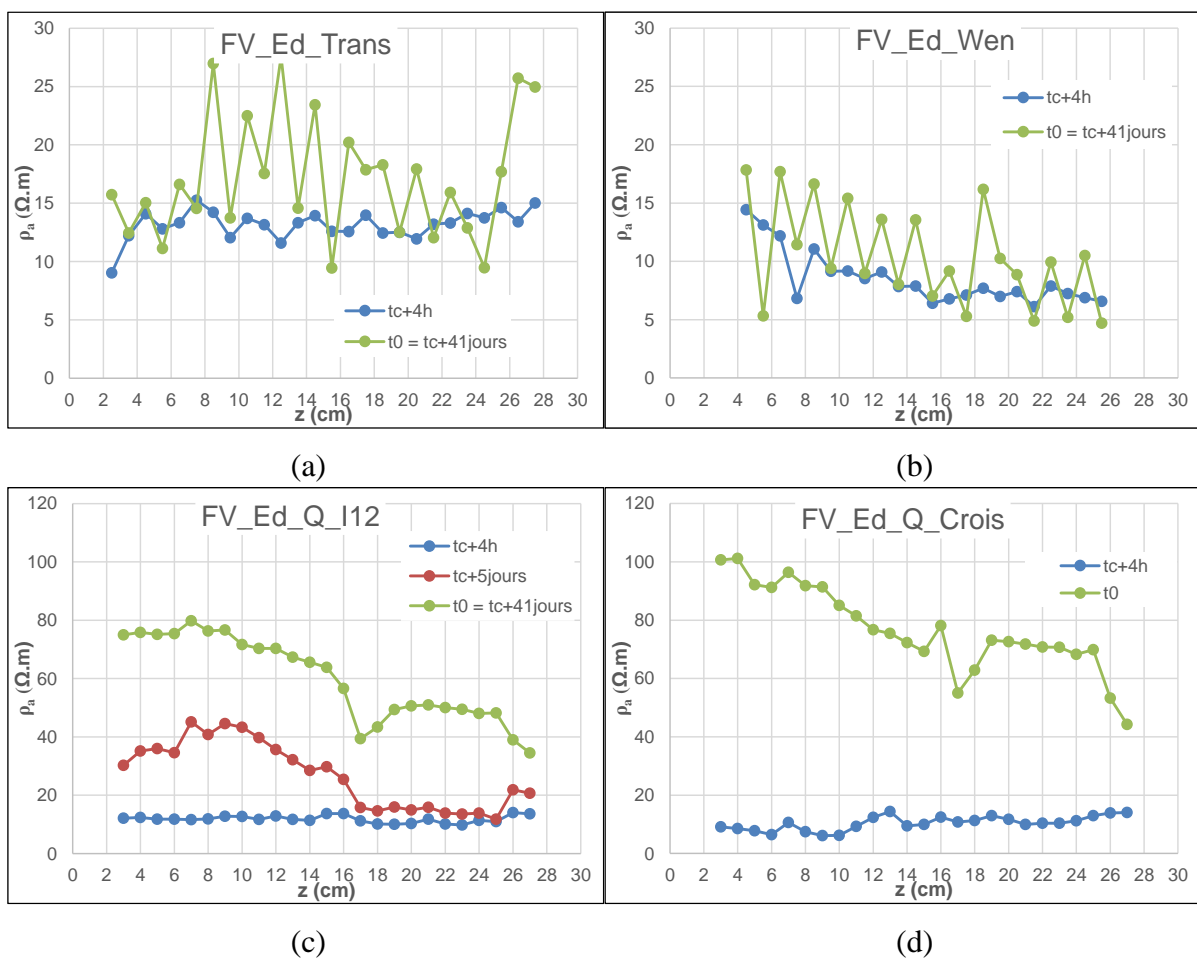


Figure 6-14 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant la cure pour le dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois.

On remarque que la résistivité est constante sur toute l'épaisseur de la dalle quatre heures après le coulage alors que le béton est encore en cours de prise. Après 5 jours de prise, on remarque des variations assez significatives de la résistivité sur l'épaisseur.

Nous remarquons en particulier une évolution significative de la résistivité apparente pour les configurations Q_I12 et Q_Crois avec un gradient déjà établi à t0. Ces variations peuvent être dues à des phénomènes d'interface qui apparaissent lorsque le béton est durci alors qu'ils sont absents lorsque le béton n'est pas encore totalement solidifié. Ces phénomènes d'interface trouvent leur origine à l'intérieur du béton entre les granulats et la pâte de ciment et au contact entre les électrodes du CI et le béton.

Ces observations sont cohérentes avec des résultats assez similaires observés dans les éprouvettes E1 à E5 aux échéances tc+4h, tc+1j et t0. Nous présentons dans la Figure 6-15 l'évolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant la cure pour le dispositif Echelle dans l'éprouvette E1 en utilisant les mêmes configurations : Trans, Wen, Q_I12 et Q_Crois.

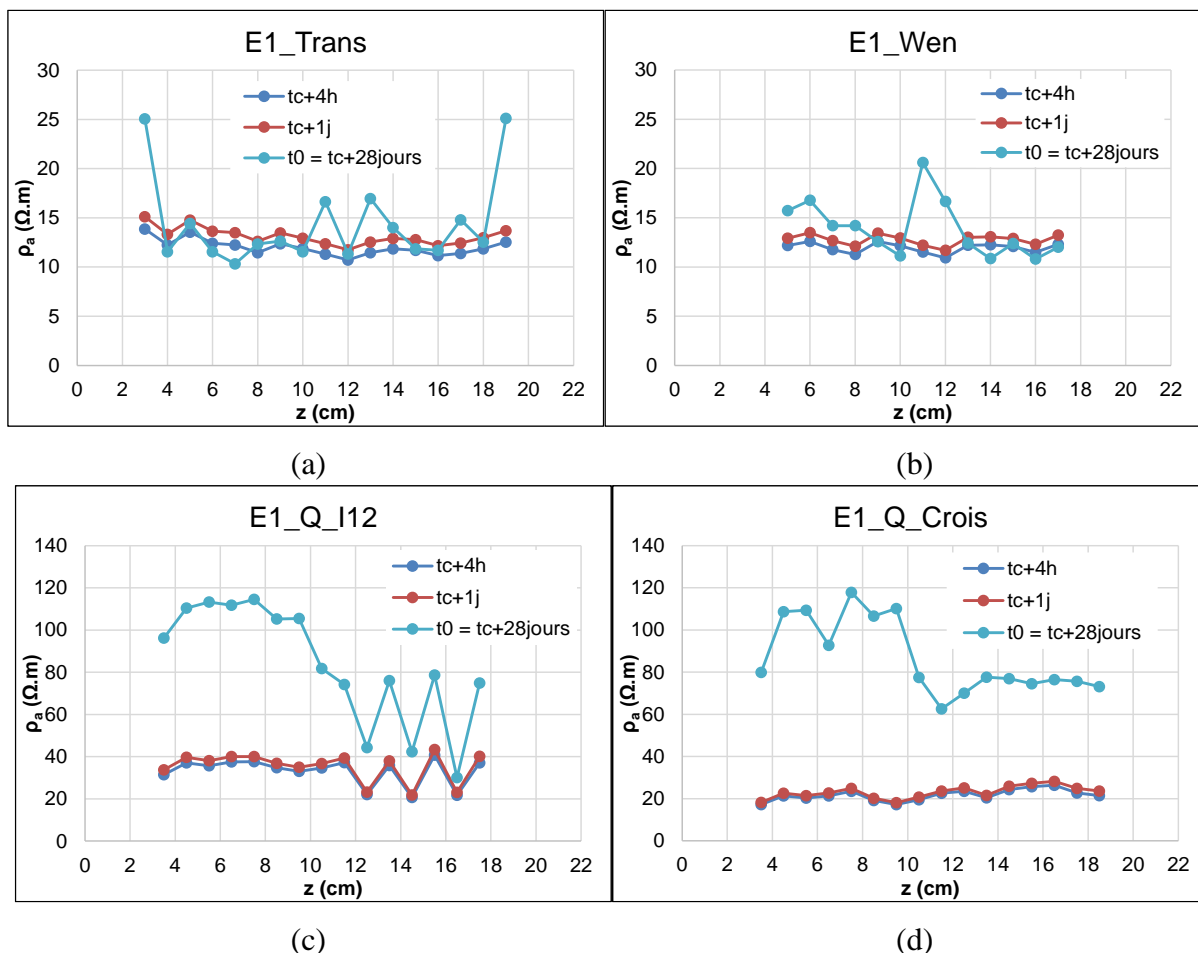


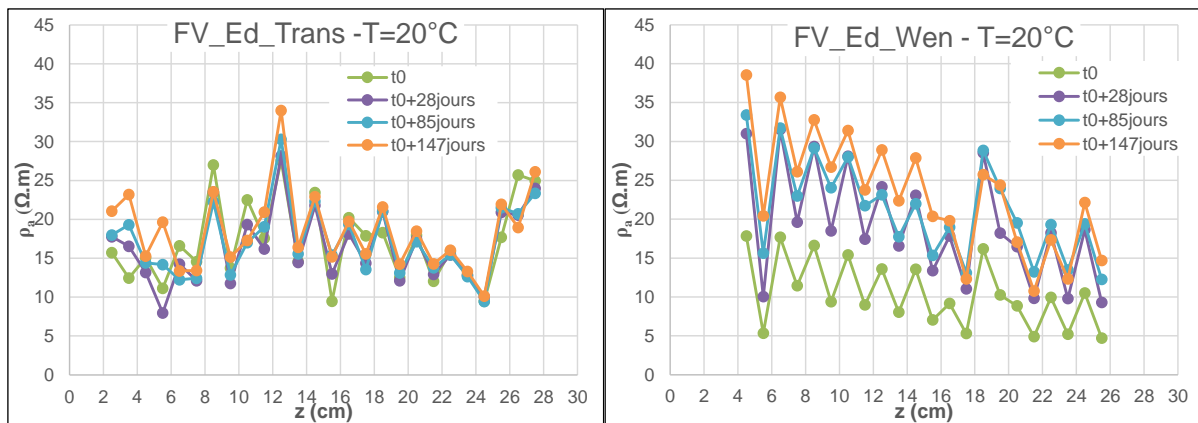
Figure 6-15 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant la cure de l'éprouvette E1 du dispositif Echelle en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois.

6.4 Profils de résistivité apparente des dispositifs Echelle pendant le séchage

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier les profils de résistivité apparente des dispositifs Echelle pendant le séchage des dalles HA et FV. Nous présentons tout d'abord les résultats pendant le séchage à 20 °C et ensuite les résultats pendant le séchage à 45 °C. Nous rappelons que le séchage unidirectionnel s'effectue par la face en $z = 0$.

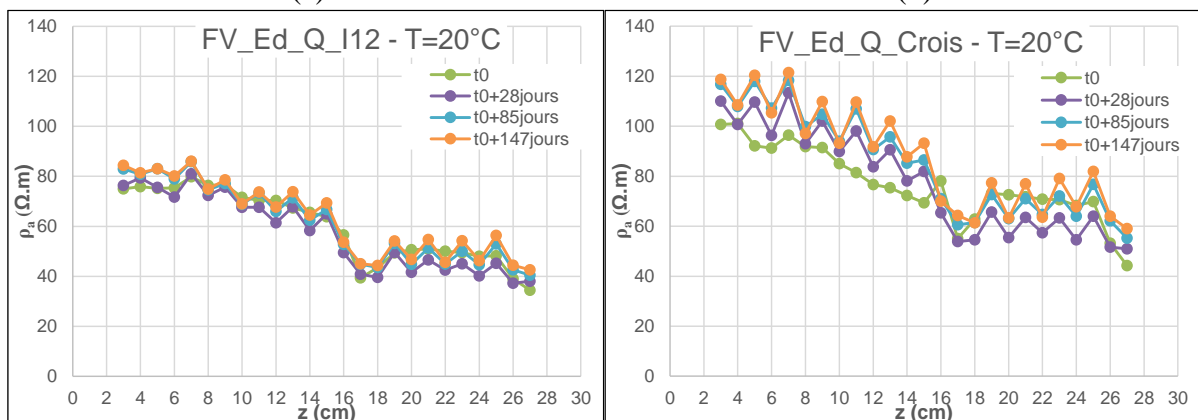
La Figure 6-16 représente l'évolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant 147 jours de séchage à 20 °C pour le dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations Trans, Wen, Q_I12, Q_Crois et Q_I13.

Des écarts de résistivités apparentes sont observés entre les différentes configurations. Les configurations Trans, Wen et Q_I13 donnent des mesures de résistivités apparentes plus faibles que les celles obtenues avec les configurations Q_I12 et Q_Crois. Ce phénomène a déjà été observé dans les courbes de calibration (paragraphe 5.4.3, Figure 5-24) et également lors de la comparaison des différentes configurations mises en œuvre avec le dispositif Echelle (paragraphe 6.2.4, Figure 6-11). Les configurations Q_I12 et Q_I13 sont moins sensibles au séchage. Nous remarquons une évolution plus marquée en configurations Wen et Q_Crois qui paraît difficilement explicable, le séchage n'ayant probablement pas atteint 15 cm de profondeur après 28 jours de séchage à 20 °C.



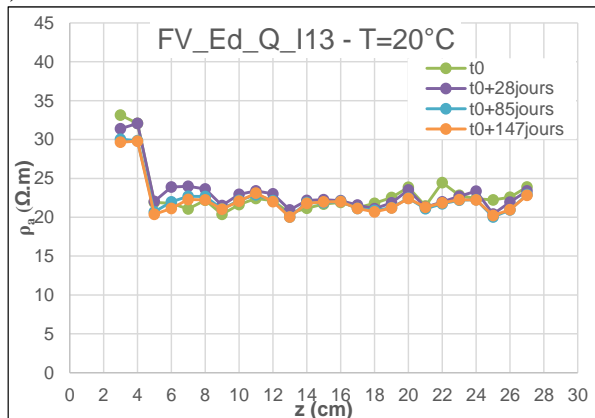
(a)

(b)



(c)

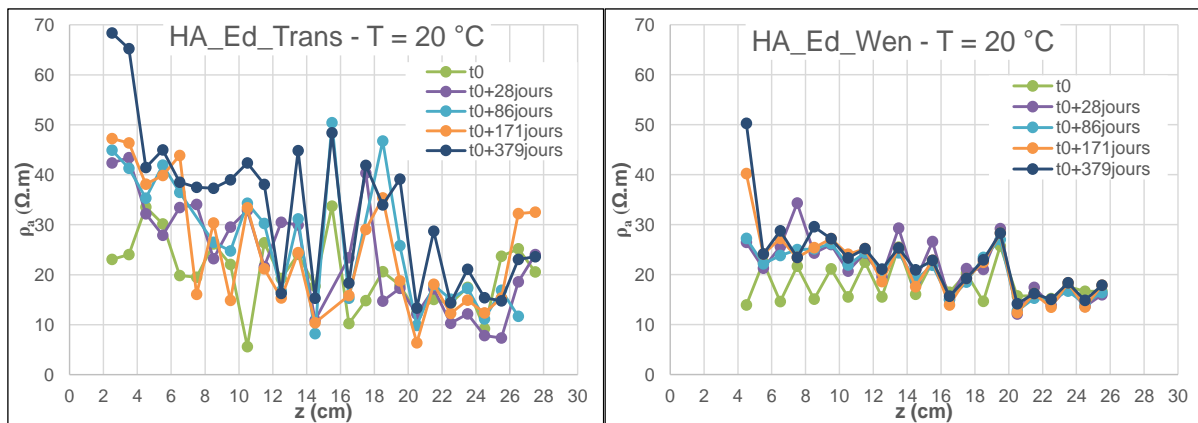
(d)



(e)

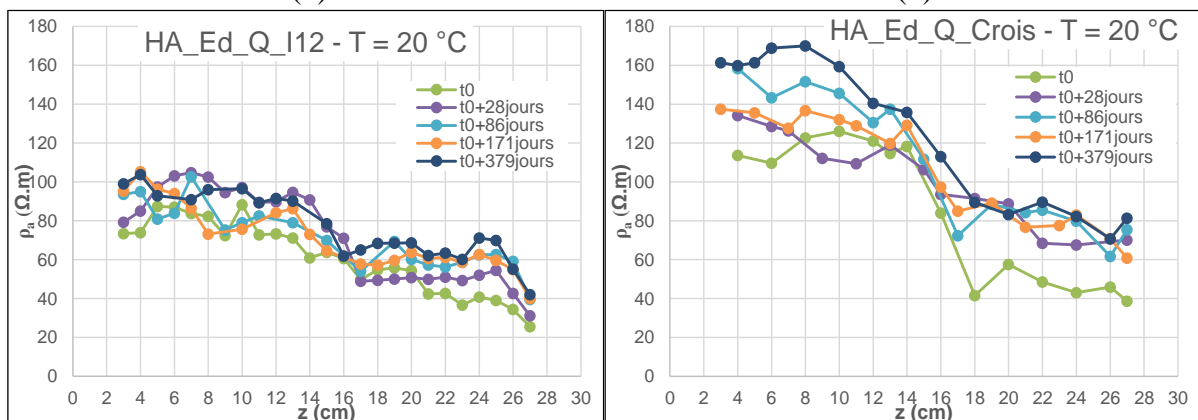
Figure 6-16 Evolutions des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant le séchage à 20°C du dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.

La Figure 6-17 représente l'évolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant 379 jours de séchage à 20°C pour le dispositif Ed dans la dalle HA en utilisant les configurations Trans, Wen, Q_I12, Q_Crois et Q_I13.



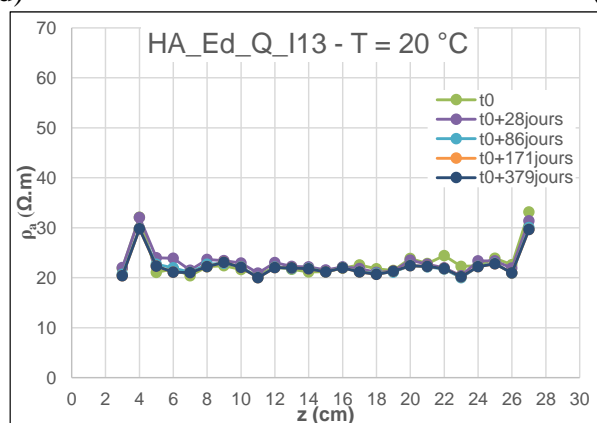
(b)

(b)



(d)

(d)



(f)

Figure 6-17 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant le séchage à 20 °C du dispositif Ed dans la dalle HA en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.

Nous remarquons sur les Figures 6-16 et 6-17 que le gradient de résistivités établit très lentement. Pendant 147 jours de séchage à 20 °C de la dalle FV, la réponse du dispositif en résistivité apparente est quasi-constante en fonction du temps. Pendant 379 jours de séchage à 20 °C de la dalle HA, un faible gradient de résistivité commence à s'établir en surface ($z = 0$), visible avec les configurations Trans et Wen. Comme pour la dalle FV, les configurations

Q_I12 et Q_I13 ne sont pas sensibles au séchage et la configuration Q_Crois présente des variations importantes par rapport aux autres configurations.

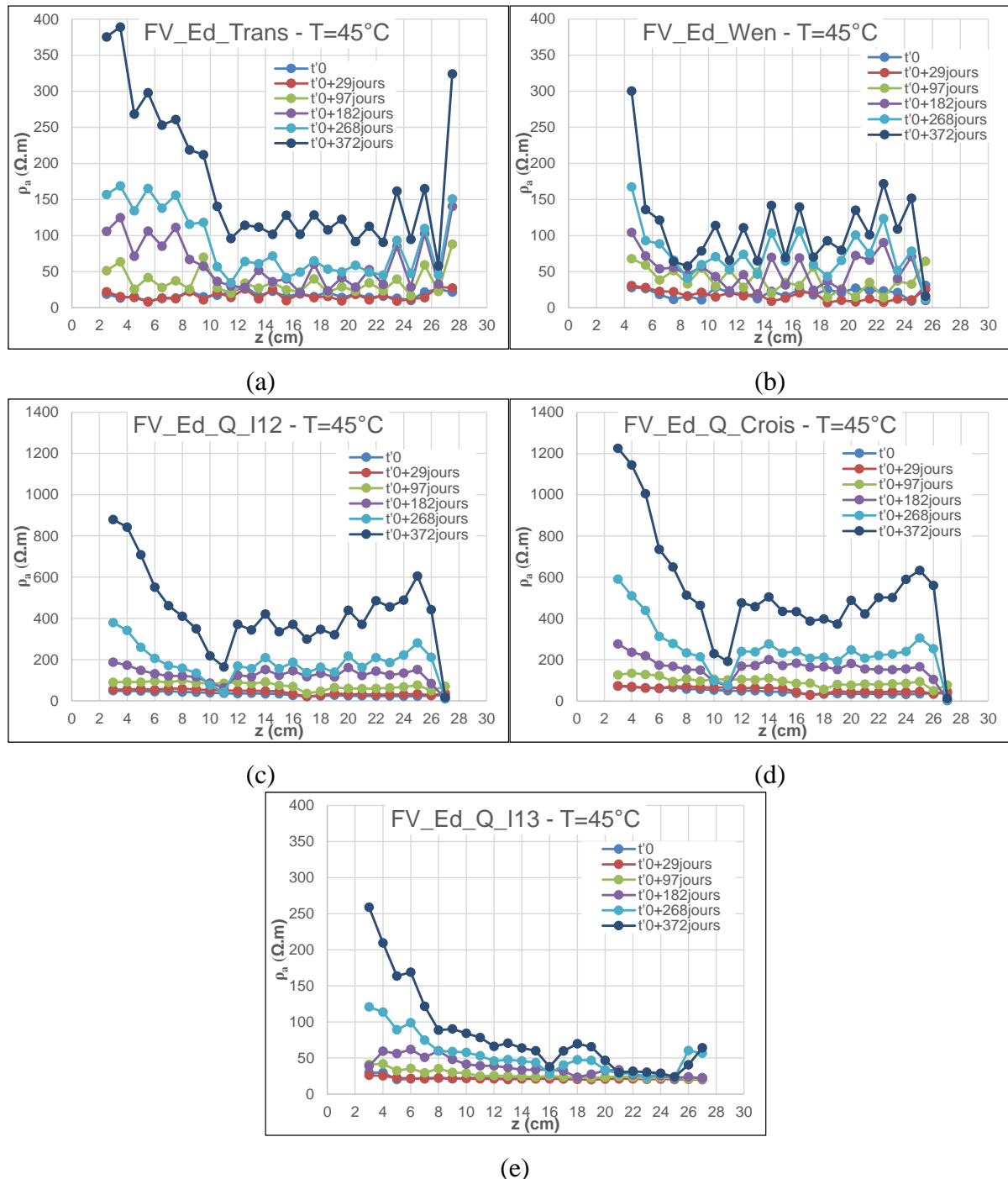


Figure 6-18 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant le séchage à $45^\circ C$ du dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.

