

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie civil

MODÉLISATION FRÉQUENTIELLE DE LA  
PERMITTIVITÉ DU BÉTON POUR LE  
CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR  
GÉORADAR

Thèse de doctorat  
Spécialité : génie civil

Taoufik BOURDI

Jury : Gérard BALLIVY (directeur)  
François BOONE (co-directeur)  
Jamal Eddine RHAZI (co-directeur)  
Patrice RIVARD (rapporteur)  
Saleh KAVEH (évaluateur externe)  
Michel CHOUTEAU (évaluateur externe)

Sherbrooke (Québec) Canada

Septembre 2013



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*ISBN: 978-0-494-96319-7*

*Our file Notre référence*

*ISBN: 978-0-494-96319-7*

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

« Je dédie cet effort modeste aux aspirants à l'amour spirituel en Dieu, au rapprochement entre les peuples... , à ceux qui travaillent sans bornes pour la justice et la dignité humaine, aux peuples souffrants de l'injustice en Palestine et aux victimes de la dictature à Rabaah en Égypte et partout dans le monde. Vous étiez dans mon cœur tout au long de ce travail! »

« To all people who seek the love of God, the rapprochement between peoples... , and most importantly to all those who strive days and nights for the sake of freedom, justice and dignity, to all people who suffer from injustice in Palestine and who are victims of the Torture in Rabaah in Egypt and everywhere in the world. You were always in my heart throughout this work! »

# RÉSUMÉ

Le géoradar (Ground Penetrating Radar (GPR)) constitue une technique de contrôle non destructif (CND) intéressante pour la mesure des épaisseurs des dalles de béton et la caractérisation des fractures, en raison de ses caractéristiques de résolution et de profondeur de pénétration.

Les équipements géoradar sont de plus en plus faciles à utiliser et les logiciels d'interprétation sont en train de devenir plus aisément accessibles. Cependant, il est ressorti dans plusieurs conférences et ateliers sur l'application du géoradar en génie civil qu'il fallait poursuivre les recherches, en particulier sur la modélisation et les techniques de mesure des propriétés électriques du béton. En obtenant de meilleures informations sur les propriétés électriques du béton aux fréquences du géoradar, l'instrumentation et les techniques d'interprétation pourraient être perfectionnées plus efficacement.

Le modèle de Jonscher est un modèle qui a montré son efficacité dans le domaine géophysique. Pour la première fois, son utilisation dans le domaine génie civil est présentée.

Dans un premier temps, nous avons validé l'application du modèle de Jonscher pour la caractérisation de la permittivité diélectrique du béton. Les résultats ont montré clairement que ce modèle est capable de reproduire fidèlement la variation de la permittivité de différents types de béton sur la bande de fréquence géoradar (100 MHz-2 GHz).

Dans un deuxième temps, nous avons montré l'intérêt du modèle de Jonscher en le comparant à d'autres modèles (Debye et Debye-étendu) déjà utilisés dans le domaine génie civil. Nous avons montré aussi comment le modèle de Jonscher peut présenter une aide à la prédiction de l'efficacité de blindage et à l'interprétation des ondes de la technique GPR. Il a été déterminé que le modèle de Jonscher permet de donner une bonne présentation de la variation de la permittivité du béton dans la gamme de fréquence géoradar considérée. De plus, cette modélisation est valable pour différents types de béton et à différentes teneurs en eau.

Dans une dernière partie, nous avons présenté l'utilisation du modèle de Jonscher pour l'estimation de l'épaisseur d'une dalle de béton par la technique GPR dans le domaine fréquentiel.

**Mots-clés :** CND, béton, géoradar , permittivité, Jonscher

# REMERCIEMENTS

Monsieur Richard Gagné, professeur à l'Université de Sherbrooke et directeur adjoint du Centre de Recherche Interuniversitaire sur les infrastructures en Béton (CRIB), m'a fait l'honneur d'accepter d'être président de mon jury de thèse, je lui exprime ma profonde gratitude.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Patrice Rivard, professeur à l'Université de Sherbrooke, du Groupe de Recherche sur l'Auscultation et l'Instrumentation (GRAI), qui a accepté de juger ce travail et d'en être le rapporteur.

J'adresse mes plus vifs sentiments de gratitude à mes directeurs de thèse Monsieur Gérard Ballivy, professeur à l'Université de Sherbrooke, du Laboratoire GRAI, Monsieur Jamal Eddine Rhazi, professionnel de recherche au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke et Monsieur François BOONE, professeur à l'Université de Sherbrooke, directeur du Laboratoire d'Électronique Micro-Onde (LEMO), pour la confiance qu'ils m'ont accordée, leur soutien constant, leurs précieux conseils et leur disponibilité tout au long de cette recherche.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Michel CHETEAU, professeur au département des génies civil, géologique et des mines à l'École Polytechnique de Montréal, et Monsieur Kaveh SALEH, chercheur de l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ), pour avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Je voudrais aussi remercier tous mes collègues du travail en particulier Monsieur Serge Ape-dovi Kodjo, Monsieur Bilal FILALI, Monsieur Abdeslam KADRANI et Monsieur Mbarek EL MORSLI. J'apprécie pleinement les conseils qu'ils m'ont donnés ainsi que leur participation aux travaux réalisés au cours de cette thèse. Merci à Danick CHARBONNEAU, technicien au Laboratoire pour sa disponibilité et son aide.

Je remercie Madame Nicole LAVERDIÈRE, secrétaire du groupe Mecaroches, qui, en plus d'avoir eu à résoudre nos problèmes administratifs et logistiques, a été une amie durant ces années d'étude.

Je remercie bien sûr Madame Nicole DESLANDE, secrétaire à École Entreprise du Centre Saint-Michel de Sherbrooke, Monsieur Hafid AGOURRAM et Monsieur Hassan GUBARA SAID, professeurs à l'Université Bishop's, Monsieur Ahmed GODAT et Monsieur Taha ABD EL RAHMAN doctorants du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke, pour leur travail de relecture et leurs commentaires pour l'amélioration de ce mémoire.

À vous mes parents, je dis un immense merci. Je vous suis infiniment reconnaissant pour votre soutien et vos encouragements.

Je remercie également mes frères et sœurs, mes amis et amies, ceux et celles que je porte dans mon cœur et qui m'ont toujours encouragé et supporté moralement. Je remercie aussi ceux que j'ai laissés au Maroc où ailleurs, dont la liste est trop longue pour les citer ici, mais qui se reconnaîtront.

Merci à mes enfants surtout...

Enfin, je ne pourrais oublier de remercier spécialement la jeune, belle, charmante et intelligente Raja ELHAJOUBI de m'avoir supporté tout au long de ma thèse. Elle était présente au quotidien, autant dans les moments de joie que dans les moments les plus difficiles, et n'a cessé de me soutenir et de m'encourager.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1	Mise en contexte et problématique	1
1.2	Définition du projet de recherche	3
1.2.1	Objectifs du projet de recherche	3
1.2.2	Contributions originales	4
1.3	Plan du document	4
<b>2</b>	<b>Évaluation des ouvrages</b>	<b>6</b>
2.1	Les ouvrages de béton armé	6
2.2	Composition du béton	7
2.2.1	Description	7
2.2.2	Rôle des différents éléments constituant le béton	8
2.3	Pathologie (La dégradation du béton)	8
2.3.1	La fissuration	8
2.3.2	La délamination	10
2.3.3	Les altérations chimiques	10
2.3.4	Les altérations physiques (les cycles gel-dégel)	13
2.3.5	Les altérations mécaniques (Corrosion des barres d'armatures)	15
2.4	Techniques de CND appliquées aux ouvrages de béton armé	17
2.4.1	Techniques acoustiques	18
2.4.2	Thermographie infrarouge	20
2.4.3	Technique radar	22
2.4.4	Tableau comparatif	22
<b>3</b>	<b>Technique radar</b>	<b>24</b>
3.1	Introduction	24
3.2	Historique	24
3.3	Principe de la technique	25
3.4	Instrumentation	27
3.4.1	Configuration monostatique	28
3.4.2	Configuration bistatique	28
3.5	Propagation des ondes électromagnétiques dans les matériaux	30
3.5.1	Équations de Maxwell	30
3.5.2	Les propriétés électromagnétiques des matériaux génie civil aux fréquences radar	38
<b>4</b>	<b>Modélisation de la variation de la permittivité diélectrique effective</b>	<b>42</b>
4.1	Les modèles classiques	43
4.2	Le modèle de Jonscher	44
4.3	Comparaison des modèles	45