Par conséquent, compte tenu du faible gradient observé dans ces conditions de conservation, dans le but de tester la sensibilité des dispositifs à un gradient de résistivité plus fort, nous

avons accéléré le séchage des dalles par leur mise en étuve à 45 °C. Les résultats sont présentés sur la Figure 6-18 pour la dalle FV et sur la Figure 6-19 pour la dalle HA.

Sur la Figure 6-18, le monitoring réalisé lors du séchage de la dalle FV à 45 °C indique un gradient de résistivité entre la surface exposée au séchage ($z = 0$ cm) et la surface protégée ($z = 30$ cm) indiquant a priori une saturation plus faible en surface. Les valeurs de résistivité en surface ($z = 3 \pm 1$ cm) augmentent progressivement pendant 372 jours de séchage. Comme pour les essais dans les éprouvettes, la résistivité apparente augmente plus en surface qu'à cœur.

Nous remarquons qu'au cours du temps, la résistivité au niveau de la face protégée augmente également, révélant également un séchage de ce côté de la dalle. L'hypothèse d'une fuite dans la protection (bâche de polypropylène et papier aluminium auto-adhésif) a été validée avec des mesures capacitives, réalisées sur la face protégée de la dalle FV, montrant une augmentation de la permittivité apparente au cours du temps et révélant donc un séchage du béton. Cette augmentation est plus marquée au niveau la gâchée G1 (emplacement des dispositifs Echelle) qu'au niveau de la gâchée G3 (emplacement des capteurs THR).

Des mesures surfaciques ont aussi été réalisées à courtes échéances sur les dalles HA et FV (faces protégée et non protégée) en utilisant le dispositif multi-électrodes surfaciques (peigne d'électrodes) de Du Plooy *et al.* (2013) composée de 14 électrodes alignées avec une distance inter-électrodes égale à 2 cm (Figure 3-4). En configuration Wenner, nous utilisons 4 valeurs d'espace inter électrodes correspondant à des profondeurs d'investigation augmentant avec l'espacement : 2 cm (niveau 1, 11 mesures), 4 cm (niveau 2, 8 mesures), 6 cm (niveau 3, 5 mesures) et 8 cm (niveau 4, 2 mesures). Nous considérons la moyenne arithmétique des résistivités par niveau. Les mesures sont effectuées sur les deux faces de la dalle : face sèche et face protégée. Sur chaque face, le peigne d'électrodes est placé au centre des mailles d'armatures (au niveau des gâchées G1, G2 et G3 (Figure 5-3 (a)) pour balayer toute la hauteur de la dalle (Tableau 6-5).

Ces mesures surfaciques sont de plus en plus bruitées avec l'évolution due au séchage du béton qui diminue la qualité du contact électrique entre les électrodes et la surface du matériau, affectant ainsi la qualité des mesures. Les mesures sur la face exposée au séchage n'ont plus été possibles à partir de t^0+84 jours, car le contact électrique ne pouvait plus être assuré. C'est un des intérêts de noyer un capteur dans la structure : préserver un bon contact électrique lors du monitoring, assurer une qualité de mesure même sur du béton désaturé. Sur

la surface protégée, les mesures étaient très difficiles à réaliser à l'échéance t'0+84 jours même après humidification des électrodes. Une augmentation de la résistivité apparente au cours du temps révèle le séchage du béton sur cette face. Comme pour les mesures capacitatives, cette augmentation est beaucoup plus marquée au niveau de la gâchée G1 qu'au niveau de la gâchée G3 (Tableau 6-5).

Tableau 6-5 Résistivités électriques apparentes mesurées avec le dispositif multi-électrodes surfaciques (peigne d'électrodes) (Du Plooy et al., 2013) sur les 2 faces de la dalle FV.

ρ_a [$\Omega.m$]	Niveau	t0+29 jours			t0+72 jours			t'0+84 jours		
		G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
FV_Face Sèche	1	62,2	97,5	72,3	1432	2090	1030			
	2	61,3	88,5	66,9	308	906	220			
	3	39,9	48,2	43,6	96,3	340	81,6			
	4	35,9	38,1	39,0	54,6	135	58,6			
FV_Face Protégée	1	50,7	50,4	53,2	53,5	54,9	58,0	3040	3190	245
	2	38,9	38,5	39,9	41,7	42,2	43,7	6990	6750	240
	3	35,8	35,7	37,1	38,1	38,4	39,9	12500	7900	170
	4	34,4	35,3	36,9	36,0	37,3	39,4	18200	7750	135

La Figure 6-19 représente l'évolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant le séchage à 45 °C, mesurés avec le dispositif Ed dans la dalle HA.

La Figure 6-19 montre que la résistivité diminue entre t'0 (date du début de séchage à 45°C) et t'0+27 jours pour ensuite augmenter en fonction du temps. En effet lors du passage de la température de 20 °C à 45 °C, la résistivité diminue tout d'abord à cause de l'élévation de la température, puis commence à augmenter à cause du séchage. Le même phénomène a été observé pour la dalle FV entre t'0 et t'0+29 jours. Nous remarquons dans les deux dalles HA et FV que l'effet thermique est plus significatif que l'effet hydrique sur la résistivité aux premières échéances.

Le séchage étant moins avancé dans la dalle HA, nous observons que les valeurs de résistivités apparentes augmentent lentement au cours du temps. Pour les configurations Q_I12 et Q_Crois, la résistivité diminue à cause de l'élévation de la température et augmente lentement tout en restant inférieur à celle mesurée à t'0.

Dans la suite, nous présentons les profils de degré de saturation correspondant à l'Echelle Ed dans la dalle FV où le gradient est bien établi.

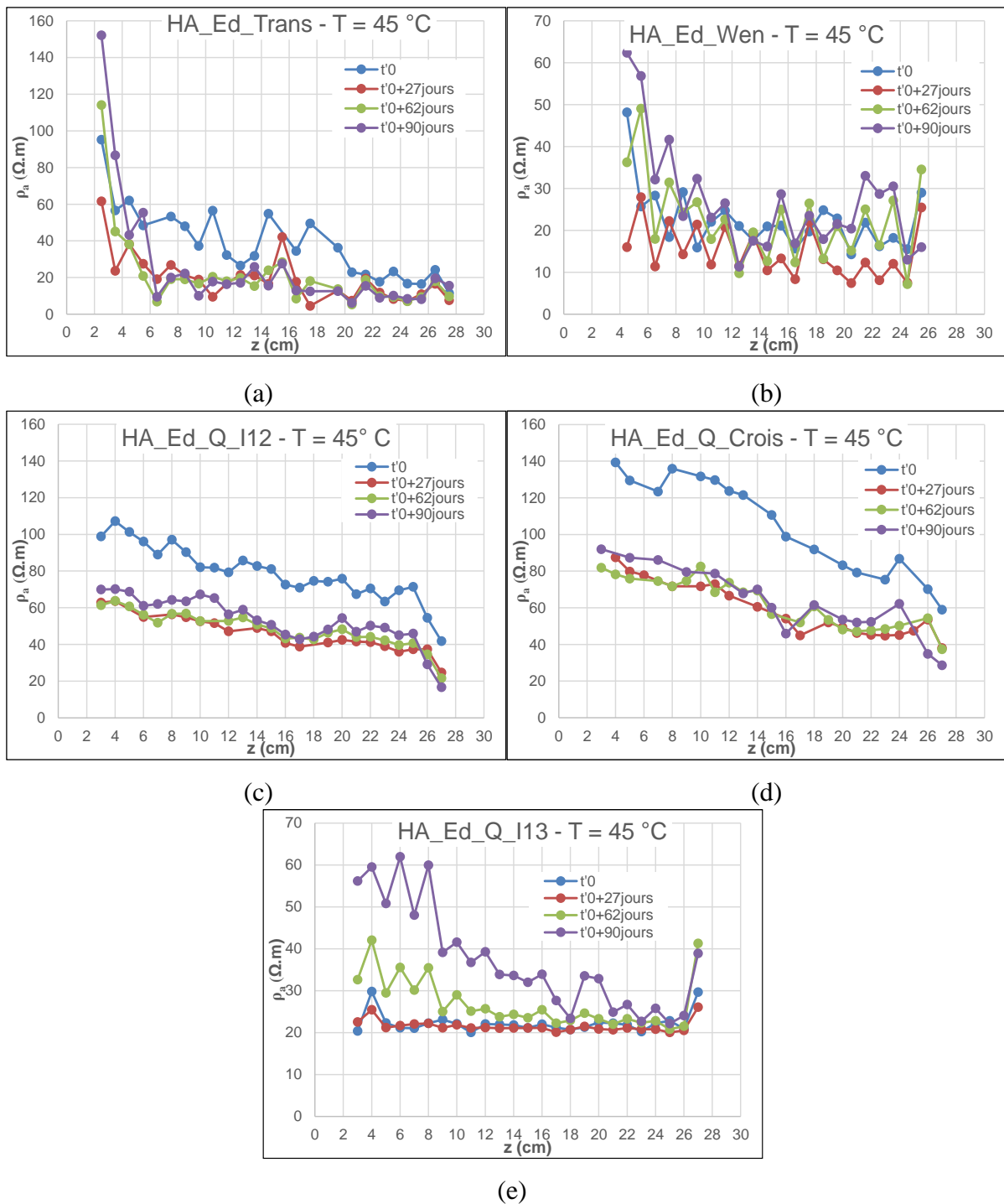


Figure 6-19 Evolution des profils de résistivité apparente en fonction de la profondeur pendant le séchage à 45 °C du dispositif Ed dans la dalle HA en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.

6.5 Monitoring du séchage

Dans ce paragraphe, les profils de résistivité apparente obtenus avec les dispositifs Echelle dans les éprouvettes et dans les dalles ont été transformés en profils de degré de saturation en

eau en utilisant les courbes de calibration de la Figure 5-23 pour chaque type de configuration. Ces profils sont comparés à des profils provenant des méthodes de référence (THR et gammadensimétrie).

Notons que le passage de la résistivité au degré de saturation suppose des éprouvettes de calibration homogènes. Dans ce cas, la résistivité apparente mesurée équivaut à la résistivité vraie du milieu.

6.5.1 Profils de degré de saturation obtenus avec le dispositif Echelle dans les éprouvettes de béton

Les profils de degré de saturation obtenus après calibration des mesures réalisées avec le dispositif Echelle dans l'éprouvette E6 sont présentés sur la Figure 6-20 en utilisant la configuration Transmission et sur la Figure 6-21 en utilisant la configuration Wenner. Nous observons dans les deux cas une légère diminution du degré de saturation en surface ($z = 0$) pendant le séchage à 20 °C et une diminution plus grande quand le séchage est accéléré à 45 °C. Après 28 jours de séchage à 20 °C, à $z = 5$ cm, le degré de saturation est estimé à 94% en configuration Transmission et 84% en configuration Wenner. A cette même profondeur, après 134 jours de séchage à 45 °C, le degré de saturation estimé diminue jusqu'à 63% en configuration Transmission et 54% en configuration Wenner. Cette variabilité est attribuée à la différence de sensibilités des deux configurations (Figure 4-24).

Des profils similaires sont observés dans l'éprouvette E7.

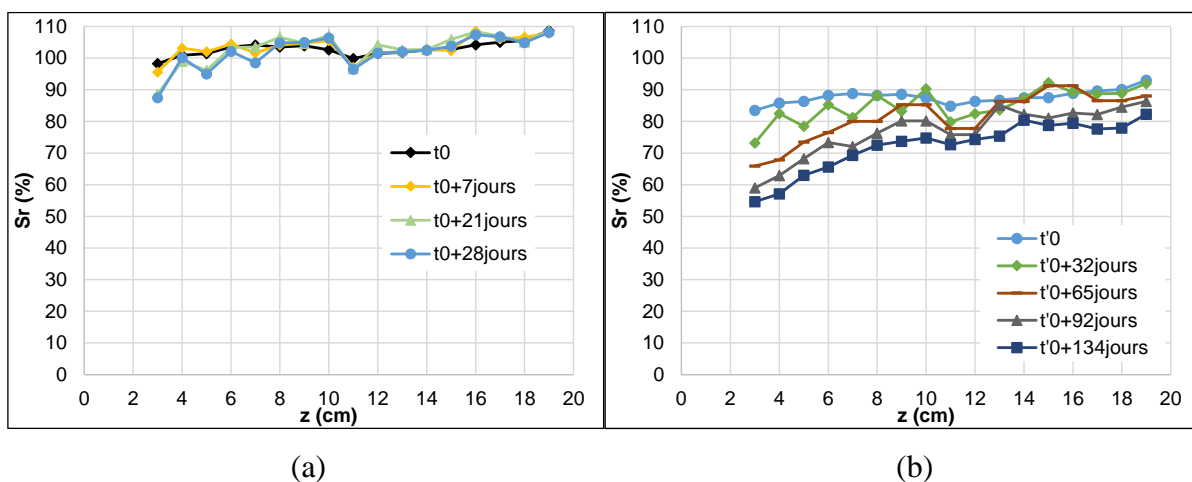


Figure 6-20 Evolution du profil de degré de saturation en fonction de la profondeur dans l'éprouvette E6 en configuration Trans pendant le séchage : (a) à 20 °C, (b) à 45 °C.

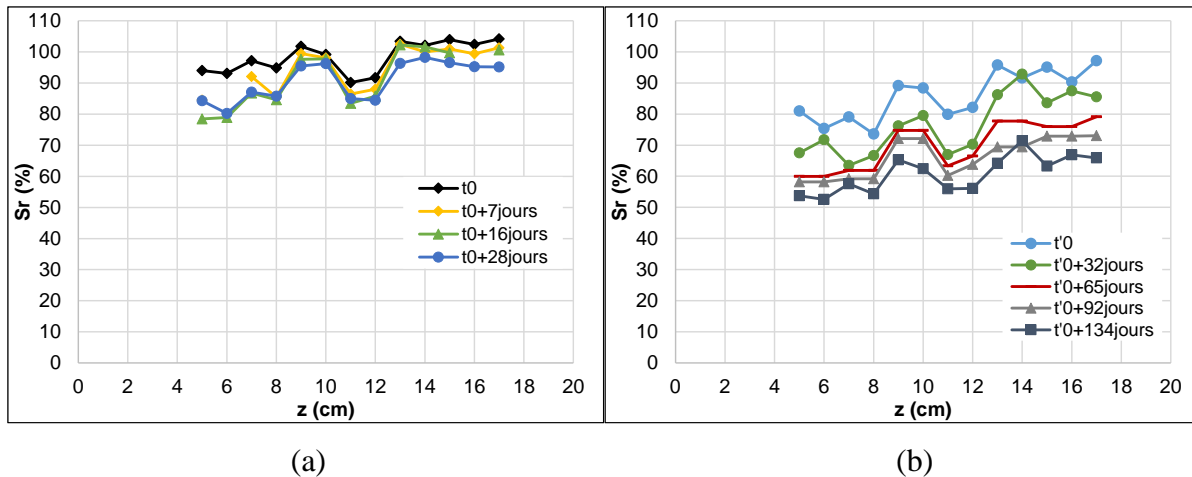


Figure 6-21 Evolution du profil de degré de saturation en fonction de la profondeur dans l'éprouvette E6 en configuration Wen pendant le séchage : (a) à 20 °C, (b) à 45 °C.

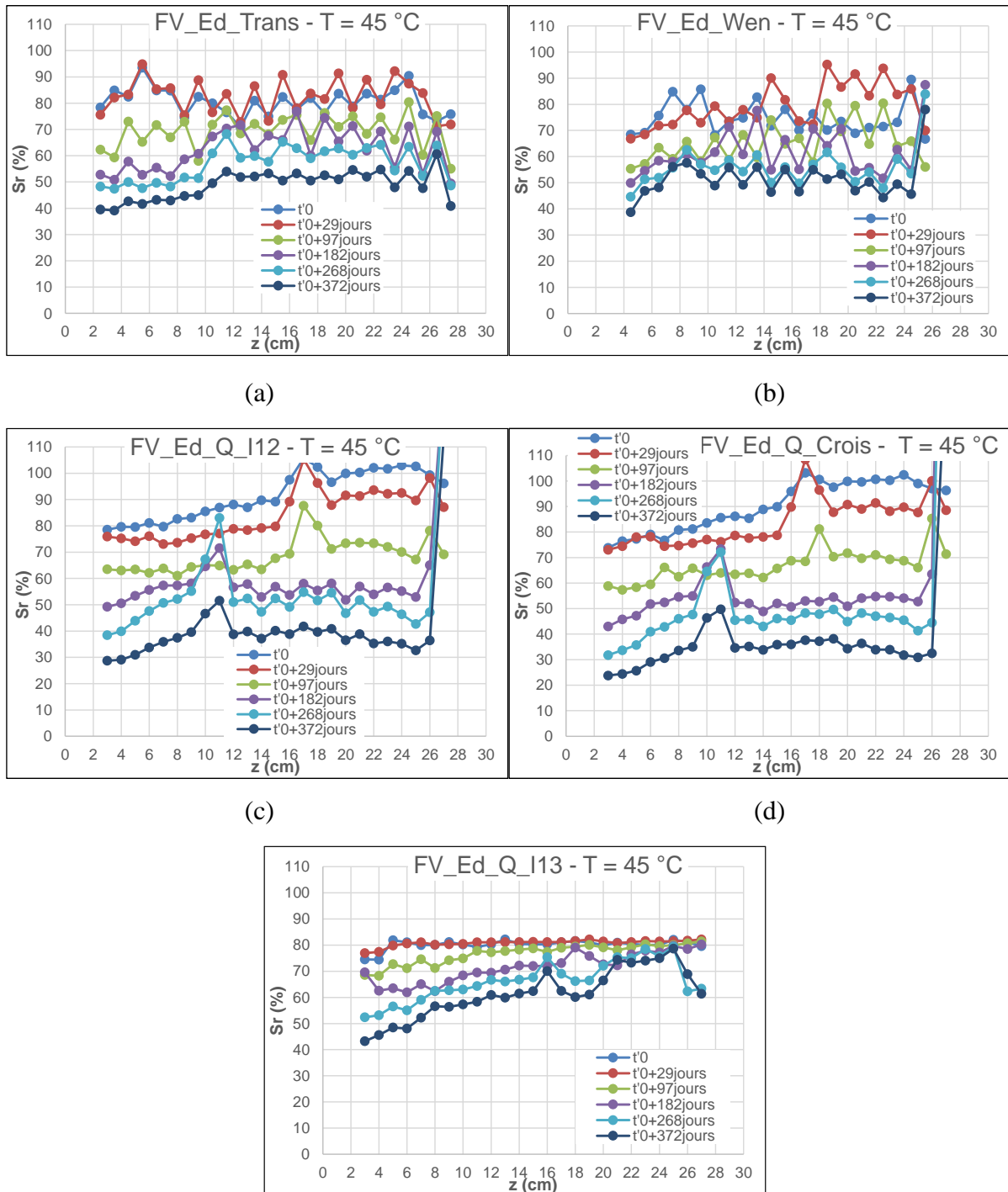
6.5.2 Profils de degré de saturation obtenus avec les dispositifs Echelle dans la dalle FV

Nous présentons dans ce paragraphe la variation des profils de degré de saturation en fonction de la profondeur pendant le séchage à 45 °C du dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations Trans, Wen, Q_I12, Q_Crois et Q_I13 (Figure 6-22).

Comme nous l'avons constaté pour les mesures de résistivités apparentes, un décalage des profils de degré de saturation est obtenu avec les configurations Q_I12 et Q_Crois par rapport aux autres configurations. A l'échéance t_0+372 jours par exemple, à cœur de la dalle (z entre 10 et 20 cm), le degré de saturation estimé vaut 50% environ avec les configurations Trans et Wen, 40% avec les configurations Q_I12 et Q_Crois et entre 60 et 70% avec la configuration Q_I13. D'une manière générale, les degrés de saturation diminuent avec le temps de séchage. Les valeurs de S_r en surface ($z = 3 \pm 1$ cm) diminuent au fur et à mesure que le séchage évolue pour atteindre 40% environ avec les configurations Trans, Wen et Q_I13, et 30% environ avec les configurations Q_I12 et Q_Crois.