<b>5</b>	<b>Validation du modèle de Jonscher</b>	<b>51</b>
5.1	Introduction	53
5.2	Electromagnetic waves propagation models	55
5.3	Jonscher model	56
5.4	Adaptation of the Jonscher model to concrete	57
5.5	Validation of the Jonscher model on published data	59
5.5.1	Computation of Jonscher's parameters	59
5.5.2	Results and Discussions	59
5.6	Validation of the Jonscher model with respect to laboratory measurements	62
5.6.1	Data acquisition and measurement system	62
5.6.2	Samples considered	64
5.6.3	Jonscher's parameters computation	65
5.6.4	Results and discussions	65
5.7	Conclusion	67
<b>6</b>	<b>Comparaison et applications</b>	<b>69</b>
6.1	Introduction	71
6.2	Modeling of concrete	73
6.2.1	Debye model and Debye model extended	73
6.2.2	Jonscher model	75
6.2.3	Results and Discussions	76
6.2.4	Shielding effectiveness	81
6.3	Ground-Penetrating Radar	82
6.3.1	The incident frequency spectrum of GPR	85
6.3.2	Frequency spectrum of reflected wave	85
6.4	Summary and outlook	88
<b>7</b>	<b>Mesure d'épaisseur des dalles de béton</b>	<b>90</b>
7.1	Introduction	91
7.2	GPR	92
7.2.1	The incident frequency spectrum of GPR	92
7.2.2	Frequency spectrum of reflected wave	94
7.3	Modeling of the effective dielectric constant of the concrete	94
7.4	Impulse-Response method principle	95
7.5	Estimated thickness of concrete	96
7.5.1	Effect of the change in MC and thickness	96
7.5.2	Measuring of the thickness of a slab of concrete	98
7.6	Conclusion	100
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>102</b>
8.1	Sommaire	102
8.2	Contributions	102
8.3	Travaux futurs	104



# LISTE DES FIGURES

2.1	Dommmages visibles associés à la RAS sur le viaduc du Vallon/Charest (A) Fissuration horizontale importante de la dalle pleine, avec fissure majeure du lit d'armatures supérieur ; fissuration polygonale à longitudinale des colonnes en Y ; fissuration polygonale, corrosion des armatures et pop-outs à l'extrémité de la base massive ; fissuration principalement orthogonale (parallèle aux armatures), corrosion des armatures et exsudats de gel blanchâtre sur la face latérale de la basse massive. (B) Fissuration majeure dans la dalle, avec éclatement du béton au niveau de la clef de l'ouvrage. (C) Désagrégation sévère du béton et corrosion des barres d'armatures à la base d'une colonne en Y très exposée (adjacente à la voie sud de l'autoroute du Vallon) [18] . . . . .	11
2.2	Exemple de dommages causés par le gel-dégel [30] . . . . .	14
2.3	Détérioration d'un pilier de pont causée par des sels de déglçage projetés par la circulation [31] . . . . .	14
2.4	Dommmages dus au gel autour d'un regard d'égout [32] . . . . .	15
2.5	Mécanisme de corrosions des aciers d'armature en présence de chlorure [29]	17
2.6	Modes de transmission pour l'essai sonique (a) direct, (b) semi direct, (c) indirect . . . . .	19
2.7	Essai sonique appliqué à un mur en maçonnerie de pierres pour le contrôle de l'efficacité de l'injection et comparaison des résultats avant et après l'intervention (les couleurs sombres indiquent les plus grandes vitesses) [38] . .	19
2.8	Configuration de l'essai d'impact-écho [39] . . . . .	20
2.9	Image thermique d'une structure [40] . . . . .	21
3.1	Schéma de principe de l'acquisition d'une coupe-temps radar (B-scan) . . . . .	26
3.2	Schéma synoptique d'un radar impulsional . . . . .	29
3.3	Exemple de radar impulsional portable (SIR-3000, marque GSSI) . . . . .	29
3.4	Forme d'une onde électromagnétique à un instant donné . . . . .	31
3.5	Différents types de polarisation diélectrique . . . . .	35
3.6	Évolution de la permittivité diélectrique sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Propriété d'additivité des susceptibilités électriques d'après [64] . .	35
3.8	Propriétés diélectriques de béton pour différentes teneur en eau (6,2% et 9,3% ) [73] d'après [69] . . . . .	39
3.7	Cellule de mesure (ligne coaxiale et guide cylindrique court-circuité) reliée à l'analyseur de réseaux vectoriel et éléments constitutifs du kit d'étalonnage (court-circuit, court-circuit coulissant, échantillons cylindriques étalons) [72]	40
3.9	Variations typiques de la constante diélectrique et de la conductivité en fonction de la fréquence et la teneur en eau [70] . . . . .	40
3.10	Partie réelle et partie imaginaire de la permittivité du béton [0 30] mesurées 3 jours après la fabrication. Le résultat présenté est la moyenne mesurée sur cinq échantillons [71] . . . . .	41

4.1	Variation en fréquence de la susceptibilité électrique effective et de la permittivité diélectrique effective pour différents modèles (Debye, Cole-Cole, Cole-Davidson et Jonscher) [79] . . . . .	46
4.2	Partie réelle de la permittivité du béton 0-30 en fonction de la fréquence et résultats du calcul par les modèles de Cole-Cole, de polarisation de double couche, de Debye (à 4 paramètres), de CRIM et SSC [71] . . . . .	47
4.3	Partie imaginaire de la permittivité du béton 0-30 en fonction de la fréquence et résultats du calcul par les modèles de Cole-Cole, de polarisation de double couche, de Debye de CRIM et SSC [71] . . . . .	48
4.4	Partie imaginaire de la permittivité du béton en fonction de la fréquence et résultats du calcul par les modèles de Debye et de Debye étendu (teneur en eau =12,0%)[82] . . . . .	49
4.5	Partie réelle de la permittivité du béton en fonction de la fréquence et résultat du calcul par le modèle de Debye étendu (teneur en eau =12,0%)[82] . . . .	49
5.1	Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling, where concrete MC = 0.2%. . . .	60
5.2	Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling, where concrete MC = 5.5%. . . .	60
5.3	Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling, where concrete MC = 9.3%. . . .	61
5.4	Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling, where concrete MC = 12.0%. . . .	61
5.5	Measurement system . . . . .	63
5.6	Comparison between the measured values and those given by modelling of the change in the relative dielectric permittivity as a function of frequency. Case of saline 15 part per thousand . . . . .	64
5.7	Comparison of the values of relative dielectric permittivity ( $\epsilon'_r$ and $\epsilon''_r$ ) given by the Jonscher models corresponding to various M1 and M2 mortars and the measures taken by the probe. . . . .	66
5.8	Comparison of the values of the relative dielectric permittivity ( $\epsilon'_r$ and $\epsilon''_r$ ) given by the Jonscher model corresponding to the various B1 and B2 concretes and the measures given by the probe. . . . .	67
6.1	Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling for MC = 0.2%. . . . .	77
6.2	Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling for MC = 5.5%. . . . .	78
6.3	Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling for MC = 6.2%. . . . .	79
6.4	Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling for MC = 12.0%. . . . .	80
6.5	Comparison of shielding effectiveness for a concrete wall of thickness 0.3 m and MC = 0.2%. . . . .	83