Dans la Figure 6-18 (paragraphe 6.4), nous observons un gradient de résistivité apparente bien établi entre les deux surfaces opposées de la dalle (la surface exposée à l'air et la surface protégée). En convertissant les valeurs en degrés de saturation (Figure 6-22), le gradient est moins évident surtout avec les configurations Trans, Wen, Q_I12 et Q_Crois. En effet, en utilisant les courbes de calibration de résistivité (paragraphe 5.4.3), une petite variation en résistivité engendre une grande variation en degré de saturation, pour des degrés de saturation élevés : par exemple en configuration Trans à $T = 45$ °C, si la résistivité varie de 8

à 26 Ω .m, le degré de saturation varie de 100 à 72%. Inversement, une grande variation en résistivité engendre une petite variation en degré de saturation pour des faibles degrés de saturation : si la résistivité varie de 72 à 884 Ω .m, le degré de saturation ne varie que de 53 à 34%.



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figure 6-22 Evolution du profil de degré de saturation en fonction de la profondeur pendant le séchage à 45 °C du dispositif Ed dans la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.

Nous comparons par la suite ces profils à ceux provenant des méthodes de référence (THR et gammadensimétrie).

6.5.3 Profils de degré de saturation obtenus par des mesures de référence

Deux types de mesures de référence ont été choisis pour les campagnes de mesure sur les éprouvettes et sur les dalles. Le terme « mesure de référence » signifie une mesure indépendante à laquelle nous pouvons comparer les mesures obtenues avec les dispositifs noyés. La première mesure de référence est le profil d'humidité relative obtenu par les capteurs THR noyés dans les dalles, converti en profil de degré de saturation grâce aux courbes isothermes de désorption (présentées au paragraphe 5.6). La deuxième mesure de référence est le profil de densité (masse volumique) obtenu par mesure de gammadensimétrie sur une éprouvette cylindrique et converti en degré de saturation en utilisant le principe décrit au paragraphe 3.2.2.

6.5.3.1 Mesures d'humidité relative avec les capteurs THR noyés dans les dalles de béton

Les Figures 6-23 et 6-24 montrent la variation de l'humidité relative mesurée avec les capteurs thermo-hygro-métriques (THR) noyés en fonction du temps de séchage dans les dalles HA et FV respectivement. Ces figures montrent une évolution de l'humidité relative en fonction du temps très cohérente avec la cinétique de séchage des dalles.

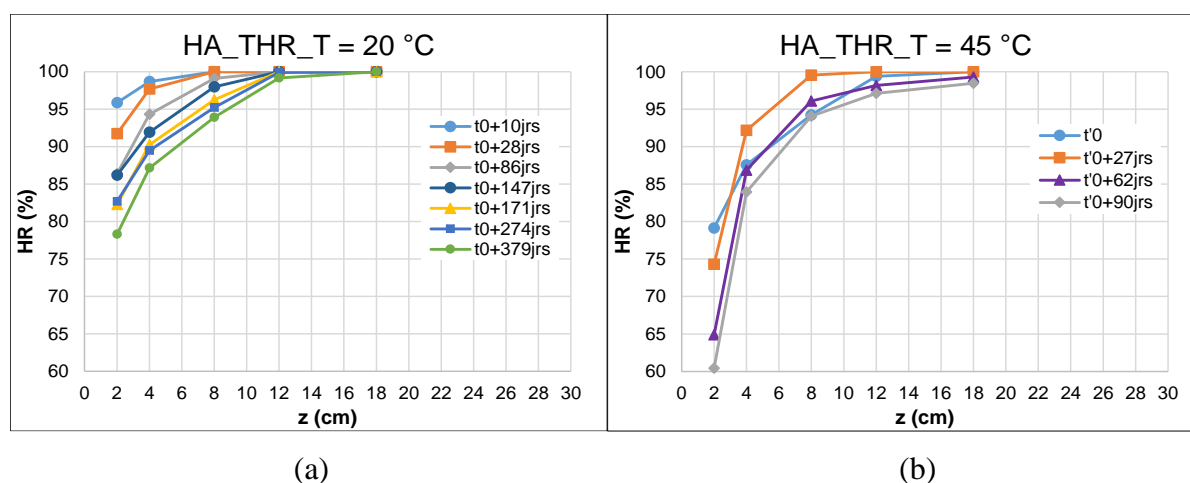


Figure 6-23 Variation du profil d'humidité relative obtenu avec les capteurs THR dans la dalle HA en fonction du temps de séchage aux températures : (a) $T = 20\text{ °C}$, (b) $T = 45\text{ °C}$

Pour la dalle HA conservée pendant 379 jours à 20 °C et 90 jours à 45 °C , la variation de l'humidité relative est observée par les trois capteurs THR les plus proches de la surface exposée au séchage ($z < 8\text{ cm}$).

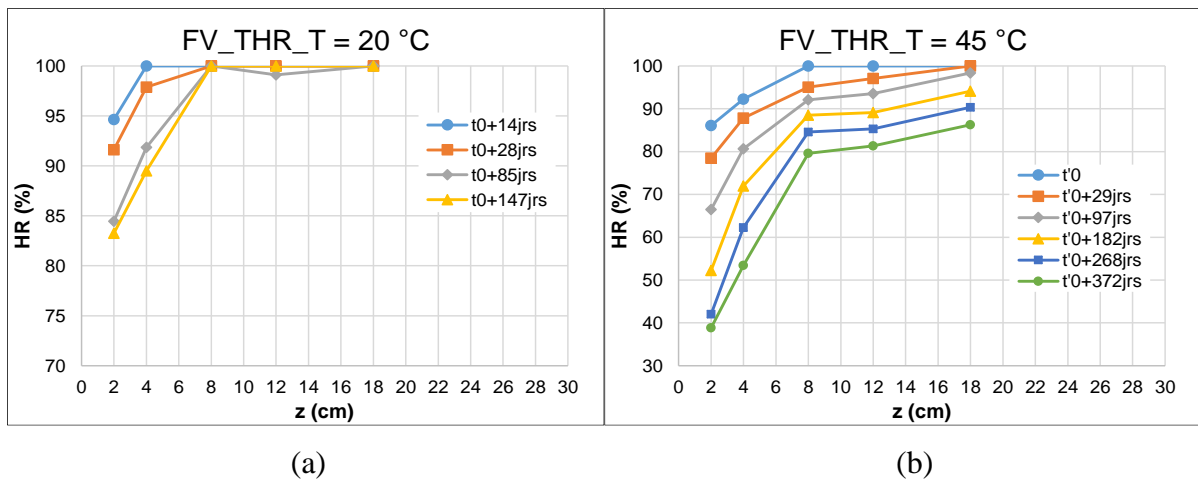


Figure 6-24 Variation du profil d'humidité relative obtenu avec les capteurs THR dans la dalle FV en fonction du temps de séchage aux températures: (a) $T = 20\text{ °C}$, (b) $T = 45\text{ °C}$

Pour la dalle FV exposée pendant 147 jours à 20 °C et 372 jours à 45 °C , l'évolution de l'humidité relative est observée jusqu'au capteur le plus éloigné de la surface séchante ($z = 18\text{ cm}$) aux trois dernières échéances. A t_0+147 jours ($T = 20\text{ °C}$), les profils de HR obtenus sur les dalles HA et FV sont comparables. A $T = 45\text{ °C}$, le séchage est plus rapide pour la dalle HA. En effet, t'_0 (temps de début de séchage à 45 °C) est différent entre les deux dalles et l'étuve est différente (dalle HA à Toulouse et dalle FV à Nantes).

Nous remarquons pour les deux dalles HA et FV que l'humidité relative augmente pendant les trois premiers jours de séchage à 45 °C avant de commencer à diminuer (Figure 6-25) : ceci peut être dû d'une part à l'augmentation de température de 20 °C à 45 °C et d'autre part aux mouvements d'eau provoqués pendant ce changement de température.

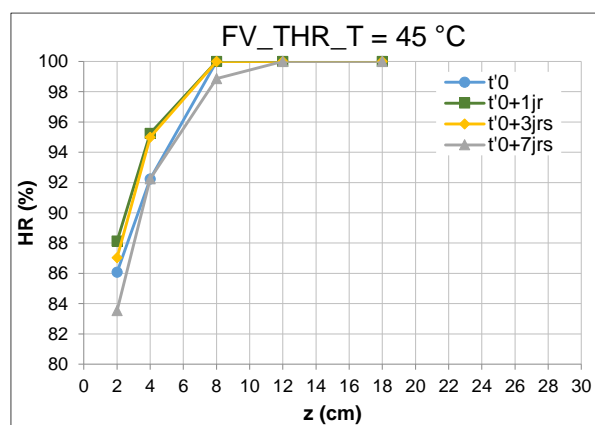


Figure 6-25 Variation du profil d'humidité relative obtenu avec les capteurs THR dans la dalle FV pendant les 7 premiers jours de séchage à 45 °C .

Les valeurs obtenues en humidité relative peuvent être converties en degré de saturation en utilisant les courbes isothermes de désorption aux différentes températures établies au

paragraphe 5.6. Sur les Figures 6-26 et 6-27, nous présentons les profils de degré de saturation obtenus pour les deux dalles HA et FV.

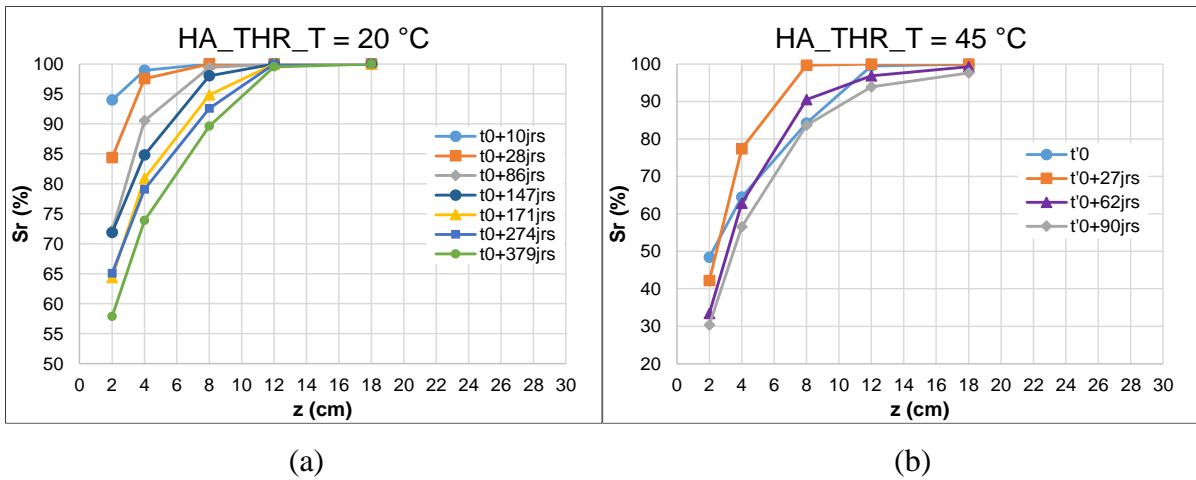


Figure 6-26 Profils de degré de saturation obtenus par conversion des mesures d'HR au moyen des courbes de désorption pour la dalle HA et pour les températures de séchage: (a) $T = 20^\circ\text{C}$, (b) $T = 45^\circ\text{C}$

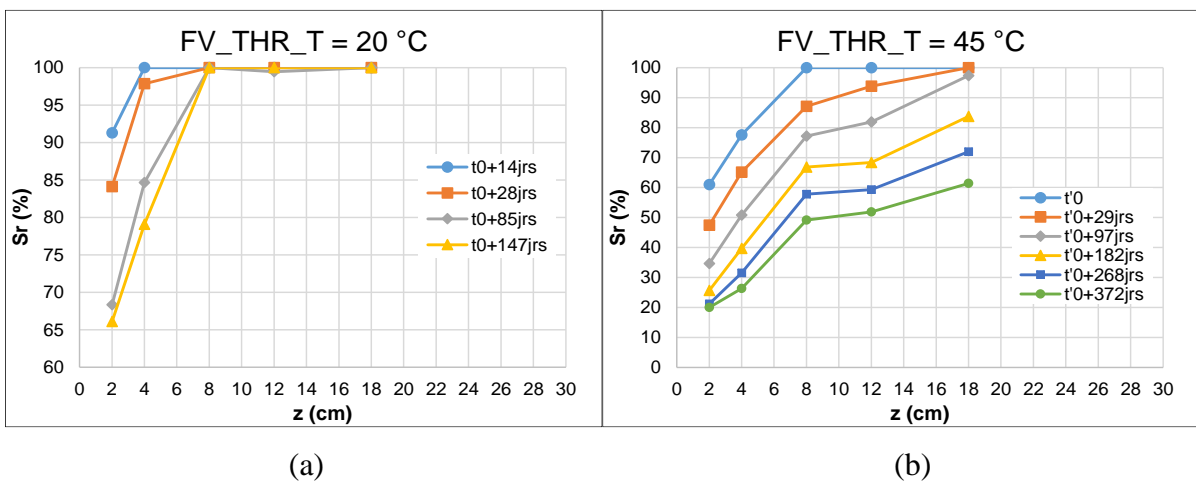


Figure 6-27 Profils de degré de saturation obtenus par conversion des mesures d'HR au moyen des courbes de désorption pour la dalle FV et pour les températures de séchage : (a) $T = 20^\circ\text{C}$, (b) $T = 45^\circ\text{C}$

Au vu des résultats des Figures 6-26 et 6-27, un gradient de teneur en eau s'établit bien entre la surface exposée au séchage et le cœur des dalles FV et HA. La cinétique de séchage est accélérée avec l'augmentation de la température. La dalle FV soumise au séchage à 45°C pendant 1 an environ, commence à sécher à cœur ($S_r = 60\%$ à une profondeur $z = 18\text{ cm}$). En revanche, la dalle HA est encore humide à cœur ($S_r = 92\%$ à une profondeur $z = 18\text{ cm}$) après trois mois de séchage.

6.5.3.2 Mesures de gammadensimétrie sur les éprouvettes

Des mesures de gammadensimétrie sur deux éprouvettes cylindriques Ø110 mm x 300 mm, γ_1 et γ_2 , à plusieurs échéances, permettent de suivre le séchage au cours du temps. Nous rappelons que les éprouvettes sont fabriquées avec le même béton que celui des dalles mais la gâchée est différente : gâchées G1 à G6 pour les dalles et gâchée G7 pour la gammadensimétrie. A noter que les durées de cure, de séchage à 20 °C et de séchage à 45 °C sont différentes entre les éprouvettes γ_1 et γ_2 et la dalle FV (Tableau 6-6). Les conditions de cure sont également différentes (cure en salle humide et cure sous eau).

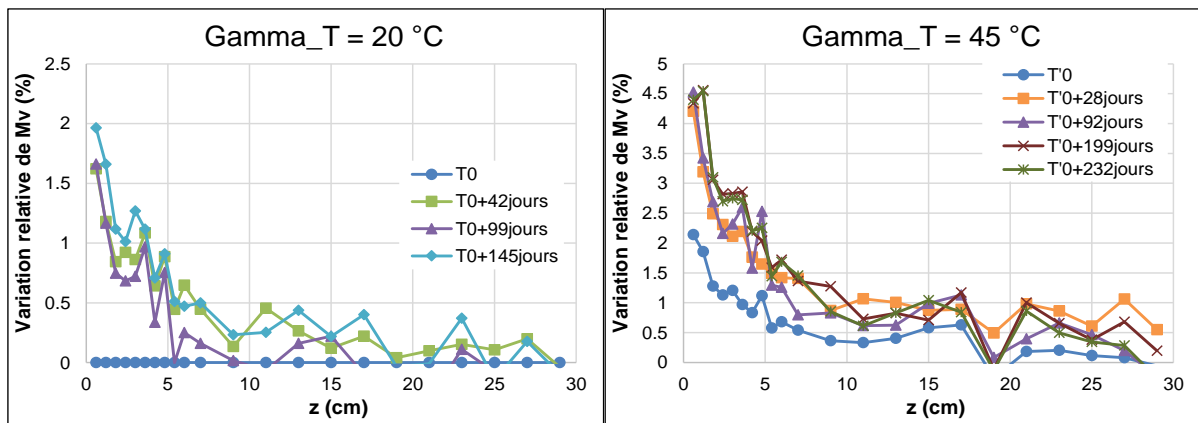
Tableau 6-6 Durée de cure, de séchage à 20 °C et de séchage à 45 °C des éprouvettes γ_1 , γ_2 et de la dalle FV

Durée	Cure	Séchage à 20 °C	Séchage à 45 °C
Eprouvette γ_1	2 mois en salle humide 2 mois sous eau	5 mois	1 mois
Eprouvette γ_2	2 mois en salle humide 2 mois sous eau	7 mois	8 mois
Dalle FV	1 mois en salle humide	5 mois	1 an

Chaque éprouvette est emballée avec du papier d'aluminium adhésif sur le pourtour et la face supérieure. Elle est ensuite soumise à des essais de gammadensimétrie à différentes échéances. L'incertitude des valeurs de gammadensimétrie est estimée à 0,5% (Villain and Thiery, 2006). Nous avons calculé les variations relatives de densité pour chaque profondeur et chaque échéance au cours des deux processus de séchage à 20 °C et à 45 °C par rapport à un état initial (temps de référence). Les résultats sont représentés sur la Figure 6-28, où T0 marque l'état initial saturé et le début du séchage du béton à 20 °C et T'0 = T0 + 146 jours le début du séchage du béton à 45 °C.

La Figure 6-28 présente les profils de variation relative de la masse volumique obtenus pendant le séchage de l'éprouvette γ_2 à T = 20 °C (a) puis à T = 45 °C (b).

Une augmentation de la variation relative de densité est observée au fil du temps correspondant à la perte d'eau durant le séchage. La variation relative de densité au niveau de la surface exposée au séchage à 20 °C est égale à 2% à T0 + 145 jours. A 45 °C, la variation relative de densité en surface varie entre 2,2% et 4,5% après 232 jours. Le séchage du béton est donc lent, même après l'augmentation de la température.

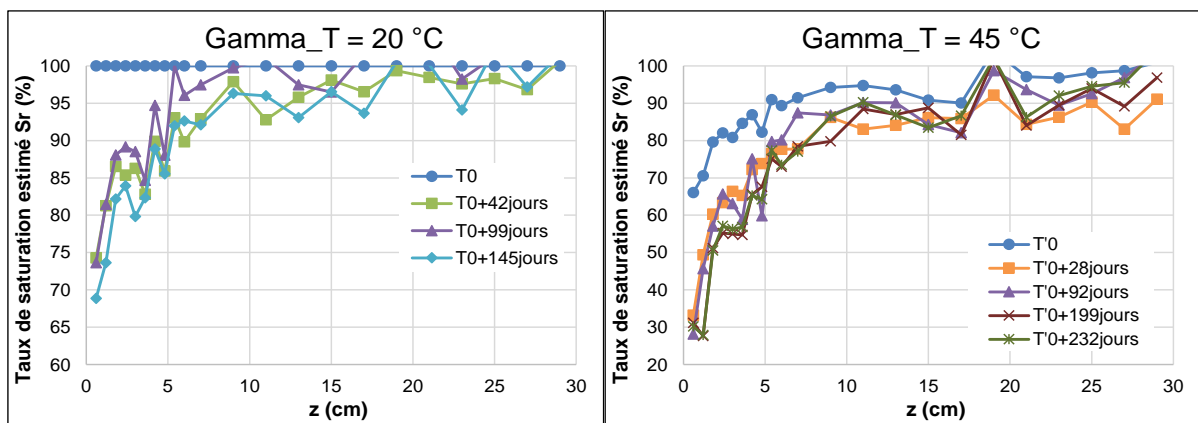


(a)

(b)

Figure 6-28 Variation relative de densité en fonction de la profondeur lors du séchage de l'éprouvette γ_2 : (a) à 20°C , (b) à 45°C .

Les résultats de variation de la masse volumique peuvent être convertis en profils de degré de saturation (Figure 6-29) en utilisant le principe décrit au paragraphe 3.2.2.



(a)

(b)

Figure 6-29 Evolution du degré de saturation en fonction de la profondeur lors du séchage de l'éprouvette γ_2 : (a) à 20°C , (b) à 45°C .

La Figure 6-29 montre que le taux de saturation au niveau de la surface exposée au séchage à 20°C diminue jusqu'à 70% environ sur le premier centimètre à T0 + 145 jours. A 45°C , le taux de saturation en surface varie entre 66% et 29% après 232 jours de séchage.

6.5.3.3 Comparaison des profils obtenus avec les capteurs THR et le gammadensimètre

Le profil de degré de saturation obtenu avec les capteurs THR est comparé à celui obtenu avec le gamma-densimètre à l'échéance t_0+232 jours (Figure 6-30).

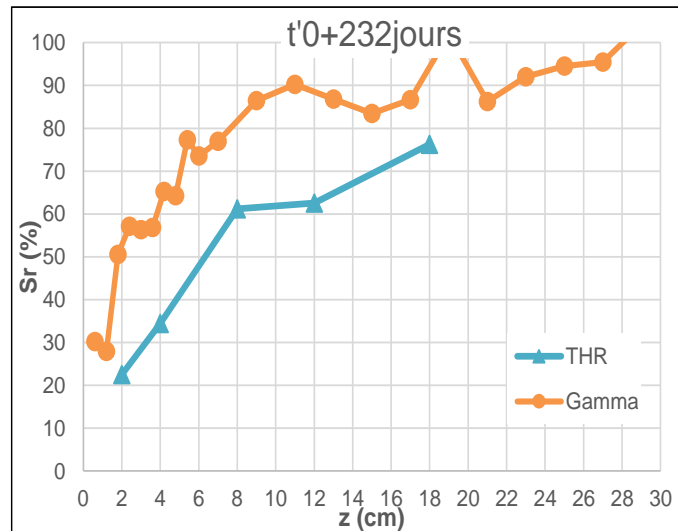


Figure 6-30 Comparaison entre les profils de degré de saturation obtenus avec les capteurs THR et le gammadensimètre lors du séchage de la dalle FV à t'0+232 jours.

Nous remarquons d'après la Figure 6-30 que les mesures de référence (THR et gammadensimétrie) ne sont pas corrélées entre elles à l'échéance t'0+232 jours, bien qu'elles révèlent des tendances identiques.

D'une part, l'inconvénient des sondes THR est le besoin de calibrer les mesures d'humidités relatives HR en degrés de saturations S_r en passant par les courbes isothermes de désorption réalisées à l'état d'équilibre sur d'autres corps d'épreuve. L'utilisation de ces courbes pour obtenir des degrés de saturation lors d'un processus dynamique de séchage ainsi que la fiabilité du positionnement des sondes THR noyées dans des cavités de 12 mm de diamètre à une profondeur donnée est discutable.

D'autre part, l'inconvénient de la gammadensimétrie est la différence de matériau (gâchée différente), de géométrie, de cure et de séchage entre les éprouvettes testées dans le gammadensimètre et la dalle FV. L'avantage de cette méthode est que la mesure est directe et ne nécessite pas de calibration.

Les mesures de référence peuvent donc constituer un « encadrement » des profils mesurés par les dispositifs conçus.

6.5.4 Comparaison des profils de degré de saturation obtenus avec les dispositifs Echelle et les mesures de référence

Les profils de degré de saturation obtenus avec les capteurs THR et le gamma-densimètre sont comparés aux profils obtenus par mesures de résistivités apparentes du dispositif Echelle noyé

dans la dalle FV en utilisant les configurations Trans, Wen, Q_I12, Q_Crois et Q_I13. Cette comparaison est faite à l'échéance $t'0+232$ jours (Figure 6-31).

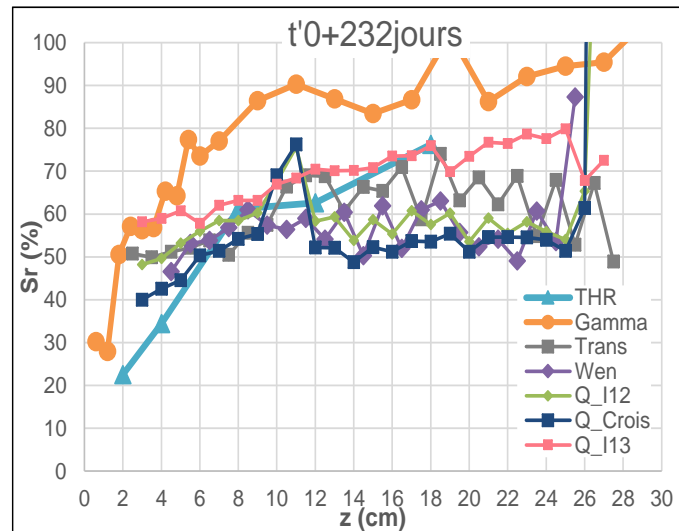


Figure 6-31 Variation du degré de saturation en fonction de la profondeur lors du séchage de la dalle FV à $t'0+232$ jours.

Tout d'abord, nous comparons les profils de degré de saturation obtenus à partir des mesures de résistivité avec les profils déduits des mesures avec le gammadensimètre (Figure 6-31). Nous remarquons que les mesures de résistivité indiquent des degrés de saturations inférieurs à ceux de la méthode de référence qu'est le gammadensimètre. Cette différence peut être expliquée d'une part par l'incertitude des courbes de calibration (une petite variation en résistivité engendre une grande variation en degré de saturation et inversement) et d'autre part par la différence entre les conditions de mesure, sur une éprouvette pour la gammadensimétrie et directement sur la dalle pour les capteurs de résistivité et THR. Les différences inévitables de matériau et de géométrie (conditions de séchage en particulier) peuvent expliquer les écarts observés.

Ensuite, la comparaison des profils obtenus par les résistivités et ceux obtenus par les capteurs THR indique une différence surtout pour les faibles degrés de saturation, c'est-à-dire dans la zone proche de la surface directement exposée à l'air pour $z < 6$ cm. La résistivité apparente surestime le degré de saturation par rapport aux capteurs THR à faible degré de saturation pour $z < 6$ cm et sous-estime le degré de saturation à cœur pour $z > 12$ cm. Nous attribuons ces différences à la courbe isotherme de désorption (paragraphe 5.6), qui conduit à surestimer le degré de saturation à faible humidité relative.

Globalement, les profils de degré de saturation sont proches de ceux obtenus par les capteurs THR noyés dans la dalle, ayant subi les mêmes expositions environnementales et les mêmes

contraintes techniques de coulage, de cure et de séchage. Entre $z = 0$ et $z = 8$ cm, les profils de degré de saturation se situent entre les deux mesures de référence, ce qui est prometteur pour la technique développée. A cœur, les profils obtenus par mesure de résistivité surestiment le séchage, probablement de parla méthode de calibration des mesures, réalisées sur d'autres corps d'épreuve.

En outre, d'après la Figure 5-22, l'éprouvette E1 servant de calibration, est moins homogène à $S_r = 34\%$, ainsi une grande variation de la résistivité apparente est observée en fonction de la profondeur engendrant un écart-type élevé. Afin de prendre en compte le mieux possible cette hétérogénéité, nous traçons les courbes de calibration Min (Moyenne – Ecart-type) et Max (Moyenne + Ecart-type) pour toutes les configurations à différentes températures. La Figure 6-32 montre un exemple des courbes de calibration (Moy, Min et Max) de la résistivité en fonction du degré de saturation à $T = 45$ °C en utilisant la configuration Trans.

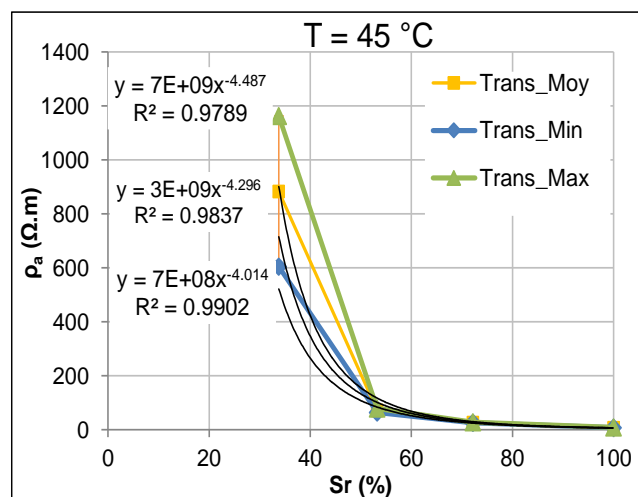


Figure 6-32 Courbes de calibration de la résistivité en fonction du degré de saturation avec le dispositif Echelle à $T = 45$ °C en utilisant la configuration Trans : Moy, Min et Max.

Les profils de degré de saturation Min et Max obtenus par mesures de résistivités apparentes du dispositif Echelle noyé dans la dalle FV sont ensuite tracés et comparés aux profils de degré de saturation obtenus avec les capteurs THR et le gammadensimètre (Figure 6-33).

Nous remarquons d'après la Figure 6-33 que les valeurs de degrés de saturation en surface (entre $z = 0$ et $z = 8$ cm), pour toutes les configurations, se situent entre les deux mesures de référence. A cœur, la configuration Q_I13 est la plus corrélée avec les mesures de référence ; les valeurs sont plus proches des mesures THR. Pour les configurations Q_I12 et Q_Crois, l'enveloppe (Min, Max) des profils de S_r est plus large, révélant une forte incertitude des

mesures pour ces deux configurations particulières où le courant est injecté entre deux électrodes situées de part et d'autre du CI.

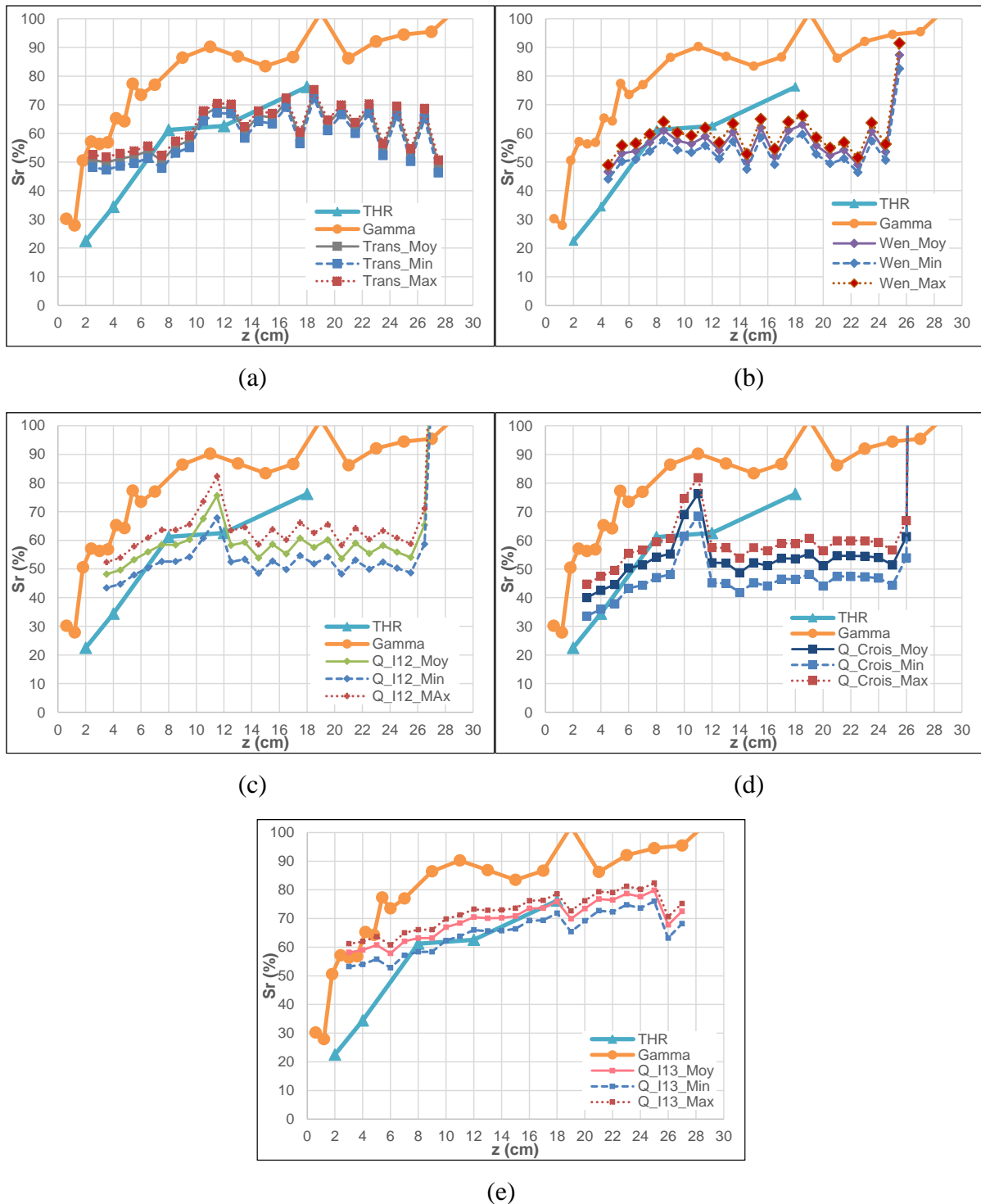


Figure 6-33 Comparaison des profils de degré de saturation (Moy, Min et Max) obtenus par mesures des résistivités apparentes du dispositif Echelle avec les profils obtenus avec le gammadensimètre et les capteurs THR pour la dalle FV en utilisant les configurations : (a) Trans, (b) Wen, (c) Q_I12, (d) Q_Crois, (e) Q_I13.

Les profils mesurés par le dispositif Echelle suivent la tendance indiquée par les mesures de référence. L'inversion des profils de résistivité apparente pour remonter aux profils de résistivité vraie du milieu pourrait améliorer la forme du gradient en prenant en compte le séchage important en surface, notamment pour la configuration Transmission (grilles en surface).

6.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons analysé les résultats des mesures de résistivités apparentes obtenues avec les dispositifs conçus, Echelle et Anneau, dans des éprouvettes et dans les dalles HA et FV. Une caractérisation des dispositifs en répétabilité et reproductibilité a été réalisée sur les éprouvettes et sur les dalles montrant des mesures bien répétables et reproductibles pour les deux dispositifs. En revanche, concernant le dispositif Anneau, après mise en œuvre dans les dalles en béton, la résistivité apparente mesurée en faisant le tour complet de l'Anneau est dispersée, ce qui est difficilement explicable à ce stade. C'est pourquoi les résultats des dispositifs Anneau ne sont que partiellement exploités dans ce mémoire. Les dispositifs Echelle serviront à déterminer les profils de résistivité dans la dalle.

Un suivi du profil de résistivité apparente obtenu avec les dispositifs Echelle dans chaque dalle a été réalisé à différentes périodes de séchage. Les données de résistivités apparentes sont sensibles à l'évolution du béton en cure et lors du séchage au fil du temps. Ces résultats de mesures apparentes ont été transformés en profils de degré de saturation en utilisant les courbes de calibration en faisant l'hypothèse que les résistivités apparentes mesurées sur les éprouvettes de calibration correspondent aux résistivités vraies.

Les profils de degré de saturation obtenus avec les dispositifs Echelle ont été encadrés par les profils obtenus avec les capteurs d'humidité relative THR et ceux obtenus par gammadensimétrie. Les profils de degré de saturation sont légèrement plus proches de ceux obtenus par les capteurs THR noyés dans la dalle FV, ayant subi les mêmes conditions d'exposition, de fabrication et de cure, que des profils fournis par la gammadensimétrie sur un corps d'épreuve différent.

Nous constatons d'après ces différentes comparaisons que la mesure d'un profil de teneur en eau dans une structure épaisse en béton n'est pas triviale. Par rapport à l'application visée, le profil de degré de saturation obtenu par le dispositif Echelle, conçu dans cette thèse, est

centimétrique sur toute la profondeur de la structure, au-delà du béton d'enrobage et du lit d'armatures, et donne des résultats cohérents avec l'évolution du séchage du béton entre $z = 0$ et $z = 8$ cm de profondeur. Les erreurs de quantification des profils de degré de saturation sont attribuées à l'incertitude des courbes de calibration obtenues en moyennant un profil de résistivité sur des éprouvettes de béton 11x22 cm. Par ailleurs à l'avenir, l'inversion des profils de résistivité apparente mesurée par le dispositif Echelle pour remonter aux profils de résistivité vraie du milieu pourrait permettre d'affiner les interprétations.

Chapitre 7 Conclusions et perspectives

La durabilité d'une structure en béton armé caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage visées à la conception et à maintenir certaines propriétés du matériau, sur la durée de vie de la structure, dans des conditions environnementales qui peuvent varier au fil du temps. Les principales dégradations des structures en béton armé sont dues à la corrosion des armatures sachant que la teneur en eau est un des éléments principaux de l'ensemble des réactions chimiques concernées (dissolution du CO_2 , diffusion des ions chlorures...). La teneur en eau est donc un paramètre clé pour la durabilité des ouvrages en béton armé.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressée au besoin de suivre l'état hydrique des structures épaisses en béton armé (alvéoles MAVL de l'Andra dont l'épaisseur est de l'ordre de 60 cm) par mesures distribuées de résistivité électrique. L'intérêt majeur de l'utilisation de cette méthode vient de sa grande sensibilité à la teneur en eau, propriété qui conditionne la durabilité des bétons armés. Deux dispositifs de mesure noyés dans le béton pour la mesure de résistivité sont développés dans ce travail. A la différence des méthodes mises en œuvre à partir de la surface du matériau, la profondeur d'investigation n'est pas limitée à quelques centimètres et le contact électrode/béton est de meilleure qualité et plus pérenne, ce qui est favorable pour le monitoring.

Ainsi, l'objectif principal de ce travail a consisté à développer des dispositifs de mesure et une méthodologie permettant l'obtention des profils de teneur en eau à partir des mesures de résistivité électrique dans des structures épaisses en béton armé en utilisant des capteurs noyés. Pour ce faire, plusieurs sous-objectifs ont été définis au début de ce mémoire.

7.1 Principaux résultats obtenus et enseignements tirés

Les résultats obtenus répondent aux différents objectifs du travail de recherche. Les différents axes de développement des capteurs ont été présentés tout au long du manuscrit.

- Conception numérique d'un dispositif noyé de mesure de résistivité pour la caractérisation d'un profil de résistivité dans une structure en béton.

Les travaux menés concernent la conception numérique par une modélisation par éléments finis de différentes géométries de dispositifs noyés. Deux dispositifs sont retenus : Echelle et

Anneau. Le dispositif Echelle permet d'obtenir une résolution centimétrique du profil de résistivité, sans faire appel à un processus d'inversion des données sur quasiment toute l'épaisseur d'une structure, et sa forme favorise l'ancrage dans le béton. Le dispositif Anneau présente l'avantage de moyenniser plusieurs mesures pour chacune des configurations d'électrodes à une même profondeur donc de moyenniser la variabilité naturelle du matériau. La réponse de chaque dispositif (résistivité apparente) est comparée à celle d'un profil de résistivité « vraie » imposé dans le modèle numérique. Les résultats montrent que les profils de résistivités apparentes simulés pour les différentes configurations de chaque dispositif sont assez proches du profil de résistivité vraie imposé. De plus, une modélisation des dispositifs au centre d'une maille d'armatures montre que la présence des armatures en état de corrosion passif n'a pas une influence significative sur les mesures de résistivités apparentes. Nous proposons alors de positionner les dispositifs au centre des mailles d'armatures afin de réduire les éventuelles perturbations de la mesure par le ferrailage. Les résultats obtenus attestent donc de la capacité des dispositifs à caractériser un profil de résistivité électrique apparente, dans des structures épaisses en béton armé, en s'approchant de la résistivité vraie sans avoir recours à l'inversion.

- Validation expérimentale des dispositifs de mesure retenus.

Les dispositifs Echelle et Anneau sont réalisés en circuit imprimé ce qui offre l'avantage d'une bonne précision géométrique dans la fabrication, d'un faible coût et d'une réduction des contraintes de câblage. Des mesures expérimentales ont été effectuées dans des électrolytes de conductivités connues et les dispositifs ont prouvé leur capacité à déterminer les valeurs de résistivité avec précision. De plus, une validation des dispositifs est réalisée sur des éprouvettes cylindriques en béton et sur deux dalles en béton armé de 30 cm d'épaisseur, l'une armée avec des barres en acier carbone (HA), l'autre avec des barres en fibre de verre (FV). La répétabilité et la reproductibilité des mesures sont vérifiées sur les différents corps d'épreuve (éprouvettes et dalles) pour les deux dispositifs de mesure, aux états saturé et non saturé. Un suivi des profils de résistivité électrique en fonction de la profondeur est réalisé sur les corps d'épreuve soumis au séchage grâce au dispositif échelle. Les mesures de résistivité augmentent dans le temps montrant leur sensibilité à l'évolution du béton en cure et lors du séchage. Les contacts sont bons. Néanmoins, une augmentation des résistances de contact est observée sur le dispositif Echelle en mode transmission du fait d'une trop grande proximité des électrodes d'injection (grilles) avec la surface. Pour une application sur site, nous

recommandons de positionner les grilles métalliques suffisamment profondément dans le béton pour conserver un bon contact électrique au cours du monitoring

- Proposition d'une méthodologie de calibration permettant de remonter aux profils de teneur en eau en fonction de la profondeur.

Nous avons présenté une procédure visant à obtenir des profils de teneur en eau en fonction de la profondeur, à partir des mesures de résistivité obtenues avec les dispositifs conçus. La procédure proposée implique l'utilisation des courbes de calibration reliant la résistivité à la teneur en eau en faisant l'hypothèse que les résistivités apparentes mesurées sur les éprouvettes de calibration correspondent aux résistivités vraies. Tout d'abord, nous avons réalisé des courbes de calibration avec une cellule cylindrique de résistivité (Du Plooy et al., 2013) pour des éprouvettes conditionnées à différents degrés de saturation et ensuite avec le dispositif Echelle pour d'autres éprouvettes conditionnées à différents degrés de saturation. Des différences sont observées entre les résultats des deux méthodes de calibration. Ces différences peuvent s'expliquer par le volume supérieur de béton utilisé pour le dispositif Echelle impliquant une homogénéisation plus difficile à établir sur la hauteur de l'éprouvette. De plus, les volumes investigués diffèrent entre la cellule cylindrique de résistivité et le dispositif Echelle à cause de la dimension et de la forme des électrodes respectives. La comparaison des deux méthodes de calibration conduit à choisir celle utilisant le dispositif Echelle lui-même, à 20 °C et à 45 °C, pour toutes les configurations de mesure. En effet, cette méthode de calibration se rapproche le plus des conditions de mise en œuvre de la chaîne de mesure dans la structure en vraie grandeur.

- Comparaison des profils de teneur en eau obtenus avec les dispositifs conçus dans cette thèse avec les profils de référence.