6.6	Comparison of shielding effectiveness for a concrete wall of thickness 0.3 m and MC = 12.0% . . . . .	83
6.7	Overall reflection model for concrete slabs. . . . .	84
6.8	Incident frequency spectrum [136, 137]. . . . .	86
6.9	Modeled and measured frequency spectrums for MC=0.2% . . . . .	86
6.10	Modeled and measured frequency spectrums for MC=6.2% . . . . .	87
6.11	Modeled and measured frequency spectrums for MC=12.0% . . . . .	87
7.1	Air-coupled data collection from concrete slabs. . . . .	93
7.2	Incident frequency spectrum $F_i$ [137]. . . . .	93
7.3	Theoretical mobility plot for impulse-response test of perfect pile in homogeneous soil. . . . .	95
7.4	Frequency spectra of the reflected signal on a concrete slab for MC=0.2% (up) and MC=12% (down). . . . .	97
7.5	Amplitude plot for d=0.3 m and 0.2%. . . . .	99

# LISTE DES TABLEAUX

2.1	Méthodes de CND pour le diagnostic des dégradations du béton [43] . . . . .	22
3.1	Différents systèmes radar commercialisés . . . . .	30
5.1	Jonscher's parameters determined to adjust the Jonscher model to the effective dielectric constant measurements. . . . .	62
5.2	Characteristics of investigated concretes. . . . .	65
5.3	Jonscher's parameters determined to adjust the Jonscher model with measures of the effective dielectric constant on various samples. . . . .	66
6.1	Fitted parameters for concrete samples. . . . .	76
7.1	Fitted parameters for concrete samples. . . . .	95
7.2	Velocity of propagation and resolution for concrete samples. . . . .	99
7.4	RMSE between the real and estimated thickness for different MCs. . . . .	100
7.3	Estimated thickness for concrete samples with different MCs. . . . .	100

# LEXIQUE

---

Terme technique	Définition
Antenne	Appareil qui intercepte ou rayonne de l'énergie en radiofréquence
Bande	Gamme de fréquences ; il s'agit de l'ensemble des fréquences entre deux limites définies, destiné à un emploi spécifique
Résolution	La plus petite variation de la grandeur G à mesurer qu'un appareil est capable de détecter
Dalle de béton	Élément de construction en béton, rigide, horizontal ou presque, d'une grande surface par rapport à son épaisseur
Béton armé	Béton dont l'armature métallique est placée de sorte que les deux matériaux agissent conjointement pour résister aux efforts
Ouvrage d'art	Construction nécessaire à l'établissement et à l'exploitation d'une voie de communication tels un pont, un tunnel, un mur
Pont	Ouvrage d'art permettant de franchir un cours d'eau, des voies de circulation routière ou ferroviaire ainsi que tout autre obstacle

---

# LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
$E$	Champ électrique [Volt/m]
$H$	Champ magnétique [Ampère/m]
$\epsilon$	Permittivité diélectrique [Faraday/m]
$\sigma$	Conductivité électrique [Siemens/m]
$\mu$	Perméabilité magnétique [Henry/m]
$t$	Variable temporelle [s]
$\beta$	Coefficient de phase [rad/m]
$\alpha$	Facteur d'atténuation [rad/m] ou [Np/m]
$f$	Variable fréquentielle [Hz]
$\omega$	Pulsation (ou fréquence angulaire) [rad/s]
$\gamma$	Facteur d'Helmoltz, Longueur d'onde [rad/m]
$k$	Facteur d'onde, nombre d'onde [ $m^{-1}$ ]
$B$	Densité de flux magnétique [Webber/m <sup>2</sup> ]
$\mu_0$	Perméabilité magnétique dans le vide = $4\pi 10^{-7} H/m$
$j_c$	Densité de courant de conduction [A/m <sup>2</sup> ]
$\sigma', \sigma''$	Parties réelle et imaginaire de la conductivité électrique [S/m]
$D$	Densité de flux électrique = <i>Coulomb/m<sup>2</sup></i>
$\epsilon_0$	Permittivité diélectrique dans le vide : $8,8541878176 \cdot 10^{-12} F/m$ (ou $C^2N^{-1}m^{-2}$ )
$j_d$	Densité de courant de déplacement [A/m <sup>2</sup> ]
$j$	Densité de courant totale [A/m <sup>2</sup> ]
$\chi_{interfacial}, \chi_{dipolaire}, \chi_{electronic}, \chi_{ionic}$	Susceptibilités électriques liées aux mécanismes interfacial, dipolaire ... [sans dimension]
$\epsilon', \epsilon''$	Parties réelle et imaginaire de la permittivité diélectrique [F/m]
$\epsilon_e$	Permittivité diélectrique effective [F/m]
$\sigma_e$	Conductivité électrique effective [S/m]
$\epsilon'_e, \epsilon''_e$	Parties réelle et imaginaire de la permittivité diélectrique effective [F/m]
$\sigma'_e, \sigma''_e$	Parties réelle et imaginaire de la conductivité électrique effective [S/m]
$\epsilon_r, \epsilon$	Permittivité diélectrique relative [sans dimension]
$\delta$	Angle de perte [rad]
$Q$	Facteur de qualité [sans dimension]
$v$	Vitesse [m/s]
$c$	Vitesse dans le vide = $3 \cdot 10^8 m/s$
$\epsilon_\infty$	Permittivité à fréquence infinie [F/m]
$\sigma_{DC}$	Conductivité électrique à fréquence nulle [S/m]
$\chi_e$	Susceptibilité électrique effective [sans dimension]
$\tau$	Temps de relaxation [s]
$a$	Facteur d'amortissement (modèle de Cole-Cole) [sans dimension]
$b$	Facteur d'amortissement (modèle de Cole-Davidson) [sans dimension]

*suite page suivante*

*suite de la page précédente*

---

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>
$n$	Facteur de variation (modèle de Jonscher) [sans dimension]
$\chi_r$	Susceptibilité électrique référence (modèle de Jonscher) [sans dimension]
$\omega_r$	Pulsation (ou fréquence angulaire) de référence (modèle de Jonscher) [rad/s]
$\Phi$	Porosité (modèles SSC et CRIM)
$\epsilon_{mix}$	Permittivité du mélange (modèles SSC et CRIM)
$\epsilon_{mat}$	Permittivité de la matrice (modèles SSC et CRIM)
$\epsilon_w$	Permittivité de l'eau (modèles SSC et CRIM)
$\rho$	Coefficient de réflexion [sans dimension]
$\Gamma$	Coefficient de réflexion total [sans dimension]
$T$	Coefficient de transmission [sans dimension]
$F_i$	Spectre de fréquence de l'onde incidente [dB]
$F_r$	Spectre de fréquence de l'onde réfléchie [dB]
$d$	Épaisseur d'une dalle [m]

---

# LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
EM	ElectroMagnétique
UdeS	Université de Sherbrooke
CND	Contrôle Non Destructif
MTQ	Ministère des Transports du Québec
RADAR	RADio Detection And Ranging
GPR	Ground Penetrating Radar
LEMO	Laboratoire d'Electronique Micro-Ondes
GSSI	Geophysical Survey System Incorporation
ASTM	American Society for Testing and Materials
VNA	Vector Network Analyser



# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte et problématique

Les préoccupations dominantes actuelles des maîtres d'ouvrages, en génie civil, s'orientent vers la connaissance des infrastructures existantes, leur maintenance et leur évolution en fonction des services qui leur seront demandés. Mais, les méthodes et les outils nécessaires à l'établissement des diagnostics nécessaires pour répondre à ces demandes semblent toujours insuffisants dans ce contexte de gestion de patrimoine.

Pour mieux répondre aux interrogations des gestionnaires, ces outils de diagnostics doivent s'appuyer sur des techniques de reconnaissance non destructives afin d'obtenir des informations sur l'état et les géométries internes des structures sous investigation.

Ces techniques de contrôle, de reconnaissance ou d'évaluation non destructives reposent sur la mesure de différents types de champs (tels que sismiques, acoustiques, électriques, électromagnétiques, etc.) au proche voisinage de la structure ou la zone investiguée, donnant des informations sur les caractéristiques physiques correspondantes des matériaux présents.

Parmi celles-ci, figure la technique géoradar qui est traditionnellement utilisée en réflectométrie pour la détection et l'étude de la géométrie des discontinuités dans le béton. En effet, le système géoradar émet des impulsions électromagnétiques de fréquences appropriées au moyen d'une antenne émettrice. Ces impulsions, rayonnées sous forme de lobes, se propagent au sein de la structure sondée et subissent des réflexions partielles ou totales lorsqu'elles rencontrent des contrastes d'impédance électromagnétique. Une antenne réceptrice enregistre l'énergie reçue de manière directe ou indirecte (réflexions générées par des objets situés dans son environnement). Les fréquences utilisées se situant dans l'intervalle de 100 MHz à 2 GHz, la résolution obtenue est supérieure à celle des autres méthodes.

L'auscultation des ouvrages de génie civil par la technologie géoradar se base sur des principes établis dans le domaine de la géophysique. En effet, cette technique existe dans le domaine géophysique depuis plus de 35 ans. À l'époque, les connaissances sur la propagation, la pénétration et l'interaction de l'énergie électromagnétique dans le sol étaient limitées. Par conséquent, il a fallu procéder par tâtonnement et acquérir l'expérience par le biais de l'étude de nombreuses applications dans des conditions différentes.

D'une manière générale, les principales applications du géoradar développées jusqu'à présent, pour le génie civil, peuvent se décomposer en deux familles : mesure d'épaisseur (épaisseur de dalles, de couches de roulement, profondeur d'armatures. . .) et détection (cavités, délamination des tabliers de ponts, canalisations, structures de chaussées. . .) [1]. Une grande part de l'activité géoradar dans le monde a trait à l'évaluation de l'état des chaussées [2] et des tabliers de ponts [3-5]. Un intérêt croissant est porté sur les techniques d'imagerie radar [6].

L'intérêt de cette technique tient à deux caractéristiques essentielles : d'une part, elle offre la possibilité de déceler la présence de discontinuités et de dégradations en profondeur échappant à l'inspection visuelle [7] et, d'autre part, l'auscultation est totalement non destructive, de mise en œuvre simple et rapide. Cependant, les premiers résultats obtenus (détection de la délamination, mesures de profondeur) ne présentaient pas une grande fiabilité et le développement commercial trop rapide de l'auscultation radar a, dans un premier temps, porté préjudice à la technique.

Le principal problème de l'auscultation du béton par géoradar tient en effet à la difficulté d'interprétation des signaux. Cette difficulté est, d'une part liée à la qualité du signal émis par l'antenne et, d'autre part, au manque de connaissances précises sur les propriétés électromagnétiques du béton. Les problèmes de qualité des signaux incidents ont aujourd'hui beaucoup moins d'importance grâce au développement d'antennes de haute résolution. L'antenne couplée de surface GSSI, de fréquence centrale égale à 1.5 GHz, présente par exemple l'avantage d'émettre une impulsion très courte limitant ainsi les interférences et facilitant les opérations de traitement. En revanche, des lacunes importantes demeurent encore aujourd'hui sur la compréhension des propriétés électromagnétiques du béton. Ce problème constitue à l'heure actuelle l'une des priorités de plusieurs équipes de recherche de par le monde.

En effet, l'un des thèmes de recherche de la Chaire industrielle du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada sur l'auscultation des structures de béton (Université de Sherbrooke) vise l'étude des propriétés diélectriques du béton pour améliorer l'analyse des données radar.

En fait, les propriétés électromagnétiques conditionnent le comportement des ondes électromagnétiques se propageant dans le béton : vitesse, atténuation, dispersion. . . Elles dépendent de plusieurs caractéristiques du béton : composition minéralogique, hétérogénéité du matériau, porosité, degré de saturation en eau, contamination par les ions chlorure. . .

Une bonne modélisation des propriétés électromagnétiques du béton est par conséquent, à la base de l'amélioration de la technologie géoradar dans son ensemble (mesures des épaisseurs des dalles, détection et positionnement des armatures, imagerie. . . ).

Cette thèse s'inscrit dans un contexte de trouver un modèle qui reproduit d'une façon fidèle la variation fréquentielle de la constante diélectrique du béton sur la bande de fréquence géoradar.

## **1.2 Définition du projet de recherche**

L'objectif principal de ce projet est de développer et valider un modèle permettant de montrer l'aspect dispersif du béton et ceci pour différents types de béton, à différents teneurs en eau. La bande de fréquence sur laquelle la constante diélectrique du béton sera étudiée est celle du géoradar (100 MHz–2 GHz). Le deuxième objectif recherché à travers cette innovation est la possibilité de développer l'équivalent électromagnétique de la technique acoustique impact-echo. L'utilisation des ondes électromagnétiques offre, en effet, une meilleure résolution que les ondes acoustiques. Ainsi, compte tenu du fait que le traitement des données radar est traditionnellement effectué dans le domaine temporel, un effort sera consacré à l'exploration et à l'exploitation du contenu fréquentiel des ondes géoradar à l'instar de la méthode impact-echo. L'aspect qui sera abordé concerne la mesure des épaisseurs des dalles du béton dans le domaine fréquentiel.

### **1.2.1 Objectifs du projet de recherche**

Pour atteindre nos objectifs généraux, 5 objectifs spécifiques sont définis :

- Passer en revue de la littérature des modèles permettant de décrire la variation fréquentielle de la constante diélectrique ;
- Développer et valider expérimentalement le modèle choisi ;
- Comparer ce modèle aux principaux modèles appliqués à la constante diélectrique du béton en génie civil ;
- En utilisant ce modèle, prédire la réponse fréquentielle du géoradar sur une dalle de béton ;
- Décrire la méthode fréquentielle de mesure de l'épaisseur d'une dalle de béton en se basant sur les résultats précédents.

## **1.2.2 Contributions originales**

L'originalité de ce travail de recherche porte sur l'application pour la première fois du modèle de Jonscher pour la caractérisation fréquentielle de la permittivité diélectrique de différents types de béton. De plus, l'étude des ondes géoradar dans le domaine fréquentiel qui va présenter l'équivalent électromagnétique de la technique acoustique impact-echo est nouvelle et permettra la mesure des épaisseurs des dalles de béton.

## **1.3 Plan du document**

Outre ce premier chapitre introductif, ce rapport est structuré en sept parties, soit six chapitres et une conclusion générale.

Dans ce chapitre, le contexte du projet, la problématique, les objectifs généraux, les objectifs spécifiques et l'originalité du travail sont présentés.

Dans le chapitre 2, nous présentons les principes constructifs des ouvrages en béton armé, les matériaux qui constituent le béton ainsi que les pathologies auxquelles ils sont sujets. Enfin, nous abordons les principales techniques appliquées au contrôle des structures en béton armé.

Dans le chapitre 3, nous décrivons le fonctionnement de la technique GPR et l'équipement utilisé. Nous explicitons le principe de propagation des ondes électromagnétiques dans des matériaux diélectriques et nous présentons les propriétés électromagnétiques du béton (perméabilité, conductivité et permittivité) aux fréquences géoradar.

Le chapitre 4 est consacré à la modélisation de la variation fréquentielle de la permittivité diélectrique effective du béton. Des mesures des propriétés électromagnétiques de différents matériaux sont exploitées afin de dégager une loi décrivant la dépendance fréquentielle de la permittivité diélectrique effective. Un modèle à trois paramètres est introduit. Ce modèle évite l'emploi de modèles plus lourds de type Debye et Debye-étendue (très présents dans la littérature).

Toutefois, la revue de la littérature sera aussi présentée en introduction de chacun des trois chapitres 5 à 7 qui correspondent à des articles de journaux publiés dans le cadre de cette thèse.

Le cinquième chapitre présente une validation du modèle de Jonscher (article 1). En effet, dans un premier temps, le modèle de Jonscher a été comparé à des mesures publiées par d'autres chercheurs, afin d'évaluer son potentiel à modéliser la permittivité des dalles de

béton à différentes teneurs en eau. Les résultats ont montré clairement que ce modèle est capable de reproduire fidèlement la variation de la permittivité sur la bande de fréquence géoradar . Dans un deuxième temps, le modèle de Jonscher a été testé sur des dalles de béton à différentes teneur en eau construites à cette fin au laboratoire. Les mesures de référence ont été effectuées par une sonde coaxiale et un VNA (Vector Network Analyser ). Les résultats étaient aussi très satisfaisants. Les résultats des mesures des propriétés diélectriques réalisées sur des mortiers et des bétons de différents rapports eau/ciment seront présentés et analysés en fonction de la porosité et de la teneur en eau.