Les profils de degré de saturation obtenus avec les dispositifs Echelle sont comparés à deux profils de référence obtenus d'une part par les capteurs thermohygrométriques (THR) noyés dans les dalles et d'autre part par gammadensimétrie sur des éprouvettes. Les profils de degré de saturation obtenus avec les dispositifs Echelle ont été encadrés par les profils obtenus par les mesures de référence et donnent des résultats cohérents avec l'évolution du séchage du béton. Les profils de degré de saturation sont plus proches de ceux obtenus par les capteurs THR noyés dans la dalle FV. Les différences constatées entre ces trois profils (le profil de résistivité et les deux profils de référence) peuvent s'expliquer par :

- les incertitudes sur les courbes de calibration obtenues en moyennant un profil de résistivité avec le dispositif Echelle sur des éprouvettes de béton 11x22 cm. En effet, l'homogénéisation est difficile avec des éprouvettes de cette taille surtout à faibles degrés de saturation,
- la différence des conditions de cure et de séchage entre l'éprouvette témoin de gammadensimétrie et la dalle FV qui peut entraîner une variabilité du matériau, notamment de sa microstructure,
- l'incertitude dans la détermination de l'isotherme de désorption, l'ajustement du modèle de Van Genuchten et la conversion des humidités relatives en degré de saturation.

7.2 Perspectives

À l'issue de cette étude, différentes perspectives se dégagent afin d'enrichir et d'accompagner les résultats présentés :

- La mesure de résistivité électrique, sensible à un certain volume de matériau englobant les électrodes de mesure, est supposée être représentative de la valeur de résistivité « vraie » au centre des électrodes de potentiel. Pour les configurations Transmission et Wenner, cette hypothèse est en partie validée par la modélisation numérique et par un calcul de sensibilité. Cependant, cette prise en compte de l'information et sa représentation dans l'espace ne permet pas toujours de reconstruire des profils unidirectionnels (1D) de résistivité de la manière la plus précise. Une inversion des profils de résistivité apparente mesurée pour remonter aux profils de résistivités vraies du milieu pourrait donc améliorer la détermination des profils vrais. L'inversion pourra s'appuyer sur le code modélisation numérique du problème direct développé dans la thèse (par méthode des éléments finis) et sur les codes d'inversion récemment développés (Fares, 2015) pour affiner numériquement l'interprétation des mesures acquises sur différentes configurations possibles.

- Les résultats obtenus avec le dispositif Anneau dans les dalles présentent une grande variabilité qui n'est pas observée dans les éprouvettes 11x22 cm. La bonne répétabilité et reproductibilité des dispositifs dans les deux dalles HA et FV ainsi que la bonne sensibilité au séchage permettent d'écarter l'hypothèse de possibles problèmes de contact ou de proximité de granulats. Des essais complémentaires sont nécessaires pour expliquer les résultats et comprendre les phénomènes liés à la réponse de ces dispositifs dans les dalles. Nous

proposons des essais dans différentes solutions salines et dans des éprouvettes de béton en comparant deux types de conditions pour la connectique du capteur : noyée et non noyée. Nous envisageons aussi de fabriquer un nouveau capteur de même géométrie que le capteur Anneau (8 électrodes disposées tous les 45° sur un cercle), mais de conception simple ne faisant pas intervenir de circuit imprimé (e.g. électrodes métalliques et fils conducteurs sur un anneau en matériau isolant), et de le soumettre aux mêmes essais que le capteur Anneau en circuit imprimé pour comparer les réponses des deux types de capteurs (en circuit imprimé ou en matériau isolant).

- Les résultats expérimentaux ont été acquis lors d'essais de laboratoire où les conditions de mise en œuvre étaient bien contrôlées, ce qui risque de ne pas être le cas sur site. Une validation en conditions réelles demeure une étape nécessaire. Pour lever ce verrou et finaliser la validation de nos capteurs, nous implémenterons prochainement les dispositifs Echelle et Anneau sur site (notamment dans les structures de stockage des déchets radioactifs de l'Andra) pour nous confronter aux difficultés de mise en œuvre sur chantier.

- Les contacts électrodes/matériau ont été vérifiés sur la durée de la thèse. Une étude détaillée de la durabilité du dispositif dans le béton et de l'effet du dispositif sur la résistance du béton est intéressante pour l'application à long terme. Des essais de simulation du vieillissement ou de dégradation d'éprouvettes de béton contenant le dispositif en solution agressive seraient pertinents et complémentaires. En outre, une étude sur les matériaux utilisés pour le capteur d'un point de vue de la durabilité est intéressante. Les électrodes peuvent être en or (matériau noble) et la conception du circuit imprimé pourrait être améliorée (nombre de couches et de pistes, matériaux différents) en vérifiant les faibles coûts de fabrication pour améliorer la diffusion de cette technologie.

- Le temps d'homogénéisation des éprouvettes de calibration, surtout à faible degré de saturation, n'était pas suffisant. Nous proposons d'augmenter ce temps ou de réaliser une étude complémentaire avec le dispositif Echelle qui permet de voir le profil de résistivité sur toute la profondeur et de conclure sur le temps d'homogénéisation nécessaire pour une éprouvette.

- Les phénomènes de polarisation provoquée (polarisation du milieu, séparation et réorientation de charges) pourraient être utilement exploités dans la suite de ce travail afin

d'améliorer la modélisation numérique et le traitement des mesures de résistivités brutes. Nous proposons dans un premier temps de mesurer la chargeabilité du milieu pour en tester la sensibilité à la teneur en eau.

- A long terme, les structures en béton armé peuvent subir plusieurs dégradations (carbonatation, pénétration des ions chlorures surtout pour les ouvrages maritimes ...) modifiant la salinité de la solution interstitielle. Les informations recueillies uniquement par des mesures de résistivité électrique peuvent être insuffisantes pour caractériser précisément un profil de teneur en eau. Nous estimons que l'utilisation combinée de la résistivité et d'autres techniques de CND sensibles à la teneur en eau (les sondes capacitives par exemple) est intéressante pour confirmer l'existence du profil de teneur en eau et donc pour établir un diagnostic plus précis.

- Les dispositifs conçus peuvent être utilisés pendant la construction de nouvelles structures en béton armé, au moment du coulage du béton, pour caractériser le béton à jeune âge et suivre son séchage sur toute l'épaisseur de la structure. En outre, une application de ces dispositifs de mesure sur des ouvrages existants revêt une grande importance. Nous proposons de noyer les dispositifs dans une pâte de ciment qui sera collée au béton et de développer une méthodologie de calibration correspondante. Il faut vérifier que les caractéristiques de la pâte soient équivalentes à celles du béton pour que les phénomènes décrits soient représentatifs de ce qui se passe dans le béton. Une étude sur la colle utilisée est complémentaire. De plus, l'application des dispositifs conçus peut s'étendre à d'autres domaines, outre le béton armé : nous proposons l'utilisation des capteurs pour des applications impliquant des transferts hydriques dans le sol à faible profondeur (< 1 m). Cela concerne par exemple les problématiques de gestion du stress hydrique pour l'optimisation des rendements agricoles ainsi que la production de lixiviats dans les centres de stockage des déchets. En effet pour ces deux applications une faible modification du dispositif Echelle (voir dispositif Barrette) permettrait une insertion dans des sols meubles sans modification des propriétés des milieux en place.

Bibliographie

- Abbas, Y., Pargar, F., Olthuis, W., Van den Berg, A. (2014). Activated carbon as a pseudo-reference electrode for potentiometric sensing inside concrete. *Procedia engineering*, 87, 1437–1440.
- Addis, B. J., Owens, G., Fulton, F. S. (2001). *Fulton's concrete technology*. Cement & Concrete Institute, Midrand, South Africa.
- Adous, M. (2006). *Caractérisation électromagnétique des matériaux traités de génie civil dans la bande de fréquence 50 MHz - 13 GHz*. Thèse de l'Université de Nantes, LCPC, Nantes, France.
- AFPC–AFREM. (1997). *Recommended method for durability indicators*. AFPC-AFREM, Paris, France.
- Alhaji, M. A., Palma-Lopes, S., Villain, G. (2019). Accounting for steel rebar effect on resistivity profiles in view of reinforced concrete structure survey. *Construction and Building Materials*, 223, 898–909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.208>
- Andrade, C., Polder, R., Basheer, M. (2007). Non-destructive methods to measure ion migration. *RILEM TC*, 91–112.
- Andrade, Carmen. (2010). Electrical resistivity as microstructural parameter for the modelling of service life of reinforced concrete structures. *2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, 4-6 October 2010*, Delft, The Netherlands, 10p.
- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, p. 54–62.
- Badr, J., Fargier, Y., Deby, F., Villain, G., Palma-Lopes, S., Delepine-Lesoille, S., Cottineau, L. M. (2018). Design and implementation of embedded sensors based on electrical resistivity to determine water content profiles in thick concrete structures. *9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2018), 10-13 July 2018*, Manchester, United Kingdom, 10p.
- Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Villain, G. (2019a). Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226>

- Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Villain, G. (2019b). Conception et validation d'un capteur multi-électrodes pour évaluer les profils de résistivité dans le béton (vidéo). *37èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC (RUGC 2019), 19-21 Juin 2019, Nice, France.*
- Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Villain, G. (2019c). Conception et validation d'un capteur multi-électrodes pour évaluer les profils de résistivité dans le béton. *20 ème édition des Journées scientifiques, Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton ((RF)²B 2019), 1-3 Juillet 2019, Bruxelles, Belgique.*
- Balayssac, J.-P., Garnier, V. (Éd.). (2017). *Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures.* Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Balayssac, J.-P., Garnier, V., Villain, G., Sbartai, Z.-M., Dérobert, X., Piwakowski, B., ... Salin, J. (2015). An overview of 15 years of French collaborative projects for the characterization of concrete properties by combining NDT methods. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2015), 15-17 September 2015, Berlin, Germany, 15–17.*
- Balayssac, J.-P., Laurens, S., Arliguie, G., Breysse, D., Garnier, V., Dérobert, X., Piwakowski, B. (2012). Description of the general outlines of the French project SENSO—Quality assessment and limits of different NDT methods. *Construction and Building Materials, 35,* 131–138.
- Baroghel-Bouny, V. (1994). *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons: Méthodes, analyse, interprétations.* LCPC, Paris, France, 468p.
- Baroghel-Bouny, V. (Éd.). (2004). *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 : état de l'art et guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité.* AFGC, Paris, France, 252p.
- Baroghel-Bouny, V., Kinomura, K., Thiery, M., Moscardelli, S. (2011). Easy assessment of durability indicators for service life prediction or quality control of concretes with high volumes of supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites, 33(8),* 832-847. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.007>
- Baroghel-Bouny, V., Nguyen, T. Q., Dangla, P. (2009). Assessment and prediction of RC structure service life by means of durability indicators and physical/chemical models.

- Baron, J., Ollivier, J., Desdevises, A., Buil, M., Detriche, C. H. (1992). *La durabilité des bétons*. ENPC, Paris, France, 453p.
- Bässler, R., Mietz, J., Raupach, M., Klinghoffer, O. (2000). Corrosion Monitoring sensors for durability assessment of reinforced concrete structures. *International Society for Optical Engineering (SPIE 2000)*, 20-26 January 2000, Newport Beach, California, United States.
- Bell, J.-P., Dean, T. J., Hodnett, M. (1987). Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part II. Field techniques, evaluation and calibration. *Journal of Hydrology*, 93, 79-90. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90195-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90195-8)
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., Polder, R. (2013). *Corrosion of steel in concrete* (Vol. 392). Wiley, Weinheim, Germany.
- Bore, T., Wagner, N., Delepine Lesoille, S., Taillade, F., Six, G., Daout, F., Placko, D. (2016). Error Analysis of Clay-Rock Water Content Estimation with Broadband High-Frequency Electromagnetic Sensors—Air Gap Effect. *Sensors*, 16(4), 554. <https://doi.org/10.3390/s16040554>
- Breysse, D. (Éd.). (2012). *Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR* (Vol. 1). Springer Science & Business Media, Berlin, Germany.
- Brue, F. (2009). *Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons*. Thèse de l'Ecole Centrale de Lille, France
- Bungey, J. H., Millard, S. G., Grantham, M. G. (2006). *Testing of concrete in structures* (4th ed). Taylor & Francis, New York, United States.
- Cabrera, J. G., Ghoddoussi, P. (1994). Influence of Fly Ash on the Resistivity and Rate of Corrosion of Reinforced Concrete. *Special Publication*, 145, 229-244. <https://doi.org/10.14359/4463>
- Carino, N. (2001). The Impact-Echo Method: An Overview1. *Structures Congress 2001*, 21-23 May 2001, Washington, D.C., United States. [https://doi.org/10.1061/40558\(2001\)15](https://doi.org/10.1061/40558(2001)15)
- Carino, N. J. (1999). Nondestructive techniques to investigate corrosion status in concrete structures. *Journal of performance of constructed facilities*, 13(3), 96-106.

- Carles-Gibergues, A., Cyr, M. (2002). Interpretation of expansion curves of concrete subjected to accelerated alkali–aggregate reaction (AAR) tests. *Cement and Concrete Research*, 32(5), 691–700. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00747-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00747-5)
- Castellote, M., Alonso, M. C., Andrade, C. (2002). Standardization, to a reference of 25 °C, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. *ACI Materials Journal*, 99, 119–127.
- Chang, C.-Y., Hung, S.-S. (2012). Implementing RFIC and sensor technology to measure temperature and humidity inside concrete structures. *Construction and Building Materials*, 26(1), 628–637.
- Chapellier, D. (1987). *Diagraphies appliquées à l'hydrologie* (Collection Technique et documentation). Lavoisier, Paris, France, 165p.
- Chen, W.-F., Duan, L. (2003). *Bridge engineering: Construction and maintenance* (Principles and Applications in Engineering). CRC Press, London, United Kingdom.
- Chouteau, M., Beaulieu, S., Fréchette, V., Toe, E. (2002). Application de la tomographie de résistivité électrique aux infrastructures routières en béton. *INFRA 2002*, 25-27 Novembre 2002, Montréal, Québec, Canada.
- Chrétien, M., Lataste, J. F., Fabre, R., Denis, A. (2014). Electrical resistivity tomography to understand clay behavior during seasonal water content variations. *Engineering geology*, 169, 112–123.
- Courtois, A., Clauzon, T., Taillade, F., Martin, G. (2015). Water Content Monitoring for Flamanville 3 EPR TM Prestressed Concrete Containment: an Application for TDR Techniques. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2015)*, 15-17 September 2015, Berlin, Germany.
- Dahlin, T., Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, 52(5), 379–398.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar*. Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- De Larrard, F. (1999). *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. CRC Press, London, United Kingdom, 448p.
- Dérobot, X. (2003). *Techniques radar appliquées au génie civil* (Collection Science de l'Ingénieur, Vol 9). LCPC, Nantes, France.

- Dérobot, X., Iaquina, J., Klysz, G., Balayssac, J.-P. (2008). Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete. *NDT & E International*, 41(1), 44–52.
- Dérobot, X., Villain, G., Cortas, R., Chazelas, J.-L. (2009). EM characterization of hydraulic concretes in the GPR frequency- band using a quadratic experimental design. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2009)*, 30 June - 3 July 2009, Nantes, France.
- Drouet, E. (2010). *Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires : prise en compte des transferts hydriques*. Thèse de l'École Normale Supérieure de Cachan, Cachan, France.
- Du Plooy, R. (2013). *The development and combination of electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the assessment of cover concrete condition prior to corrosion*. Thèse de l'Université Nantes Angers Le Mans, IFSTTAR Nantes, France.
- Du Plooy, R., Palma-Lopes, S., Villain, G., Derobert, X. (2013). Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT & E International*, 54, 27–36.
- Du Plooy, R., Villain, G., Palma-Lopes, S., Ihamouten, A., Dérobot, X., Thauvin, B. (2015). Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete: a comparative study. *Materials and Structures*, 48, 369-386. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0189-z>
- Enevoldsen, J. N., Hansson, C. M., Hope, B. B. (1994). The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion of steel embedded in concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 24(7), 1373-1382. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90122-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90122-8)
- Fares, M. (2015). *Evaluation de gradients de teneur en eau et en chlorures par méthodes électromagnétiques non-destructives*. Thèse de l'Université de Nantes Angers Le Mans, IFSTTAR Nantes, France.
- Fares, M., Villain, G., Bonnet, S., Palma-Lopes, S., Thauvin, B., Thiery, M. (2018). Determining chloride content profiles in concrete using an electrical resistivity tomography device. *Cement and Concrete Composites*, 94, 315-326. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.001>
- Fares, M., Villain, G., Fargier, Y., Thiery, M., Derobert, X., Palma-Lopes, S. (2015). Estimation of water gradient and concrete durability indicators using capacitive and

- electrical probes. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2015), 15-17 September 2015*, Berlin, Germany, 9p.
- Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Fauchard, C., François, D., Côte, P. (2014). DC-electrical resistivity imaging for embankment dike investigation: a 3D extended normalisation approach. *Journal of Applied Geophysics*, 103, 245–256.
- Fargier, Yannick. (2011). *Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre*. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes (ECN), IFSTTAR Nantes, France.
- Farhoud, R., Bertrand, J., Buschaert, S., Delepine-Lesoille, S., Hermand, G. (2013). Full scale in situ monitoring section test in the Andra's Underground Research Laboratory. *1st Conference on Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering (TINCE 2013), 28-31 October 2013*, Paris, France, 29–31.
- Fasseu, P., Mahut, B. (2003). Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne. *Guide Technique, LCPC*, Paris, France.
- Feldman, R. F., Sereda, P. J. (1968). A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. *Matériaux et Construction*, 1(6), 509–520.
- Feliu, S., Andrade, C., González, J. A., Alonso, C. (1996). A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete. *Materials and Structures*, 29(6), 362-365. <https://doi.org/10.1007/BF02486344>
- Filali, B., Rhazi, J., Ballivy, G. (2006). Measurement of the dielectric properties of concrete by a large coaxial probe with open end. *Canadian Journal of Physics*, 84(5), 365-379.
- François, R., Laurens, S., Deby, F. (2018). *Corrosion and Its Consequences for Reinforced Concrete Structures*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 232p.
- Garboczi, E. J. (1990). Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: A critical review. *Cement and Concrete Research*, 20(4), 591-601. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90101-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90101-3)
- Garzon, A. J., Sanchez, J., Andrade, C., Rebolledo, N., Menéndez, E., Fullea, J. (2014). Modification of four point method to measure the concrete electrical resistivity in presence of reinforcing bars. *Cement and Concrete Composites*, 53, 249-257. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.013>

- Gjørsv, O. E., Vennesland, Ø. E., El-Busaidy, A. H. S. (1977). Electrical resistivity of concrete in the oceans. *Offshore Technology Conference, 2-5 May 1977*, Houston, Texas, United States.
- Godart, B., Mahut, B., Fasseu, P., Michel, M. (2004). The guide for aiding to the management of structures damaged by concrete expansion in France. *12th International Conference on AAR in Concrete (ICAAR 2004), 15-19 October 2004*, Beijing, China, ,1219–1227.
- Gowers, K., Millard, S. (1999). Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion. *ACI Materials Journal*, 96(5).
- Gowers, K. R., Millard, S. G., Bungey, J. H. (1993). The influence of environmental conditions upon the measurement of concrete resistivity for the assessment of corrosion durability. *International Conference British Institute of Non-Destructive Testing (BINDT 1993), April 1993*, Liverpool, United Kingdom.
- Hamrouche, R. (2011). *Reconnaissance géométrique des structures en maçonnerie ou en béton par imagerie radar multi récepteurs : approche numérique et expérimentale*. Thèse de l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, France ; Université de Sherbrooke, Canada.
- Han, N. (2004). Role of NDE in quality control during construction of concrete infrastructures on the basis of service life design. *Construction and Building Materials*, 18, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.10.005>
- Heinz, D., Ludwig, U. (1987). Mechanism of Secondary Ettringite Formation in Mortars and Concretes Subjected to Heat Treatment. *Special Publication*, 100, 2059-2072. <https://doi.org/10.14359/3827>
- Hoekstra, P., Delaney, A. (1974). Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 79, 1699-1708. <https://doi.org/10.1029/JB079i011p01699>
- Hornbostel, K., Larsen, C. K., Geiker, M. R. (2013). Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. *Cement and Concrete Composites*, 39, 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- Hugenschmidt, J., Kalogeropoulos, A. (2009). The inspection of retaining walls using GPR. *Journal of Applied Geophysics*, 67(4), 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.09.001>

- Hughes, B. P., Soleit, A. K. O., Brierley, R. W. (1985). New technique for determining the electrical resistivity of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 37(133), 243-248. <https://doi.org/10.1680/mac.1985.37.133.243>
- Hunkeler, F. (1996). The resistivity of pore water solution—a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. *Construction and Building Materials*, 10(5), 381-389. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00029-1](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00029-1)
- Ihamouten, A. (2011). *Caractérisation physique et hydrique de bétons d'ouvrage par propagation d'ondes électromagnétiques*. Thèse de l'Université de Nantes, IFSTTAR Nantes, France.
- Ihamouten, A., Chahine, K., Baltazart, V., Villain, G., Derobert, X. (2011). On variants of the frequency power law for the electromagnetic characterization of hydraulic concrete. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(11), 3658–3668.
- Kaplanvural, İ., Pekşen, E., Özkap, K. (2018). Volumetric water content estimation of C-30 concrete using GPR. *Construction and Building Materials*, 166, 141–146.
- Klysz, G., Balayssac, J.-P., Laurens, S. (2004). Spectral analysis of radar surface waves for non-destructive evaluation of cover concrete. *NDT & E International*, 37, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.09.006>
- Kuras, O., Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Swift, R. T., Uhlemann, S. S., Chambers, J. E., ... Atherton, N. (2015b). Performance Assessment of Novel Electrode Materials for Long-term ERT Monitoring. *Near Surface Geoscience 2015 : 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 6– 10 September 2015*, Turin, Italy. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201413777>
- LaBrecque, D., Daily, W. (2008). Assessment of measurement errors for galvanic-resistivity electrodes of different composition. *Geophysics*, 73(2), F55–F64.
- Lakshminarayanan, V., Ramesh, P. S., Rajagopalan, S. R. (1992). A new technique for the measurement of the electrical resistivity of concrete. *Magazine of Concrete research*, 44(158), 47–52.
- Larive, C. (1997). *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques*. Thèse de l'ENPC, LCPC, Paris, France.
- Larsen, C. K., Sellevold, E. J., Askeland, F., Østvik, J. M., Vennessland, O. (2006). Electrical resistivity of concrete part II: Influence of moisture content and temperature. *2nd*