Dans le sixième chapitre, le modèle de Jonscher a été comparé à d'autres modèles (Debye et Debye-étendu) et s'est avéré le meilleur (article 2). Comme application, ce modèle a été capable de prédire l'onde géoradar réfléchi sur des dalles de béton à différentes teneurs en eau avec beaucoup de précision. Cette prédiction d'ondes a permis, entre autres, de comprendre la propagation des ondes radar émises dans le béton en fonction de ses caractéristiques électromagnétiques.

Dans le septième chapitre, un modèle synthétique de la réflexion sur une dalle de béton des ondes générées par un GPR d'antenne non couplée de 1 GHz de fréquence centrale, basé sur un code de calcul utilisant la modélisation fréquentielle de la permittivité du béton par le modèle de Jonscher, a été développé. Des procédures de traitement des signaux radar permettant de mesurer les épaisseurs des dalles de béton en fonction de la fréquence sont présentées (article 3).

Finalement, au dernier chapitre, une synthèse des approches développées dans la présente thèse est présentée. Les résultats importants de nos travaux ainsi que les conclusions qui en découlent sont résumés dans la première section. Ensuite, nos contributions originales à l'avancement des connaissances techniques et théoriques sont énumérées. Enfin, une description des perspectives de cette recherche est donnée.

## CHAPITRE 2

# Évaluation des ouvrages

### 2.1 Les ouvrages de béton armé

Le matériau « béton » est l'élément incontournable intervenant dans la construction et la réparation d'une grande partie de structures qui constituent le patrimoine d'ouvrages d'art canadien. Il intervient ainsi dans la construction des ponts autoroutiers ou ferroviaires, des gratte-ciel, des parcs de stationnement, des barrages, des enceintes de confinement dans les centrales nucléaires, etc. Le vieillissement de ces structures et leurs réfections suscitent des investissements majeurs pour l'entretien et pour la conservation.

De nos jours, un grand nombre d'ouvrages exposés aux diverses agressions ou sollicitations physiques, mécaniques ou chimiques, menacent de ne pas atteindre leur durée de vie utile anticipée.

Au Québec, comme plusieurs villes à travers l'Amérique du Nord, les réseaux routiers furent majoritairement construits dans les années 1960 et 1970. En effet, 38,8% et 32,7% des structures ont été construites dans les années 1960 et 1970 respectivement [8]. Plus de 50% des structures ont plus de 42 années de service et plus de 83% ont plus de 32 années de service [8].

Deux éléments composent le réseau routier : les chaussées et les structures. Le réseau routier québécois s'étend sur près de 200 000 kilomètres de chaussées. Les trois paliers de gouvernement (Canadien, Québécois et Municipal) ont la charge d'entretenir une portion inégale de ces routes. Le terme « structures » réfère à deux grandes catégories d'ouvrages, les ponts et les autres types d'ouvrages. Selon les données les plus récentes de la Direction des structures du MTQ, le réseau routier supérieur québécois comprend 4 945 structures.

Ces différents ouvrages, principalement les ponts, vieillissent différemment selon leur âge, leurs matériaux (pierre, béton, acier, bois, etc.) et leur exposition aux intempéries (pluie, gel, sels de déglçage, etc. différents en plaine et en altitude).

Puisque des travaux de réparation sont habituellement nécessaires 30 ans après la construction d'un ouvrage (l'âge critique vis-à-vis de la corrosion) [9], les besoins d'entretien et de réparation atteignent actuellement une pointe importante. En effet, le 24 février 2012, le

ministre des Transports du Québec, M. Pierre Moreau, et le ministre délégué aux Transports, M. Norman MacMillan, ont annoncé que près de 4 milliards de dollars seront investis sur le réseau routier en 2012-2013 ; ce montant inclut une contribution de 538 millions des partenaires. À l'instar des années précédentes, la prochaine saison de travaux routiers sera elle aussi fort animée et donnera lieu à plus de 1 600 chantiers sur l'ensemble du territoire québécois. L'entretien régulier de ce réseau permet de maintenir un niveau de sécurité suffisant et pérenne. Il est réalisé par le biais de contrôles d'épaisseurs des revêtements existants et également par la détection et le suivi de fissures. L'entretien requiert de localiser puis de surveiller les anciennes réparations qui fragilisent l'ouvrage. Le contrôle non destructif des structures en béton consiste à appliquer des méthodes de diagnostic afin de fournir à l'ingénieur et au maître d'ouvrage une évaluation de l'ensemble de la structure sans causer de dommages au béton. Cette évaluation concerne la qualité du béton (résistance, densité, présence de fissures, etc.), ou la conformité de la réalisation de la structure (disposition des armatures, épaisseur du béton d'enrobage, etc.).

En général, les questions que les maîtres d'ouvrage posent sont : la durée d'exploitation peut-elle être prolongée en toute sécurité ? Quel est son coût économique ? Quel est son coût environnemental ?

Ces questions complexes recouvrent de multiples domaines comme la mécanique de la structure, la durabilité des matériaux vis-à-vis de nombreuses sollicitations. Pour y répondre, il est nécessaire de développer les méthodes de diagnostic et de pronostic de l'état des ouvrages d'arts basées sur des évaluations expérimentales et des modèles prédictifs pertinents et fiables.

## **2.2 Composition du béton**

### **2.2.1 Description**

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment, d'eau et d'air. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomerat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

## **2.2.2 Rôle des différents éléments constituant le béton**

- Le ciment : c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- L'eau : c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- Les granulats : ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.
- Le sable : il permet de remplir les vides qui subsistent entre les gros granulats.
- Les plastifiants : ils augmentent la malléabilité du béton (facilité avec laquelle on peut travailler le béton).

## **2.3 Pathologie (La dégradation du béton)**

Le béton est le matériau le plus utilisé dans la construction des ouvrages du génie civil (ponts, chaussées, bâtiments, barrages, etc.). Le choix de ce matériau est motivé par ses caractéristiques physicochimiques, notamment sa dureté, sa durabilité et son prix. Malgré tout, le béton peut s'altérer avec le temps. Les pathologies du béton sont principalement physiques ou chimiques [10], et elles sont influencées par l'environnement (température, humidité relative, présence de polluants, etc.) durant et après la construction, par la qualité des matériaux et par la structure. La détérioration physique est une conséquence de l'érosion, du gel-dégel, d'une cristallisation minérale et de fissures dues à l'action mécanique. La détérioration chimique est une conséquence de la dissolution, sulfatation, réaction avec des dépôts polluants, etc. Cette partie décrit les principales altérations du béton.

### **2.3.1 La fissuration**

La fissuration dans le béton est l'un des phénomènes qui affecte le plus sa détérioration [11]. Ses causes sont multiples :

- structurale : surcharge, chocs, séismes... ;
- thermique : changements de température, action du gel-dégel... ;
- chimique : réaction alcalis-granulats (RAG), carbonatation, attaques par les ions sulfates, corrosion des barres d'armatures... ;
- retrait du béton.



La fissuration est le symptôme d'un endommagement ou d'une faiblesse d'une structure en béton, et peut être à l'origine d'altérations du matériau. À l'échelle du matériau, le rôle de l'enrobage est essentiellement d'assurer une protection des barres d'armatures : il ralentit, voire empêche, la progression d'agents extérieurs susceptibles de les corroder, et il maintient autour de l'acier des conditions favorables à sa passivation [12]. Or, la présence d'une fissure crée une augmentation locale de la perméabilité du béton, ce qui lui est préjudiciable. L'enrobage ne joue plus alors sa fonction d'étanchéité face aux liquides ou aux gaz. Une fissure peut alors provoquer l'amorçage ou accélérer le processus de dégradation du béton et des barres d'armatures en acier. De plus, elle constitue un chemin d'accès privilégié des éléments agressifs vers l'intérieur du béton [13]. Dans tous les cas, c'est un facteur aggravant de l'endommagement des structures en béton qui nécessite toujours une attention particulière. La corrosion des armatures provoque certainement beaucoup de dégâts dans les structures en béton armé.

Différentes études ont été menées afin de préciser les différents paramètres décrivant les fissures (densité de fissuration, ouverture...), et leur processus de formation [14]. On distingue alors les fissures primaires (créées lors de surcharges) et les fissures secondaires (moins importantes) qui apparaissent dans un second temps et contribuent à la fermeture partielle des fissures primaires. De la même manière, on différencie les fissures actives et les fissures passives, du point de vue du transfert des fluides. [14] définissent les fissures actives comme affectant les propriétés mécaniques et de transfert du matériau. Les fissures passives, perturbant essentiellement les propriétés mécaniques du matériau, ne sont activées que lorsque la structure est mise en charge. Pour l'étude de la fissuration des ouvrages, plusieurs degrés d'informations sont possibles [15] :

- sa détection et son identification ;
- sa localisation et la définition de son étendue ;
- sa typologie (fissure traversante, délamination...) ;
- sa géométrie (profondeur, ouverture...) ;
- son intensité (densité de fissuration...) ;
- son remplissage ;
- son évolution temporelle.

L'analyse se fait généralement sur site par l'intermédiaire de techniques non destructives, qui ont chacune leur domaine de validité et leur degré de précision.

### 2.3.2 La délamination

La délamination est une forme particulière de fissuration. [16], distingue deux types :

- délamination : dans le cas d'un béton armé, c'est une fracture parallèle à la surface du béton se situant généralement au niveau du plan des barres d'armatures. Celle-ci est une conséquence de la corrosion des armatures ou de l'action des cycles gel-dégel. Dans le cas d'un tablier de pont, le béton se dégrade en feuillets de quelques millimètres d'épaisseur, essentiellement en face supérieure de la dalle ;
- décollement : dans le cas d'une route, c'est la séparation entre l'enrobage bitumineux et la dalle de béton.

Dans les deux cas, il n'y a bien souvent pas de symptôme visible à l'œil. En général, on utilise la méthode du marteau et de la chaîne. Mais ces méthodes sont très longues. Il est donc nécessaire d'avoir recours aux méthodes d'auscultation pour déceler cette altération.

### 2.3.3 Les altérations chimiques

#### La réaction alcalis-granulats (RAG)

La RAG est une réaction chimique nuisible qui se produit entre certaines phases solides siliceuses des granulats et les hydroxydes alcalins ( $NaOH$ ,  $KOH$ ) de la solution interstitielle du béton [17]. Le produit formé est un gel siliceux contenant des ions sodium  $Na^+$ , potassium  $K^+$  et calcium  $Ca_2^+$ . Ce gel possède la propriété d'absorber de l'eau et de gonfler. Quand les pressions de gonflement ne peuvent être dissipées ou contraintes à l'intérieur du béton, celui-ci gonfle et se fissure. Les conséquences du gonflement causé par la RAG peuvent se manifester à différentes échelles :

- à l'échelle microscopique : sous forme de microfissures, de décollement des granulats et du fluage de la pâte de ciment ;
- à l'échelle de l'ouvrage : par le gonflement massif, le développement de contraintes importantes et la fissuration du béton.

Généralement, à la surface de l'ouvrage, un patron de fissuration polygonal se développe (figure 2.1), excepté dans les cas où il existe des contraintes majeures, ou des armatures dans le béton. Il est souvent accompagné d'exsudation de gel silice blanchâtre et aussi très souvent de sels de calcium et de sulfate lorsque les fissures sont suffisamment développées ou âgées.



Figure 2.1 Dommages visibles associés à la RAS sur le viaduc du Vallon/Charest (A) Fissuration horizontale importante de la dalle pleine, avec fissure majeure du lit d'armatures supérieur ; fissuration polygonale à longitudinale des colonnes en Y ; fissuration polygonale, corrosion des armatures et pop-outs à l'extrémité de la base massive ; fissuration principalement orthogonale (parallèle aux armatures), corrosion des armatures et exsudats de gel blanchâtre sur la face latérale de la basse massive. (B) Fissuration majeure dans la dalle, avec éclatement du béton au niveau de la clef de l'ouvrage. (C) Désagrégation sévère du béton et corrosion des barres d'armatures à la base d'une colonne en Y très exposée (adjacente à la voie sud de l'autoroute du Vallon) [18]

Les principaux facteurs qui influencent le développement de la RAG sont :

- la nature du granulat : [19] ont mis en relation la nature du granulat et l'ampleur des dommages occasionnés. Depuis, de nombreuses recherches confirment ce phénomène ;
- le degré d'humidité du béton : un degré d'humidité élevé (80 à 85%) est essentiel pour que la réaction puisse se développer et se maintenir [20] ;
- la teneur en alcalis du ciment : une augmentation du contenu en alcalis dans le ciment accélère le taux d'expansion [21] ;

- la température : en première approximation, la vitesse de réaction (loi d'Arrhenius) double pour chaque augmentation de 10°C. Pour une température autour de 40°C, un niveau d'expansion maximal est atteint ;
- la porosité du béton : si le milieu dans lequel la réaction a lieu est de porosité élevée, les produits de la réaction vont s'y accumuler, et ainsi pouvoir gonfler librement sans créer de pressions importantes à l'intérieur du béton ;
- la pression de confinement : de nombreuses études ont montré que le confinement du béton réduit de façon significative le gonflement généré par la réaction [22], mais par contre elle crée un état de contraintes important dans le milieu.

Au Québec [23], compte tenu de la géologie particulière de la province (la plupart des granulats utilisés dans la fabrication du béton sont riches en silice) et de l'utilisation de ciments à haute teneur en alcalis, la RAG affecte de nombreux ouvrages (barrages hydrauliques, ponts, écluses...). C'est notamment le cas de l'écluse de Saint-Lambert, près de Montréal, qui est un des bancs d'essai de la Chaire de Recherche CRSNG - Industrie sur l'auscultation de structures de béton. Le GRAI étudie cette pathologie depuis de nombreuses années [17, 24-26].

### **La lixiviation**

La lixiviation du béton est une attaque chimique du matériau dans une ambiance agressive (milieu acide). Il s'agit de la dissolution d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (la portlandite) et de la décalcification de la structure. Après lixiviation, la porosité du béton est augmentée et sa dégradation s'accélère (désagrégation par décohésion de la matrice). On note également une perte de résistance.

### **La carbonatation**

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne la plupart des bétons. Le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  qui est sous forme gazeuse dans l'atmosphère, pénètre dans les pores du béton. Cette pénétration est d'autant plus rapide que le béton est poreux. Il peut alors se dissoudre dans l'eau interstitielle qui se trouve dans certains pores et réagir avec le ciment pour former des carbonates. La carbonatation commence donc à la surface du béton et concerne une épaisseur appelée profondeur de carbonatation. Le carbonate de calcium réduit donc la porosité du béton, ce qui en soit, ne constitue pas un endommagement. On peut même considérer que dans ses premières phases, cette altération renforce le béton en constituant une barrière aux agents agressifs extérieurs. Mais en progressant à l'intérieur du béton, le front de carbonatation atteint les barres d'armatures et entraîne leur

dépassivation et donc à terme leur corrosion [27]. Indirectement, la carbonatation est donc nuisible à l'ouvrage, notamment sur les structures en béton armé.

## **La sulfatation**

L'humidité présente sous des dalles en béton a tendance à migrer vers le haut, transportant l'acide sulfurique produit par la réaction d'oxydation. Ainsi, lorsque l'acide sulfurique entre en contact avec le dessous de la dalle, le béton gonfle par sulfatation, se délamine et se désagrégé par le dessous. Le gonflement du béton tend à dilater la dalle à l'horizontale et à la verticale. La dilatation horizontale de la dalle étant retenu par les murs de fondation, c'est généralement vers le centre du bâtiment que se produisent les soulèvements, créant parfois un bombement, un vide sous la dalle et des fissures soulevées en formes d'étoiles ou de croix. Bien que les problèmes liés à la sulfatation du béton se fassent généralement sentir simultanément aux problèmes de gonflement du remblai, il arrive parfois que les dommages soient imputables seulement à la sulfatation du béton, sans gonflement du remblai. C'est souvent ce phénomène que l'on observe dans les bâtiments plus âgés. Ce phénomène peut être responsable de soulèvements très spectaculaires (jusqu'à 15 cm).