- International symposium on advances in concrete through science and engineering, 11-13 September 2006, Quebec, Canada.*
- Lataste, J.-F. (2002). *Évaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesures de résistivité électrique*. Thèse de l'université de Bordeaux 1, France.
- Lataste, J.-F., Sirieix, C., Breysse, D., Frappa, M. (2003a). Improvement of electrical resistivity measurement for non destructive evaluation of concrete structures. *2nd International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, 5-6 May 2003, Paris, France, 102-112.* <https://doi.org/10.1617/2912143780.009>
- Lataste, J.-F., Sirieix, C., Denys, B., Frappa, M. (2003b). Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. *NDT & E International, 36*, 383-394. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00013-6)
- Laurens, S., Balayssac, J.-P., Rhazi, J., Arliguie, G. (2002). Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) signal. *Materials and Structures, 35*, 198-203. <https://doi.org/10.1007/BF02533080>
- Laurens, S., Hénocq, P., Rouleau, N., Deby, F., Samson, E., Marchand, J., Bissonnette, B. (2016). Steady-state polarization response of chloride-induced macrocell corrosion systems in steel reinforced concrete—numerical and experimental investigations. *Cement and Concrete Research, 79*, 272-290.
- Lavaud, S., Divet, L., Bonnot, P., Nahas, G. (2017). Influence de l'humidité relative et d'un échauffement tardif du béton sur le développement d'une réaction sulfatique interne. *Journées techniques Ouvrages d'Art (JOA 2017), 14-16 June 2017, Metz, France, 17p.*
- Lecieux, Y., Schoefs, F., bonnet, stephanie, Lecieux, T., Palma-Lopes, S. (2015). Quantification and uncertainty analysis of a structural monitoring device: detection of chloride in concrete using DC electrical resistivity measurement. *Nondestructive Testing and Evaluation, 30*(3), 216-232. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1029476>
- Leucci, G. (2012). Ground Penetrating Radar: an Application to Estimate Volumetric Water Content and Reinforced Bar Diameter in Concrete Structures. *Journal of Advanced Concrete Technology, 10*(12), 411-422. <https://doi.org/10.3151/jact.10.411>

- Liang, K., Zeng, X., Zhou, X., Ling, C., Wang, P., Li, K., Ya, S. (2018). Investigation of the capillary rise in cement-based materials by using electrical resistivity measurement. *Construction and Building Materials*, 173, 811–819.
- Loke, M. H. (2000). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys. RES2DINV Manual. IRIS Instruments. www.iris-instruments.com.*
- Loke, M. H. (2001). 1-D Resistivity, IP & SIP Inversion and Forward Modelling (Wenner and Schlumberger Arrays). *User's Manual. https://moodle.polymtl.ca/pluginfile.php/488387/mod_resource/content/1/res1d.pdf.*
- Lopez, W., Gonzalez, J. A. (1993). Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 23(2), 368–376.
- Mahfoud, E. (2019). *Effet thermique sur les mesures de résistivité électrique dans le béton par capteurs noyés.* Rapport de stage de Master 2, LMDC, Toulouse, France.
- Marescot, L., Rigobert, S., Lopes, S. P., Lagabrielle, R., Chapellier, D. (2006). A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3D structures. *Journal of Applied Geophysics*, 60(1), 55–67.
- McCarter, W. J. (1994). A parametric study of the impedance characteristics of cement-aggregate systems during early hydration. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1097–1110. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90034-5)
- McCarter, W. J., Chrisp, T. M., Butler, A., Basheer, P. A. M. (2001). Near–surface sensors for condition monitoring of cover-zone concrete. *Construction and Building Materials*, 15(2–3), 115–124.
- McCarter, W. J., Forde, M. C., Whittington, H. W. (1981). Resistivity characteristics of concrete. *Institution of Civil Engineers, December 1981*, Edinburgh, Scotland, 107–117.
- McCarter, W. J., Taha, H. M., Suryanto, B., Starrs, G. (2015). Two-point concrete resistivity measurements: interfacial phenomena at the electrode–concrete contact zone. *Measurement Science and Technology*, 26(8). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/8/085007>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G. (2016). Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. *Construction and Building Materials*, 107, 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168>

- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. (2006). *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. McGraw-Hill, New York, United States.
- Millard, S. G. (1991). Reinforced concrete resistivity measurement techniques. *Institution of Civil Engineers, March 1991*, Liverpool, United Kingdom, 71-88.
- Minagawa, H., Miyamoto, S., Hisada, M. (2017). Relationship of Apparent Electrical Resistivity Measured by Four-Probe Method with Water Content Distribution in Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15(6), 278–289.
- Monfore, G. E. (2019). The electrical resistivity of concrete. *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 10, 35-48.
- Montemor, M. F., Simoes, A. M. P., Ferreira, M. G. S. (2003). Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 491–502.
- Moreau, G., Salin, J., Masson, B., Dubois, J. P., Agostini, F., Skoczylas, F. (2010). Survey of the future concrete structures lifetime measuring the water content: 4 types of embedded sensor under checking. *Fontevraud 7*, A067-T10. Consulté à l'adresse http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:42088826
- Morris, W., Moreno, E. I., Sagüés, A. A. (1996). Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe. *Cement and Concrete Research*, 26(12), 1779–1787.
- Morris, W., Vico, A., Vazquez, M., De Sanchez, S. R. (2002). Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements. *Corrosion Science*, 44(1), 81-99. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00033-6)
- Naar, S. (2006). *Evaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive*. Thèse de l'université de Bordeaux 1, France, en cotutelle avec l'Université de Sherbrooke, Québec.
- Neville, A. (1997). Maintenance and durability of structures. *Concrete International*, 19(11), 52–56.
- Neville, A. M. (2000). *Propriétés des Bétons* (Vol. 806). Centre de Recherche International du Béton, Editions Eyrolles, Paris, France.
- Nguyen, A. Q., Klysz, G., Deby, F., Balayssac, J.-P. (2017). Evaluation of water content gradient using a new configuration of linear array four-point probe for electrical resistivity measurement. *Cement and Concrete Composites*, 83, 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.020>

- Nguyen, Q. T., Caré, S., Millard, A., Berthaud, Y. (2007). Analyse de la fissuration du béton armé en corrosion accélérée. *Comptes Rendus Mécanique*, 335(2), 99-104. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2007.01.005>
- Oldenborger, G. A., Routh, P. S., Knoll, M. D. (2005). Sensitivity of electrical resistivity tomography data to electrode position errors. *Geophysical Journal International*, 163(1), 1-9.
- Østvik, J.-M. (2006). Electrical resistivity of concrete - Part I: Frequency dependence at various moisture contents and temperatures. *2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, 11-13 September 2006*, Quebec, Canada. <https://doi.org/10.1617/2351580028.105>
- Park, S. K., Van, G. P. (1991). Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, 56(7), 951-960. <https://doi.org/10.1190/1.1443128>
- Parrott, L. J. (1994). Moisture conditioning and transport properties of concrete test specimens. *Materials and Structures*, 27(8), 460.
- Petrič, M., Kastelica, S., Mrvar, P. (2013). Selection of electrodes for the 'in situ' electrical resistivity measurements of molten aluminium. *Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy*, 49(3), 279-283.
- Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, Ø., Gulikers, J., Weidert, R., Raupach, M. (2000). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures*, 33(10), 603-611. <https://doi.org/10.1007/BF02480599>
- Polder, R. B. (2001). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*, 15(2), 125-131. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1)
- Presuel, F., Liu, Y., Wu, Y.-Y. (2013). Numerical modeling of the effect of rebar presence and/or multilayered concrete resistivity on the apparent resistivity measured via the Wenner method. *Construction and Building Materials*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.053>
- Presuel-Moreno, F., Soares, A., Liu, Y. (2010). *Characterization of new and old concrete structures using surface resistivity measurements*. Rapport, Florida Atlantic University, Dania Beach, United States, 279p.
- Rajabipour, F., Weiss, J., Abraham, D. M. (2004). Insitu electrical conductivity measurements to assess moisture and ionic transport in concrete (A discussion of critical features that

- influence the measurements). *International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur, November 2004*, Paris, France.
- Reichling, K., Raupach, M., Klitzsch, N. (2015). Determination of the distribution of electrical resistivity in reinforced concrete structures using electrical resistivity tomography. *Materials and Corrosion*, 66(8), 763–771.
- Robert, A. (1998). Dielectric permittivity of concrete between 50 Mhz and 1 Ghz and GPR measurements for building materials evaluation. *Journal of Applied Geophysics*, 40(1), 89-94. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00009-3)
- Robinson, M., Dean, T. J. (1993). Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. *Hydrological Processes*, 7, 77-86. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360070108>
- Rostam, S. (2005). Service life design of concrete structures - A challenge to designers as well as to owners. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 6(5), 423-445.
- Saleem, M., Shameem, M., Hussain, S. E., Maslehuddin, M. (1996). Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 10(3), 209–214.
- Salehi, M. (2013). *Numerical investigation of the effects of cracking and embedded reinforcement on surface concrete resistivity measurements using Wenner probe*. Thesis from Carleton University, Ottawa, Ontario.
- Samson, G., Deby, F., Garciaz, J.-L., Perrin, J.-L. (2018). A new methodology for concrete resistivity assessment using the instantaneous polarization response of its metal reinforcement framework. *Construction and Building Materials*, 187, 531–544.
- Sarja, A., Vesikari, E., Vesikari, E. (2004). *Durability Design of Concrete Structures*. <https://doi.org/10.1201/9781482271690>
- Sbartai, Z. M. (2005). *Caractérisation physique des bétons par radar: approche neuromimétique de l'inversion*. Thèse de l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, France, en cotutelle avec l'Université de Sherbrooke, Québec.
- Sbartai, Z. M., Laurens, S., Rhazi, J., Balayssac, J.-P., Arliguie, G. (2007). Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity. *Journal of applied geophysics*, 62(4), 361–374.

- Scheuermann, A., Hübner, C., Schlaeger, S., Becker, R., Wagner, N. (2010). Measuring approach for density distributions in granular media. *First European Conference on Moisture Measurement Aquametry, 5-7 October 2010, Weimar, Germany.*
- Sengul, O., Gjørsv, O. E. (2008). Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. *ACI Materials Journal*, 105(6), 541–547.
- Sirieux, C., Lataste, J.-F., Denys, B., Frappa, M. (2002). Caractérisation de l'endommagement du béton par mesures électriques. *Materials and Structures*, 35, 204-210. <https://doi.org/10.1007/BF02533081>
- Sohail, M. G., Laurens, S., Deby, F., Balayssac, J.-P. (2015). Significance of macrocell corrosion of reinforcing steel in partially carbonated concrete: numerical and experimental investigation. *Materials and Structures*, 48(1-2), 217–233.
- Song, J., Wang, L., Zibart, A., Koch, C. (2012). Corrosion protection of electrically conductive surfaces. *Metals*, 2(4), 450–477.
- Spencer, R. W. (1937). Measurement of the moisture content of concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 34, 45–64.
- Sriravindrarajah, R., Swamy, R. N. (1982). Development of a Conductivity Probe to Monitor Setting Time and Moisture Movement in Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 4(2), 73-80. <https://doi.org/10.1520/CCA10231J>
- Stefanescu, S., Schlumberger, C., Schlumberger, M. (1930). Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes. *Journal de Physique et le Radium*, 1(4), 132–140.
- Swamy, R. N. (1992). *The alkali-silica reaction in concrete*. Blackie, Van Nostrand Reinhold, Glasgow, New York.
- Taillandier, F., Sbartaï, Z. M., Breysse, D. (2013). Hiérarchisation de la maintenance d'un parc immobilier – Développement méthodologique et étude de cas. *31èmes Rencontres de l'AUGC, 29-31 Mai 2013, Cachan, France*, 12p.
- Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (Vol. 1). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Thiery, M. (2005). *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires : prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques*. Thèse de l'ENPC, LCPC Paris, France.

- Topp, G. C., Davis, J. L., Annan, P. (1980). Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, 16, 574-582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Tran, N., Ambrosino, R. (1972). Mesure de la teneur en eau des sols et des matériaux par une méthode capacitive. *Bull. des Ponts et Chaussées*, Volume 60.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Thesis from Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892–898.
- Villain, G. (2012). *Vers une évaluation des indicateurs de durabilité du béton pour le suivi de ses dégradations en laboratoire et sur ouvrage* (Collection Ouvrages d'Arts, Vol 70). IFSTTAR, Nantes, France.
- Villain, G., Balayssac, J.-P., Garnier, V., Piwakowski, B., Salin, J., Fardeau, V., ... Joubert, A. (2014). Comparison of durability indicators obtained by Non Destructive Testing methods to monitor the durability of concrete structures. *7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2014)*, 8-11 July 2014, Nantes, France.
- Villain, G., Garnier, V., Sbartaï, Z. M., Derobert, X., Balayssac, J.-P. (2018). Development of a calibration methodology to improve the on-site non-destructive evaluation of concrete durability indicators. *Materials and Structures*, 51(2), 40.
- Villain, G., Orcesi, A., Gaillet, L. (2016, novembre). *Journée Auscultation non destructive, surveillance et gestion durable des ouvrages*. Marne-la-Vallée, France. <http://www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AIII1>.
- Villain, G., Sbartaï, Z. M., Lataste, J.-F., Garnier, V., Dérobert, X., Abraham, O., ... Fares, M. (2015). Characterization of water gradients in concrete by complementary NDT methods. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2015)*, 15-17 September 2015, Berlin, Germany, 12p.
- Villain, G., Thiery, M. (2006). Gammadensimetry: A method to determine drying and carbonation profiles in concrete. *Ndt & E International*, 39(4), 328–337.
- Villain, G., Thiery, M., Platret, G. (2007). Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1182-1192. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.015>

- Webster, J. G., Eren, H. (Éd.). (2014). *Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement* (Collection Measurement, instrumentation, and sensors handbook). CRC Press, London, United Kingdom, 1640p.
- Wenner, F. (1915). A method for measuring earth resistivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 5(16), 561–563.
- Whittington, H. W., McCarter, J., Forde, M. C. (1981). The conduction of electricity through concrete. *Magazine of concrete research*, 33(114), 48–60.
- Wierig, H. J. (1984). Longtime studies on the carbonation on concrete under normal outdoor exposure. *RILEM Seminar on Durability of Concrete Structures Under Normal Exposure, 26–29 March 1984, Hannover, Germany*, 239–249.
- Woelfl, G. A., Lauer, K. (1979). The electrical resistivity of concrete with emphasis on the use of electrical resistance for measuring moisture content. *Cement, concrete and Aggregates*, 1(2), 64–67.
- Xiao, X., Ihamouten, A., Villain, G., Dérobert, X. (2017). Use of electromagnetic two-layer wave-guided propagation in the GPR frequency range to characterize water transfer in concrete. *Ndt & E International*, 86, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.08.001>.
- Yang, C., Liu, S., Feng, Y., Yang, H. (2018). Influence of electrode polarization on the potential of DC electrical exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 149, 63–76.
- Yu, X., Liu, Y. (2010). Development of Time Domain Reflectometry Instrument for QA/QC of Fresh and Early Stage Concrete. *National cooperative highway research program. Ohio Department of Transportation, United States*. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/idea/finalreports/highway/NCHRP126_Final_Report.pdf.
- Zhang, R., Castel, A., François, R. (2010). Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process. *Cement and Concrete Research*, 40(3), 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.026>

Annexe A – (Badr et al., 2018)

Design and implementation of embedded sensors based on electrical resistivity to determine water content profiles in thick concrete structures

J. Badr^{1,2}, Y. Fargier^{2,4}, F. Deby¹, G. Villain², S. Palma-Lopes², S. Delepine-Lesoille³, J.P. Balayssac¹, L.M. Cottineau²

1 Université Paul Sabatier III, Toulouse, France,

badr@insa-toulouse.fr, f_deby@insa-toulouse.fr, balayssa@insa-toulouse.fr

2 IFSTTAR, Sites de Nantes et de Bron, France,

joanna.badr@ifsttar.fr, yannick.fargier@ifsttar.fr, geraldine.villain@ifsttar.fr,
sergio.lopes@ifsttar.fr, louis-marie.cottineau@ifsttar.fr

3 Andra, Paris, France,

sylvie.lesoille@andra.fr

4 CEREMA, Normandie-Centre, Site de Blois, France,

yannick.fargier@cerema.fr

Abstract

The French national radioactive waste management agency (Andra) aims to insure the durability of thick concrete structures used for waste repository. To this end, concrete water content is one of the main parameters governing the long-term durability of these structures, therefore an accurate estimation of its profile is important. This research focuses on an electrical resistivity technique, which is highly sensitive to the water content in concrete.

Our work aims to design a prototype of embedded sensors in concrete structures to measure the resistivity profile with depth and the water content profile after calibration. The study highlights the capability of different types of sensors to measure the resistivity profile of a 30cm-thick concrete section. Several numerical studies are conducted to design different possible configurations of the embedded sensors and to optimize the sensors geometry in order to obtain the most relevant configuration. Several types of sensors are tested on small specimens; for instance Wenner type (aligned and equidistant four-pin probe resistivity method), proved capable of identifying the resistivity profile. The methodology for observing, measuring and monitoring the resistivity profile over time is studied.

1. Introduction

Andra's mission is to manage the radioactive waste coming from the French nuclear industry for the short, medium and long term, in order to protect the current and future generations and

their environment from the potential harmful effects of this waste (1). It is therefore a mission of sustainable development. The main idea is to contain the radioactive waste by storing it within a deep geological formation (Figure 1) (Cigeo project in Bure-France). These repository facilities will be subject to different environmental conditions throughout their lifespan. Indeed, some radioactive wastes are exothermic and cause the temperature to rise up to fifty degrees Celsius inside the repository cells (1). Thus, to limit the heating of the cementitious materials within the cells, a ventilation system will be implemented. However, the ventilation will cause the surrounding concrete to dry, thereby generating a water content gradient that will cause changes in the long-term behavior of the structures (1). Consequently, the main objective of this study is to design and produce a prototype of embedded sensors for the radioactive waste repository structures to monitor the water content profile. The desired resolution (as a function of the depth z in the concrete) for the Andra application is: several points in the concrete, ideally every 1 cm for the first centimetres, then a point every 5 cm in the middle.

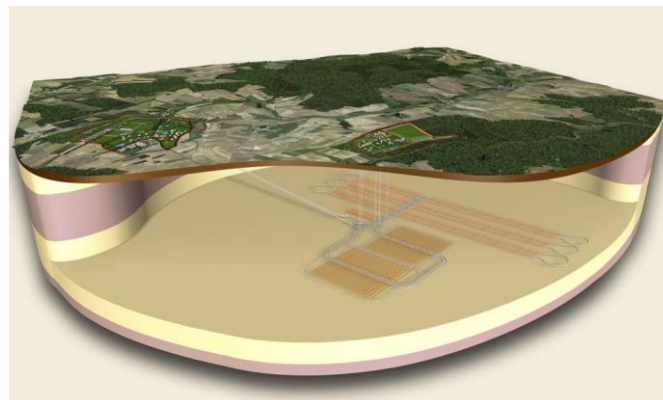


Figure 1. Schematic diagram of the surface and underground installations of the Cigeo Project (2).

Various non-destructive techniques are capable of characterizing the concrete water content such as capacitive probes (3), TDR (Time Domain Reflectometry) probes (4), GPR (Ground Penetrating Radar) (3) and electrical resistivity (3, 5-8) which is the method used in this study.

It was envisaged to work at the $\frac{1}{2}$ scale (30cm thickness instead of 60cm planned for the Andra application) because the conditioning time to impose a water content gradient in a 60cm thick sample would be too long.

Therefore, this paper describes the development of an embedded device, based on electrical resistivity, to monitor the water content profile. The study focuses on the numerical modelling and validation in small concrete specimen as well.

2. Electrical resistivity

The electrical resistivity is a material property characterized by the mobility of the existing ions in the interstitial solution. It is therefore strongly influenced by the aqueous phase of the concrete. The higher the concrete porosity is, the higher the concrete liquid phase is and therefore the lower the concrete resistivity is. The relationship between the electrical resistivity and the concrete water content is studied in many works in literature (5-8).

Different versions of the 4-point electrode method have been used in near-surface geophysics, but for an application on the concrete, the Wenner configuration (8-13) is often used since it has a good signal-to-noise ratio and a good sensitivity to the resistivity's variations between the surface and the depth (14). For this configuration, the electrodes are arranged in line with a constant inter electrode spacing. The current is injected on the external electrodes and the potential drop is measured on the internal electrodes.

The electrical resistivity is influenced by the homogeneity of the material and connected to the electrical resistance by a geometric factor G_R which depends on the geometry of the structure and on the shape and positions of the electrodes in the structure. In the case of a heterogeneous medium, an "apparent" resistivity ρ_a is measured, given by the following equation (1):

$$\rho_a = G_R \cdot R = G_R \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

where ρ_a [$\Omega \cdot m$] is the apparent resistivity, G_R [m] is the geometric factor, ΔV [V] is the measured potential drop and I [A] is the intensity of the electric current injected.