### **2.3.4 Les altérations physiques (les cycles gel-dégel)**

L'endommagement lié à des sollicitations de type gel-dégel est de nature physique. Le mécanisme de la dégradation repose alors sur le changement d'état (liquide/solide) de l'eau contenue dans la porosité du béton. La transformation expansive de l'eau qui gèle induit des contraintes internes. Or localement, le béton ne peut résister à ces variations de volume. Il en résulte soit un écaillage de la surface exposée quand l'altération n'affecte que les premiers millimètres en surface, soit l'apparition de zones de délamination à l'intérieur du béton [28]. La répétition des cycles gel-dégel entraîne des dégradations progressives (figure 2.2).

L'utilisation de sels déglaçants sur les ouvrages sollicités par le gel-dégel a un effet nuisible sur la durabilité du béton [29](figure 2.3).



Figure 2.2 Exemple de dommages causés par le gel-dégel [30]



Figure 2.3 Détérioration d'un pilier de pont causée par des sels de déglçage projetés par la circulation [31]

La présence de chlorures est aussi un facteur d'aggravation de l'endommagement de l'ouvrage par leur action notamment sur les mécanismes de corrosion des barres d'armatures en acier [33]. En raison du climat sévère qui règne au Québec, la plupart des structures horizontales de génie civil (tabliers de ponts, revêtements routiers, ...) sont fortement sollicités par les cycles gel-dégel et par l'action des sels fondants (figure 2.4).



Figure 2.4 Dommages dus au gel autour d'un regard d'égout [32]

L'utilisation d'ajouts cimentaires (fumée de silice), de super-plastifiants ou surtout d'un agent entraîneur d'air, augmente la durabilité du béton soumis aux cycles gel-dégel.

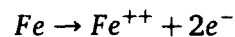
### **2.3.5 Les altérations mécaniques (Corrosion des barres d'armatures)**

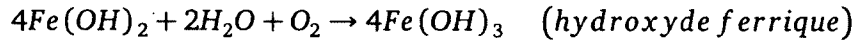
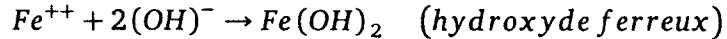
#### **Mécanismes de corrosion des aciers dans le béton**

Le phénomène de corrosion débute avec la création d'une pile électrochimique (figure 2.5). La solution interstitielle de la pâte de ciment durcie relie une zone anodique à une zone cathodique.

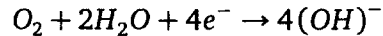
Les réactions se déroulent de la façon suivante [34] :

- Réactions anodiques :





- Réaction cathodique :



La première étape de la corrosion est la destruction de la couche passive. Les ions chlore activent la surface de l'acier, il y a donc formation de l'anode. Les ions ferreux  $Fe^{++}$ , passent en solution à l'anode (perte de section à l'anode) alors que des électrons libres se déplacent jusqu'à la cathode (autre section de la barre d'acier). Les électrons se combinent avec de l'eau et de l'oxygène pour former des ions hydroxyle. Les hydroxyles et les ions ferreux se déplaçant dans l'électrolyte, se combinent pour former de l'hydroxyle ferrique, qui se transforme par la suite en rouille qui se dépose sur l'acier. La corrosion ne peut pas avoir lieu dans un béton sec, c'est à dire à une humidité relative de moins de 60%, puisque que le processus de corrosion doit utiliser de l'eau pour assurer sa poursuite. Elle ne peut avoir lieu dans un béton complètement immergé dans l'eau, sauf si celle-ci contient de l'air car le processus de corrosion doit consommer de l'oxygène. Une cellule de corrosion n'existe que lorsqu'un potentiel électrochimique est présent. Le potentiel électrochimique peut être généré de deux façons, soit par une différence dans la nature des métaux ou par une différence de concentration de certains ions au voisinage de l'acier (cas des Cl<sup>-</sup>). La figure 2.5 présente schématiquement le mécanisme de la corrosion des aciers d'armature dans le béton en présence de chlorure [29].

### Les effets

La corrosion des barres d'armature a principalement deux effets. D'abord, les produits de corrosion occupent un volume de beaucoup supérieur au volume initial de l'acier. La formation de rouille exerce donc une pression interne dans le béton, ce qui entraîne éventuellement la fissuration et l'éclatement. Donc la corrosion des barres d'armatures, lorsque amorcée dans une structure, est un phénomène qui s'amplifie dans le temps. En effet, la fissuration du béton facilite le transport des agents agressifs jusqu'au niveau de l'acier, et donc une augmentation de la vitesse de corrosion [29]. L'autre effet est au niveau de la section de la barre d'acier. La progression de la corrosion réduit la capacité de la barre puisque sa section effective est réduite. De plus, la corrosion avec attaque par les ions chlorures peut



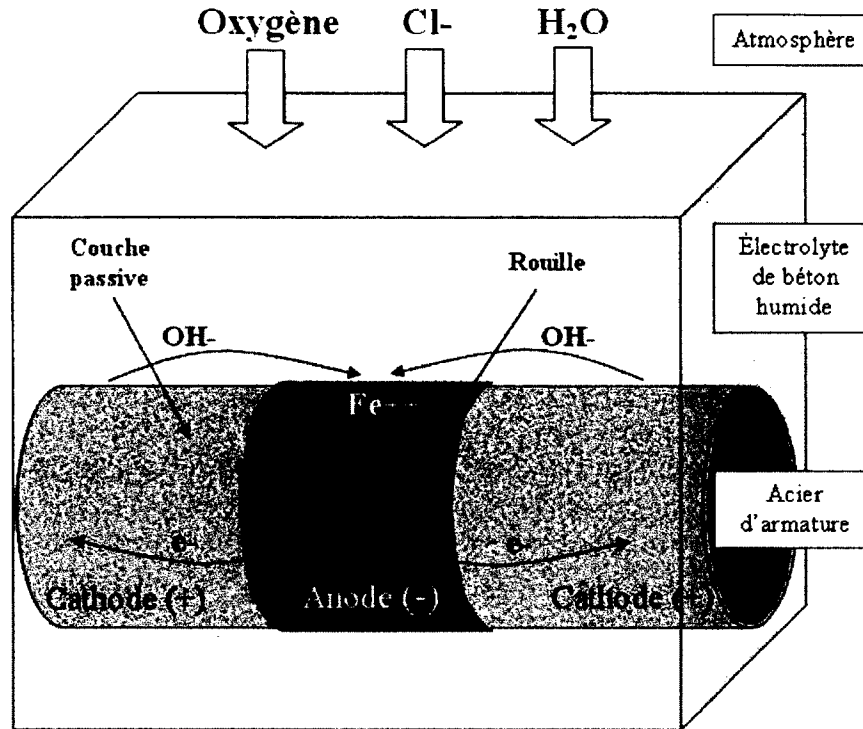


Figure 2.5 Mécanisme de corrosions des aciers d'armature en présence de chlorure [29]

se traduire par une corrosion par piqûre, ou localisée. Les attaques étant concentrées, la section de l'acier est donc d'autant plus affectée [29].

## 2.4 Techniques de CND appliquées aux ouvrages de béton armé

Les méthodes de contrôle non destructives (CND) peuvent constituer des outils performants de diagnostic de l'état de la structure à un instant donné, de surveillance de l'évolution du vieillissement, donc de la maintenance préventive de l'ouvrage. D'ores et déjà, elles permettent de cartographier et de délimiter certaines zones dégradées devant être soumises à des essais complémentaires sur carottes. La diversité des ouvrages à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Il n'est pas question ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du génie civil, mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement.

## 2.4.1 Techniques acoustiques

Les techniques acoustiques sont des techniques issues de la géophysique qui sont appliquées au contrôle non destructif de l'état des matériaux et des structures de Génie Civil depuis plus de trente ans. Ces techniques exploitent la transmission et la réflexion des ondes mécaniques à travers le milieu à des fréquences soniques et ultrasoniques.