In the case of some trivial geometries (e.g. a cylindrical sample, a half-space medium) there are analytical expressions for the geometric factors. In other cases, geometrical factors can be numerically determined, e.g. by a finite element (FE) calculation explained in detail in section 3.1.

To make an electrical resistivity measurement, it is possible to carry out either a surface measurement (or even a set of numerous measurements from which the resistivity can be

evaluated at different depths by an inversion procedure (13)), or a measurement at depth using an embedded device. Different methods of surface electrical resistivity measurements are used. A multi-ring resistivity cell (8) for concrete sample evaluation and a multi-electrode surface resistivity probe for on-site applications (8, 13) are capable of identifying resistivity gradients over depth. However, the problem associated with these methods is that of achieving good electrical contact between the electrodes and the concrete. These methods are not optimal for monitoring, the estimation of the water content profile is indirect (loss of resolution in the middle).

3. Numerical modelling

The numerical simulation is conducted using a 3D electrostatic model and the AC/DC module integrated in the COMSOL Multiphysics®, a commercial software based on the finite element method. The purpose is to choose the best configuration to optimize the geometry of the multi-electrode device (number, shape and relative positions of the electrodes). We modelled a slab of 60cmx60cmx30cm inside which sensors of different geometries are placed using a very refined mesh (maximum dimension of the tetrahedral element is equal to 0.1cm). The shape and dimensions of the electrodes is studied in section 3.3. The boundary conditions are zero current flows on all boundaries to simulate a perfect insulation. The resistivity distribution is constant, to obtain the geometric factors G , and variable to study the profiles in depth.

3.1 Geometric factor modelling

The calculation of the geometric factors which is executed by definition on a homogeneous medium having the same geometry as the non-homogeneous medium that is to be studied, and implementing the exact same electrode positions and combinations, is based on the approach proposed by Marescot (15):

$$G_R = \rho_0 \cdot \frac{I_0}{\Delta V_0} \quad (2)$$

where ρ_0 , ΔV_0 and I_0 are respectively the apparent resistivity, the measured potential drop and the intensity of the electric current injected in the homogeneous medium.

By defining a current $I_0 = 1\text{A}$ and a resistivity $\rho_0 = 1 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ we symbolically obtain:

$$G_R = \frac{1}{\Delta V_0} \quad (3)$$

Thus, for each electrode configuration, a reference potential drop ΔV_0 is calculated from the finite element model and the corresponding geometrical factor is obtained.

3.2 Imposed resistivity profile with depth

We use Weibull-type resistivity profile which is a function that can match realistic water content profiles in concrete (6).

The general form of the Weibull distribution function is given in equation (4):

$$F(z, k_w, \lambda, \rho_{max}, \rho_{min}) = (\rho_{max} - \rho_{min}) * e^{-\left(\frac{z}{\lambda}\right)^{k_w}} + \rho_{min} \quad (4)$$

This function has 4 parameters: k_w the shape parameter, λ the scale parameter and the two parameters ρ_{min} and ρ_{max} which modify the minimum and maximum of the function.

At this stage of the study, having no initial information on the resistivity profile, the parameters ρ_{min} and ρ_{max} are determined based on the range of electrical resistivity for different types of concrete (10). For a CEM I Ordinary Portland Cement, the resistivity varies between 50 and 200 $\Omega.m$ in humid conditions, and between 100 and 400 $\Omega.m$ under natural conditions without carbonation. Thus, the parameters ρ_{min} and ρ_{max} chosen in the numerical simulation are respectively 50 $\Omega.m$ and 400 $\Omega.m$. The shape and scale parameters $k_w = 3$ and $\lambda = 1/13 \text{ m}^{-1}$ are determined to have a progressive decrease in the resistivity as a function of the depth z (Figure 2). Thus the equation of the resistivity variation imposed in the numerical model is given in equation (5):

$$\rho(z) = 350 * e^{(-13*z)^3} + 50 \quad (5)$$

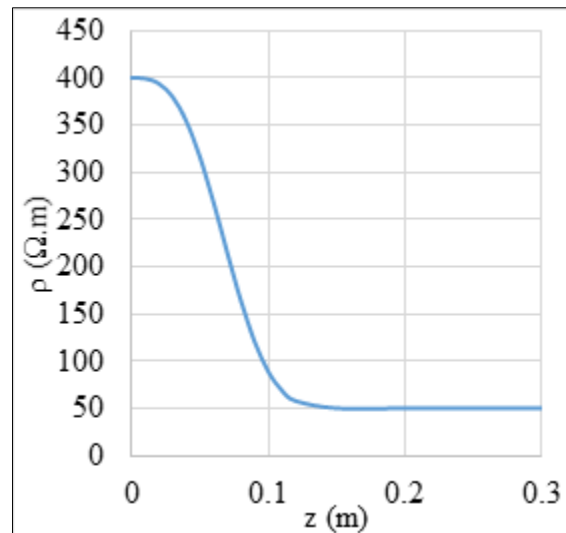


Figure 2. Weibull type of electrical resistivity profile as a function of depth in the numerical model

3.3 The Wenner configuration

The Wenner configuration consisting of four electrodes separated from each other by a distance $a = 1\text{cm}$, is placed at a given depth z and aligned parallel to the surface and therefore perpendicular to the direction of the resistivity gradient to be determined. Seven Wenner sensors are modeled at depths $z = 1\text{cm}$, 2cm , 3cm , 4cm , 5cm , 6cm and 10cm respectively in the numerical model (Figure 3). Several dimensions for the sensor geometry and different electrode shapes (point, cylindrical, spherical...) were studied. Two electrode shapes (point vs cylindrical) have been compared in section 3.4.1.

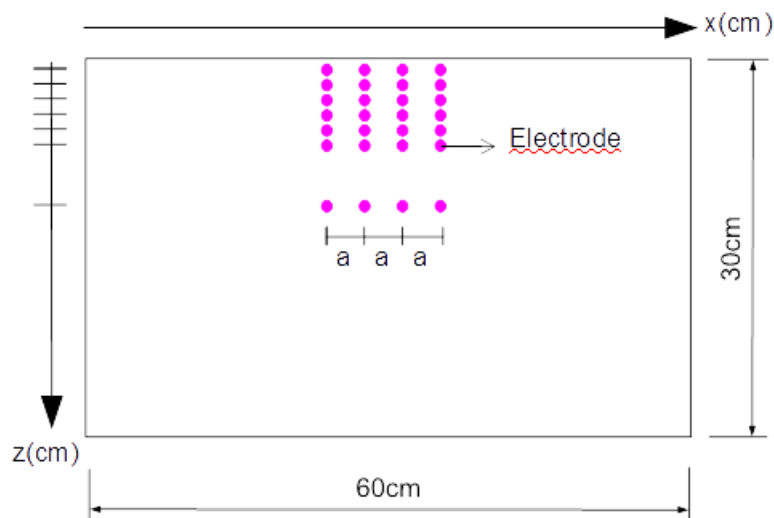


Figure 3. Schematic view of the slab section in the numerical model

3.3.1 Effect of the dimension of the electrodes

In order to compare the sensor's ability to match the imposed resistivity profile in the model (equation 5) and to show the influence of the electrodes dimensions on the sensor sensitivity (to know if we can simulate small cylinder electrodes by points or by their true size), we plotted the resistivity profile in Figure 4 as a function of depth for two electrode dimensions: point (modelled by a point in COMSOL Multiphysics) and cylinder (modelled by a cylinder having a diameter of 0.3 cm and a height of 0.3 cm).

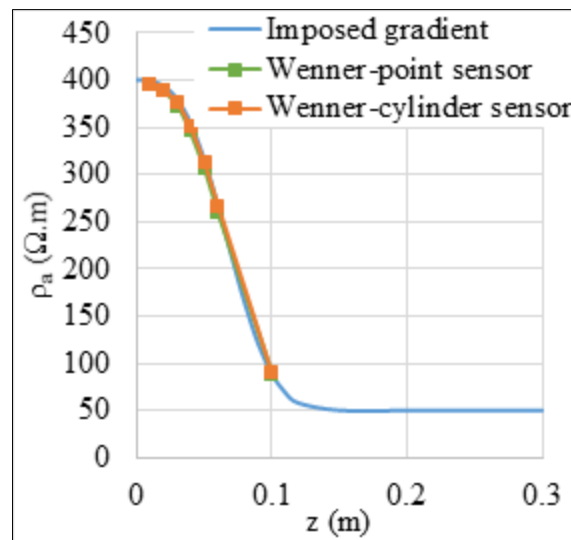


Figure 4. Simulated Wenner apparent resistivities for point and cylindrical electrodes compared to the imposed (actual) resistivity profile as a function of depth in the concrete slab

It is obvious from Figure 4 that the differences between the actual resistivity distribution (imposed profile with depth) and the simulated apparent resistivities are relatively small (around 1.7%). The difference between the two electrodes dimensions is 1% on average. Consequently, for the rest of our work, the point electrodes will be retained to overcome the problems of mesh at the cylindrical electrodes which have a small volume compared to the volume of the slab.

This result is encouraging and proves the capability of Wenner sensors having the size, orientation and positions above-mentioned to determine the electrical resistivity profile accurately.

3.3.2 Influence of the spacing between electrodes

This section highlights the influence of the spacing between the electrodes on the response of the sensor. Three different spacing measurements are considered: 1cm, 2cm and 5cm. It can

be seen from Figure 5 that as the distance between the electrodes decreases, the difference between the apparent resistivities and the actual resistivity profile in the medium decreases. Indeed, Millard (16) recommended making the measurements with an electrode spacing small enough to get closer to the real resistivity value of the medium. Thus, for the rest of our work, a distance of 1cm will be retained.

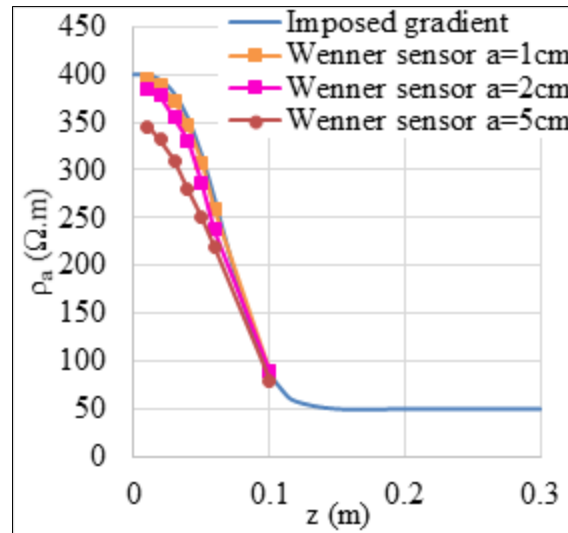


Figure 5. Wenner apparent resistivities for different inter-electrode spacing compared to the imposed (actual) resistivity profile as a function of depth in the concrete slab

4. Experimental campaign

To validate the numerical study, an experimental campaign was led on concrete specimen submitted to drying during 3 months.

4.1 Description of the Wenner sensor

Three plates in Bakelite (Figure 6 (a)) of dimensions 5cmx1cmx0.2cm were placed at different depths $z = 2\text{cm}$, 6cm and 10cm in a hollow PVC mould of inner dimensions 20cmx20cmx20cm. Each plate is perforated by 4 stainless pins aligned and separated from each other by a distance of 1cm.

A batch of concrete (cement type I) was then cast to fill up the cube. After 28 days of curing, the cube was sealed with aluminium foil on the sides and the underside faces; only the upper face was kept in contact with the air to ensure a unidirectional drying. We are thus close to the drying conditions of the full-scale elements. The cube was placed in a room at a constant temperature $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

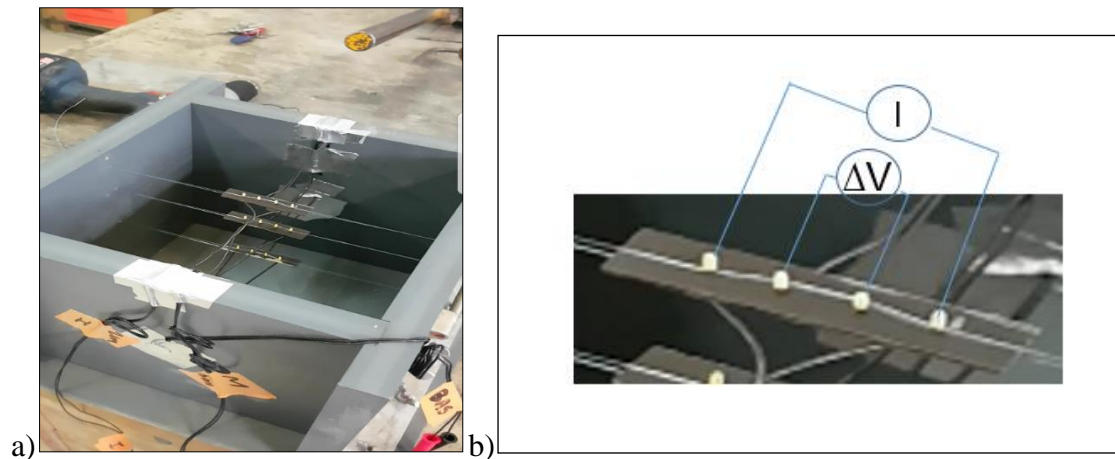


Figure 6.(a) Wenner arrays in the concrete block, (b) the measurement principle

The measurement principle is described in Figure 6 (b) where the current intensity I is injected on the two external electrodes and the potential drop (ΔV) is measured between the two internal electrodes. Therefore, we obtain 3 resistance measurements $\Delta V/I$ at different depths.

4.2 Results

A study showing the variability of the resistance as a function of the current intensity (Figure 7 (a)) is carried out showing a stable value of the resistance whatever the intensity of the injected current is: 0.5, 1 or 2 mA. The relative variation is in the range of 0.2% to 0.9% for each depth. In principle V is proportional to I , therefore this test verifies that we are in proximity of I where this linearity is verified. Another study showing the repeatability of the resistance measured over time (Figure 7 (b)) is carried out showing a stable resistance value during 12 hours on hardened concrete (after 28 days of curing) under saturated conditions (with t_0 marking the beginning of the acquisition). For a concrete specimen at the end of cure under saturated conditions, stable values of resistivity as a function of time are expected because the concrete does not evolve too much at this stage. The coefficient of variation varies between 0.7% and 1.3% during 12 hours.

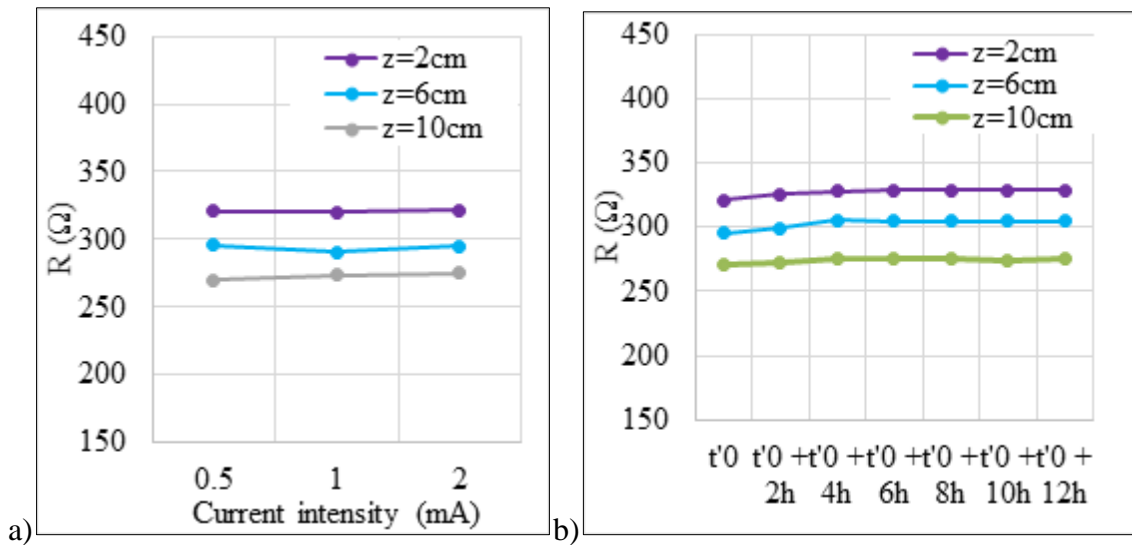


Figure 7. Stability of the Wenner measurements relative to (a) current intensity, (b) time under saturated conditions

The numerical modelling of the cube containing the Wenner arrays enables to calculate the geometric factors corresponding to each array at a given depth in order to calculate the apparent resistivity values from the measured resistances (*equation 1*). During the drying of the concrete, the change in the apparent resistivity profile as a function of time is illustrated in Figure 8 with t_0 marking the beginning of drying process.

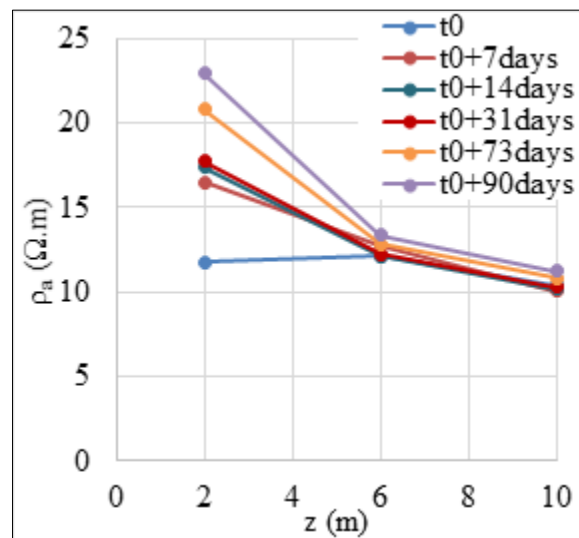


Figure 8. Variation of the Wenner apparent resistivity profile measured as a function of time

Figure 8 shows an increase in the apparent resistivity value over time revealing the evolution of the concrete due to the drying process. The water evaporates from the face in contact with the air creating a water content gradient between the two faces of the cube. It is noted on this

graph that the apparent resistivity at $z=2\text{cm}$ increases more rapidly over time than that at $z=6\text{cm}$ and 10cm , the concrete being drier on the surface during this uni-directional drying.

The results for the Wenner arrays are therefore promising. However, the main disadvantage of this system, is the size of the electrical cables linked to the pins which could hinder the passage of the aggregates during concrete casting. In particular if the required gradient resolution is 1 cm , a great number of electrodes will be necessary, therefore a great number of cables would be required.

5. Conclusion

In this paper, a Wenner device was used in order to estimate the resistivity profile in concrete from the surface to the core. Several numerical studies were conducted, by changing the shape of the electrodes and the geometry of the sensors in order to obtain the most relevant configuration (i.e. the configuration that yields apparent resistivity as close as possible to the actual resistivity profile). Experimental measurements were carried out on a concrete cube at different times of drying. The apparent resistivity data are shown sensitive to the evolution of concrete drying over time. Calibration curves, transforming the resistivity profile into a saturation degree profile, are currently being studied.

In perspective, the Wenner sensor can be used in many structures to monitor the resistivity profile. However, such kind of sensor may not be adapted for a gradient resolution of 1cm .

Acknowledgements

The authors would like to thank Carole Soula in Université Paul Sabatier III, Toulouse for the technical support she provided.

References

1. Andra, Dossier “Argile-Synthèse-Evaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse”, Collection Les Rapports, 2005
2. Cagnon H., “Influence des variations thermo-hydro-mécaniques sur le comportement différé du béton” (Thesis), Université Toulouse 3, France, 2015.
3. Du Plooy R., Villain G., Palma Lopes S., Ihamouten A., Dérobert X., Thauvin B., “Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete: a comparative study”. *Mater Struct*; 48(1–2):369–86, 2015.
4. Yu, X.B., Liu, Y., “Development of Time Domain Reflectometry Instrument for QA/QC of Fresh and Early Stage Concrete”, Civil Engineering Department, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 2010.

5. Lataste J-F., “Évaluation non destructive de l’état d’endommagement des ouvrages en béton armé par mesures de résistivité électrique” (Thesis), Bordeaux 1, France, 2002.
6. 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, Germany, 2015.
7. Villain G., Sbartai Z.M., Lataste J-F., Garnier V., Dérobert X., Abraham O., Bonnet S., Balayssac J-P., Nguyen N.T. and Fares M., “Characterization of water gradients in concrete by complementary NDT methods”, Berlin, Germany, 2015.
8. Du Plooy R., Palma Lopes S., Villain G. and Dérobert X., “Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition”, *NDT & E International* 54: 27–36, 2013.
9. Wenner F., “A method for measuring earth resistivity”, *Journal of the Washington Academy of Sciences* 5 (16): 561–563, 1915.
10. Polder R., “Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation”, *Construction and Building Materials, Near Surface Testing of*, 15 (2): 125-31, 2001.
11. Andrade C., Polder R. and Basheer M., “Non-destructive methods to measure ion migration”, *RILEM TC*, 91–112, 2007.
12. Liu Y., Suarez A. and Presuel-Moreno F.J., “Characterization of New and Old Concrete Structures Using Surface Resistivity Measurements”, Page 263, 2010.
13. Fares M., “Evaluation de gradients de teneur en eau et en chlorures par méthodes électromagnétiques non-destructives”, (Thesis), Université Nantes Angers Le Mans, France, 2015.
14. Dahlin T. and Zhou B., “A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays”, *Geophysical prospecting* 52 (5): 379–398, 2004.
15. Marescot L., Rigobert S., Palma Lopes S., Lagabrielle R. and Chapellier D., “A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3D structures”, *Journal of Applied Geophysics* 60 (1): 55–67, 2006.
16. Gowers K. and Millard S., “Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion”, *ACI Materials Journal* 96 (5), 1999.

Annexe B

Validation du dispositif Barrette en solution

1- Configurations de mesure

Le dispositif Barrette présente 2 configurations de mesure possibles : configuration Wenner (Figure 1) et configuration Transmission (Figure 2).

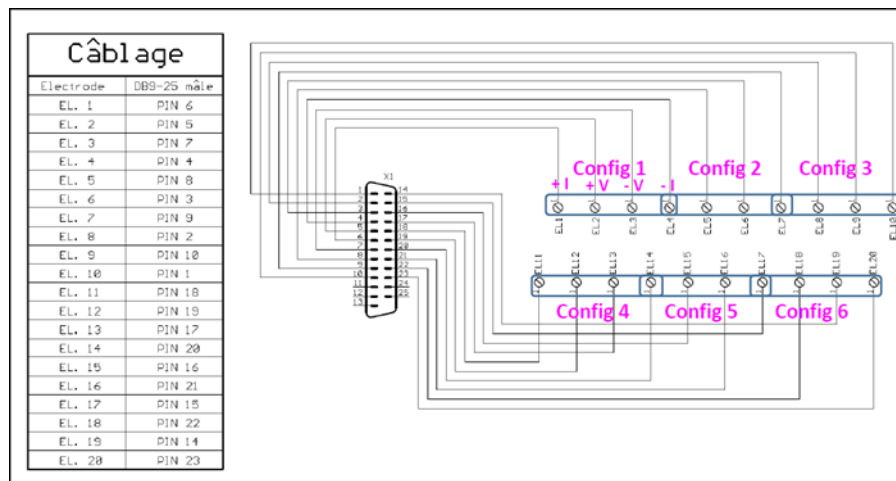


Figure 1 : Schéma du principe de la configuration Wenner du dispositif Barrette.

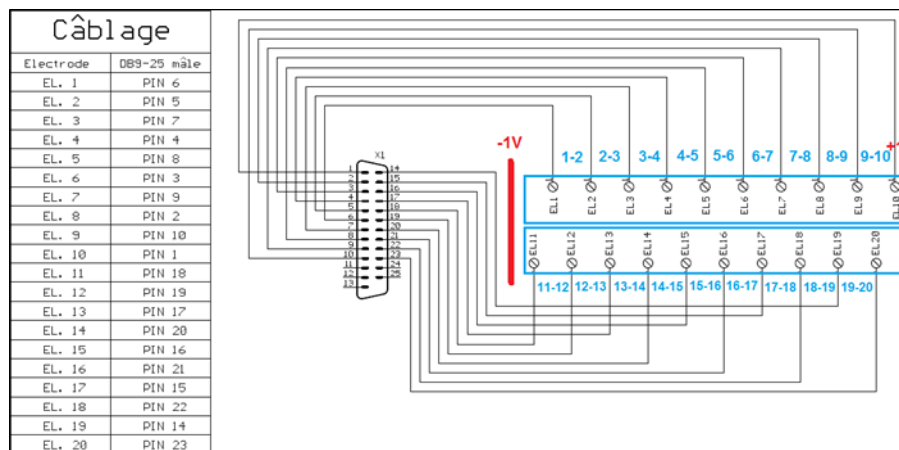


Figure 2 : Schéma du principe de la configuration Transmission du dispositif Barrette.

2- Dimension des bidons et position des barrettes

- Bidon 15x19x21 cm³ qui s'ovalise en le remplissant d'eau (tend vers un cercle Ø17 cm),
- hauteur d'eau de 20,5 cm,
- barrettes maintenues verticales au centre, touchant le fond.



(a)

(b)

Figure 3 : Photos du dispositif Barrette testé en solution : a) Configuration Transmission, b) Configuration Wenner (NB particules noires provenant de l'hydrolyse de l'eau au niveau des électrodes d'injection)

3-Conductivité des solutions

Les mesures de conductivité sont effectuées avec une sonde de conductivité (WTW Multi 348i) calibrée avant les essais dans une salle climatisée à $T = 20 \pm 1$ °C. Les mesures sont refaites après 4h pour toutes les solutions : eau du réseau et eau salée (Tableau 1).

Eau salée = Eau déminéralisée + [NaCl]=35 g/L + [NaOH]= 4 g/L.

Tableau B.1 : Valeurs des conductivités et résistivités des différentes solutions.

Solutions	Dosage de la quantité de sel	t0		t0 + 4h	
		Conductivité σ [mS/cm]	Résistivité ρ [Ω .m]	Conductivité σ [mS/cm]	Résistivité ρ [Ω .m]
Eau du robinet		0,428	23,36	0,429	23,31
Eau salée	1 ^{ère} dose : m1 = 3117 g	69,5	0,144	69,3	0,144
Eau salée	2 ^{ème} dose : m2 = 1321 g	73,8	0,136	73,5	0,136
Eau salée	Mélange m1 + m2	70,9	0,141	68,3	0,146

Les résistances de contact entre les pastilles de la barrette dans l'eau sans ajout de sel sont mesurées entre 20 et 70 k Ω .

Les résistances de contact entre les grilles inox dans l'eau sans ajout de sel sont mesurées aux alentours de 0,32 k Ω .

4- Essai dans l'eau du robinet

Ce paragraphe montre les mesures obtenues avec le dispositif Barrette dans l'eau du robinet.

4-1 Linéarité par rapport à la tension d'injection

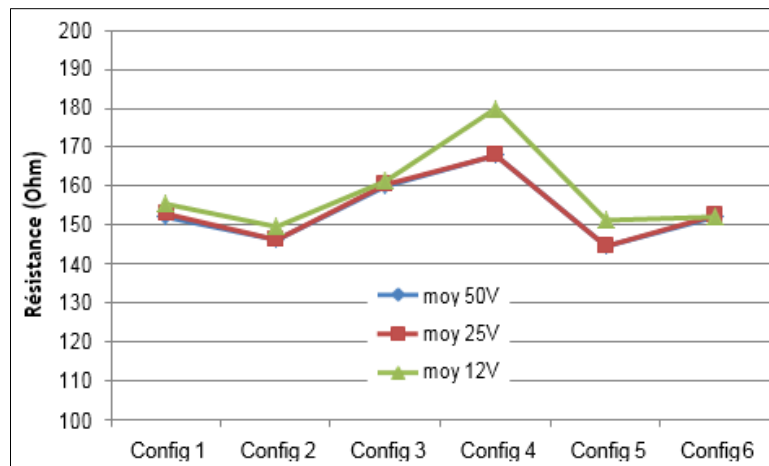


Figure 4 : Variation de la résistance en fonction des configurations Wenner en utilisant différentes tensions d'injection

La Figure 4 représente la variation de la résistance en fonction des configurations Wenner en utilisant différentes tensions d'injection pour vérifier la linéarité des mesures par rapport à la tension d'injection.

L'écart relatif est inférieur à 0.4% entre les différentes tensions d'injection. Ce qui est satisfaisant.

Les mesures sont donc linéaires vis-à-vis de la tension d'injection.

4-2 Répétabilité de 5 mesures successives espacées de 5 min environ

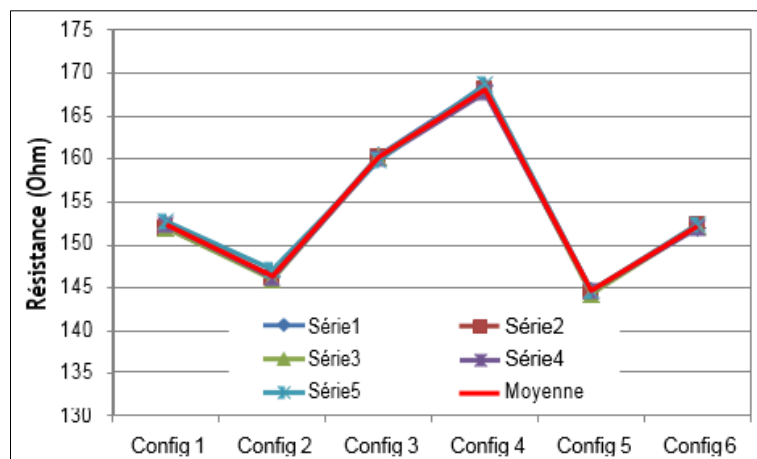


Figure 5 : Variation de la résistance en fonction des configurations Wenner en répétant 5 fois les mesures

La Figure 5 représente la variation de la résistance en fonction des configurations Wenner en répétant 5 fois les mesures pour vérifier la répétabilité des mesures.

L'écart-type de répétabilité est compris entre 0,15 et 0,45 Ω .

Il s'agit d'un écart-type et non d'un écart-type-p qui devrait être utilisé pour un petit nb de répétitions mais qui réduirait encore l'incertitude.

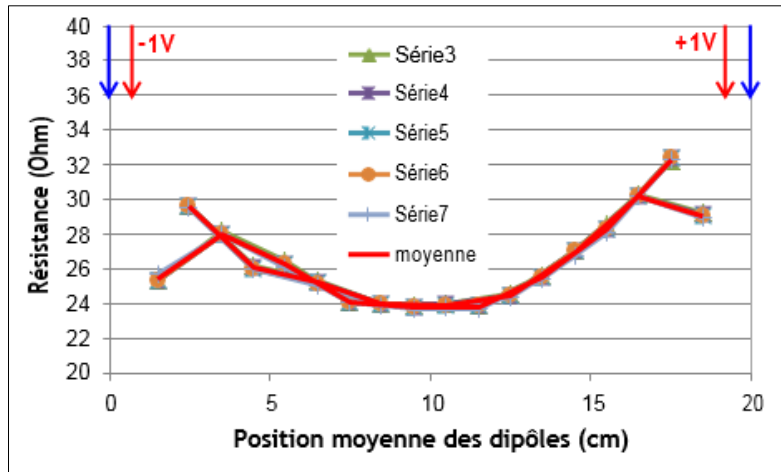


Figure 6 : Variation de la résistance en fonction de la position moyenne des dipôles en configuration Transmission

La Figure 6 représente la variation de la résistance en fonction de la position moyenne des dipôles en configuration Transmission pour vérifier la répétabilité des mesures avec cette configuration. L'écart-type de répétabilité est compris entre 0,02 et 0,20 Ω .

NB : La notation -1V / +1V est indicative puisque la tension d'injection imposée varie selon les cas.

Les mesures sont donc répétables.

4-3 Dérive temporelle

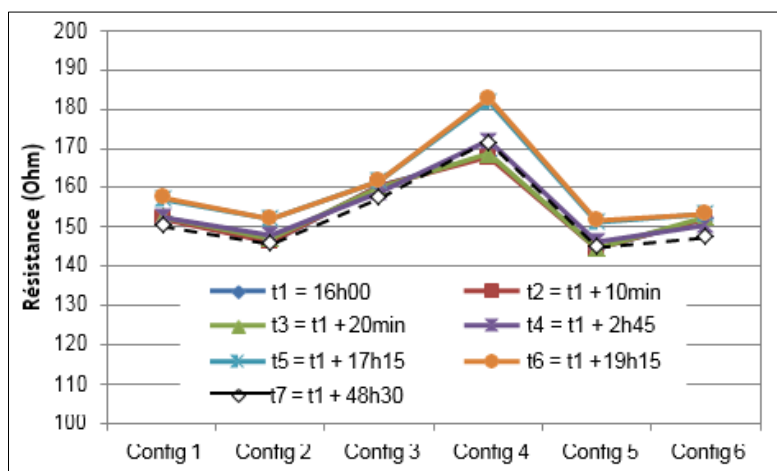


Figure 7 : Variation de la résistance en fonction des configurations Wenner à différentes échéances entre t1 et t7

La Figure 7 représente la variation de la résistance en fonction des configurations Wenner à différentes échéances entre t1 et t7 pour vérifier la dérive temporelle des mesures réalisées dans les mêmes conditions après plusieurs heures.

Nous remarquons une légère dérive temporelle relevant l'impact d'une nuit dans l'eau.

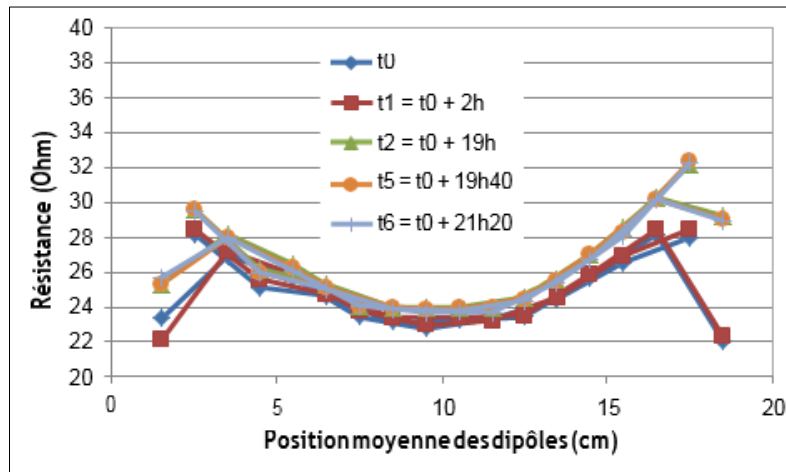


Figure 8 : Variation de la résistance en fonction de la position moyenne des dipôles en configuration Transmission à différentes échéances entre t0 et t6

La même remarque peut être faite pour les mesures réalisées en configuration Transmission (Figure 8).

5- Barrette dans l'eau salée [NaCl] = 35 g/L + [NaOH] = 4 g/L

Ce paragraphe montre les mesures obtenues avec le dispositif Barrette dans l'eau salée.

5-1 Linéarité par rapport à la tension d'injection

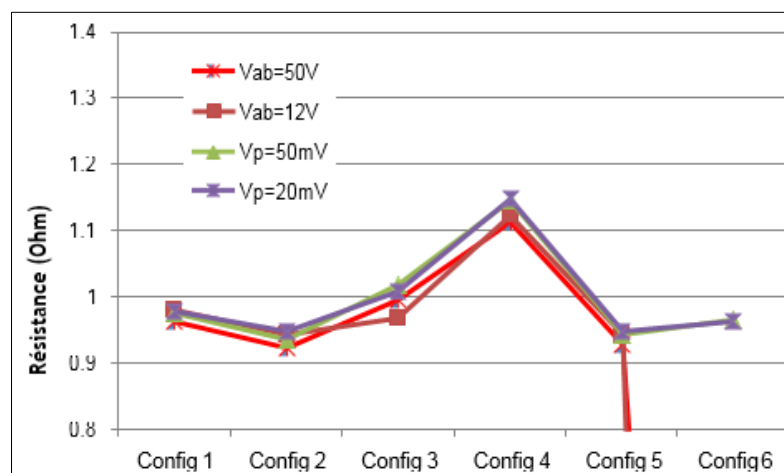


Figure 9 : Variation de la résistance en fonction des configurations Wenner pour différentes tensions d'injection

La Figure 4 représente la variation de la résistance en fonction des configurations Wenner en utilisant différentes tensions d'injection pour vérifier la linéarité des mesures par rapport à la tension d'injection.

L'écart relatif est inférieur à 0.3% entre les différentes tensions d'injection. Les mesures sont donc linéaires vis-à-vis de la tension d'injection.

Un problème de mesure est noté pour la Config 6 quand la tension d'injection est trop forte ($V_{ab} = 50 \text{ V}$). Des particules noires et des bulles de gaz sont observés au niveau de toutes les électrodes d'injection.

5-2 Répétabilité et dérive temporelle

La tension d'injection est $V_p=20 \text{ mV}$ pour ces essais.

La Figure 10 représente la variation de la résistance en fonction des configurations Wenner à différentes échéances entre t_0 et $t_0+20h30$ pour vérifier la répétabilité des mesures et l'existence d'une dérive temporelle.

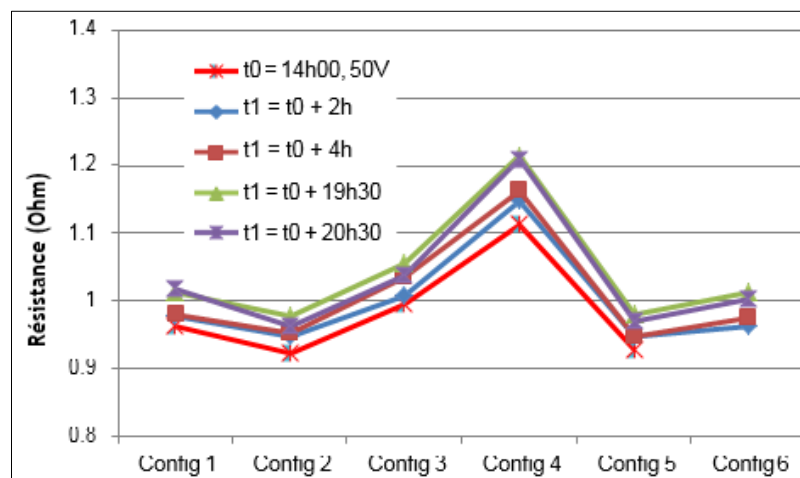


Figure 10 : Variation de la résistance en fonction des configurations Wenner à différentes échéances entre t_0 et $t_0+20h30$

Nous remarquons une légère dérive temporelle relevant l'impact d'une nuit dans l'eau salée.

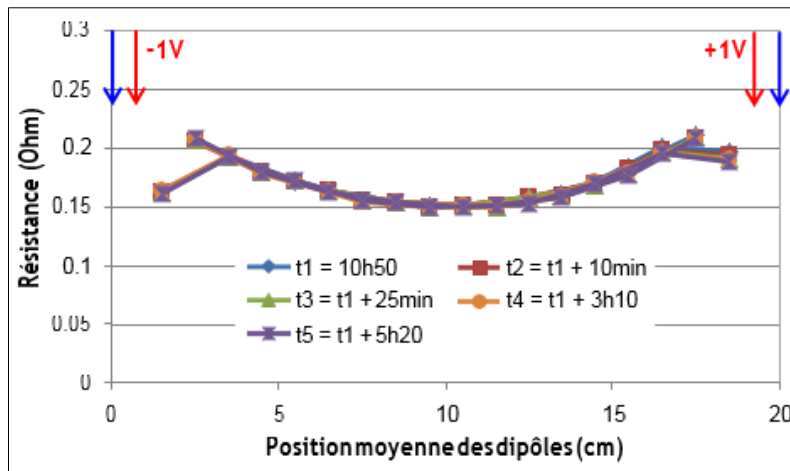


Figure 11 : Variation de la résistance en fonction de la position moyenne des dipôles en configuration Transmission à différentes échéances entre t1 et t5


La Figure 10 représente la variation de la résistance en fonction de la position moyenne des dipôles en configuration Transmission à différentes échéances entre t1 et t5.

La mesure est vérifiée répétable et l'écart-type de répétabilité est inférieur à 0.03Ω .

Annexe C

Tableau C.1 : Synthèse des dispositifs conçus dans la thèse.

Wenner	Barrette	Echelle	Anneau
<ul style="list-style-type: none">• Résolution pluri-centimétrique• Encombrement des fils• Ancrage dans le béton assuré par des vis• Proche d'un anneau ayant un grand diamètre et un petit espacement entre les électrodes	<ul style="list-style-type: none">• Résolution centimétrique• CI => Faible encombrement des fils• Faible ancrage dans le béton	<ul style="list-style-type: none">• Résolution centimétrique• CI => Faible encombrement des fils• Bon ancrage dans le béton• Faible impact de chemin préférentiel d'écoulement d'eau depuis la surface	<ul style="list-style-type: none">• Résolution pluri-centimétrique• CI => Faible encombrement des fils• Ancrage dans le béton assuré par des vis• Moyenne de plusieurs mesures à une même profondeur



Dispositifs choisis
<ul style="list-style-type: none">• Echelle• Anneau

Annexe D

Tableau D.1 : Répartition des expérimentations pour chaque dispositif conçu dans la thèse.

Dispositifs		Validations			Calibration
		En solutions	Eprouvettes de béton	Dalles HA et FV	Eprouvettes de béton
Wenner			x		
Barrette		x	x		
Echelle	19 électrodes	x	x		x
	28 électrodes	x		x	x
Anneau		x	x	x	

Le tableau D.1 montre la répartition des essais réalisés pour chaque dispositif conçu dans cette thèse (Wenner, Barrette, Echelle et Anneau). Les validations expérimentales des dispositifs sont effectuées dans des solutions de NaCl de conductivité connue, dans des éprouvettes de béton et dans les dalles HA et FV de 30 cm d'épaisseur. La calibration reliant la résistivité au degré de saturation est réalisée avec des éprouvettes de béton utilisant les dispositifs Echelle à 19 et 28 électrodes.

Annexe E - Liste des publications et communications réalisées au cours de la thèse

Article de revue

Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Villain, G. (2019). Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226>

Communications en conference

Présentation orale

Badr, J., Fargier, Y., Deby, F., Villain, G., Palma-Lopes, S., Delepine-Lesoille, S., Cottineau, L. M. (2018). Design and implementation of embedded sensors based on electrical resistivity to determine water content profiles in thick concrete structures. *9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2018), 10-13 July 2018, Manchester, United Kingdom, 10p.*

Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Villain, G. (2019). Conception et validation d'un capteur multi-électrodes pour évaluer les profils de résistivité dans le béton. *20 ème édition des Journées scientifiques, Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton ((RF)²B 2019), 1-3 Juillet 2019, Bruxelles, Belgique (Prix jeune chercheur).*

Vidéo

Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Villain, G. (2019). Conception et validation d'un capteur multi-électrodes pour évaluer les profils de résistivité dans le béton (vidéo). *37èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC (RUGC 2019), 19-21 Juin 2019, Nice, France.*