### Essai sonique

L'essai sonique est basé sur la propagation d'une onde de compression de fréquences comprises entre 500 Hz et 10 kHz dans l'épaisseur de la structure. L'onde est émise d'un côté de la structure généralement par l'impact d'un marteau et l'acquisition, qui dépend de la configuration de mesure, est réalisée par un accéléromètre (figure 2.6). La vitesse d'onde résultante est alors une moyenne des vitesses locales le long du chemin parcouru. Les grandeurs de vitesse peuvent être tracées sous la forme d'une cartographie en 3D, avec la grille des points représentée en X et en Y et la vitesse d'impulsion portée en Z. Ce format permet une évaluation simple de l'état relatif du béton ou une évaluation de l'état interne d'une structure.

La figure 2.6 illustre les modes de transmission utilisés principalement pour des aperçus tomographiques soniques. Il est généralement admis que la transmission directe est une technique simple à appliquer dans le CND des structures puisque la longueur de trajet est définie par la structure. En outre, seul le temps d'arrivée de la première onde est concerné, ce qui rend inutile la distinction entre fréquences complexes et réflexions. Cette méthode est utilisée avec succès pour évaluer l'uniformité du matériau, détecter la présence des vides, estimer la profondeur d'une fissure extérieure et estimer le module de Young [35, 36]. La détection des défauts est possible du fait que les ondes soniques ne peuvent pas se transmettre facilement à travers un espace rempli d'air (une fissure, un vide ou un décollement à une interface), elles sont fortement atténuées et ralenties, ce qui nécessite que l'onde trouve un chemin autour du vide, avec comme résultat une atténuation et l'augmentation du temps de trajet [35, 37]. Les résultats de cette technique (figure 2.7) montrent sa sensibilité à la présence de vides (défauts de jointoiement) et sa pertinence pour le contrôle de la qualité d'injection [38]. Ainsi sur l'image du milieu qui représente le résultat de l'essai sonique avant injection de mortier, on remarque les faibles vitesses de propagation dues à la présence de défauts de jointoiement. Le résultat de l'essai après injection (image de droite) affiche des vitesses nettement plus élevées suite au comblement des défauts de jointoiement par le mortier. Cette technique reste néanmoins limitée quant à l'estimation des dimensions des défauts.

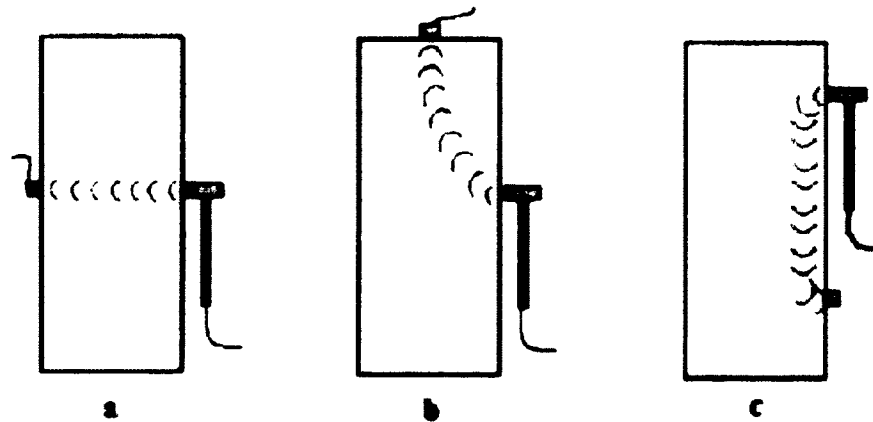


Figure 2.6 Modes de transmission pour l'essai sonore (a) direct, (b) semi direct, (c) indirect

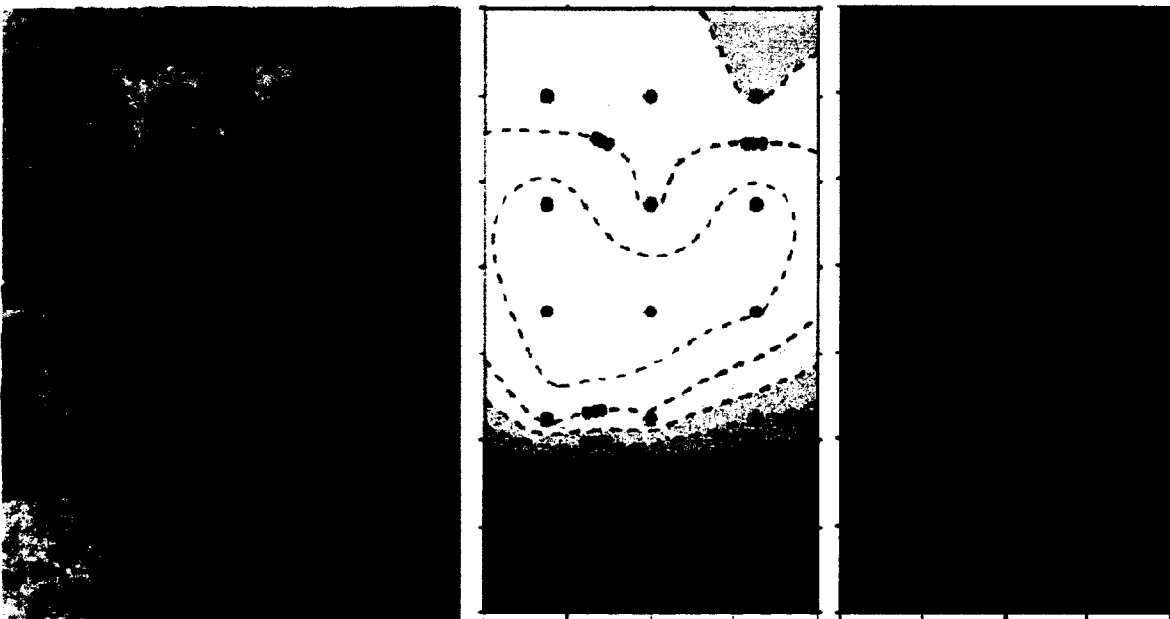


Figure 2.7 Essai sonore appliqué à un mur en maçonnerie de pierres pour le contrôle de l'efficacité de l'injection et comparaison des résultats avant et après l'intervention (les couleurs sombres indiquent les plus grandes vitesses) [38]

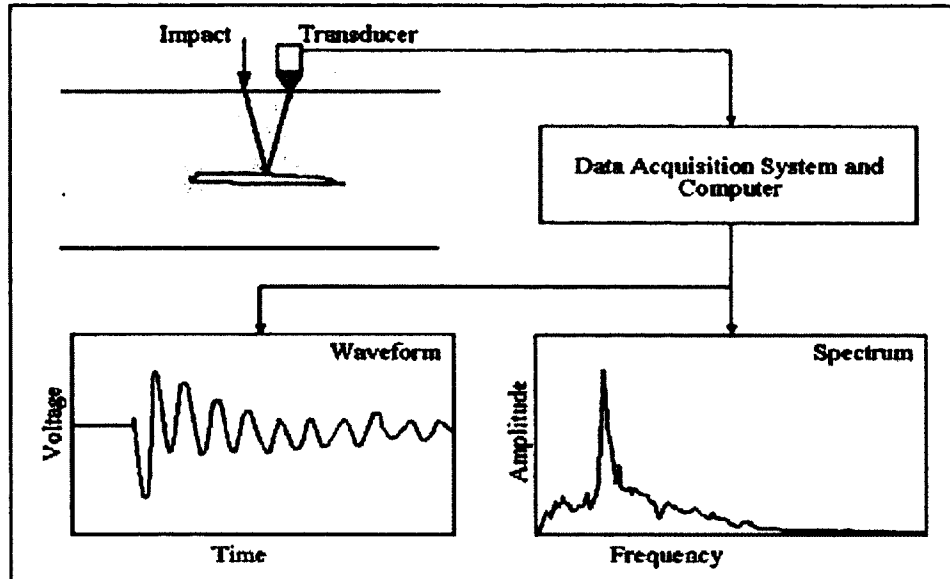


Figure 2.8 Configuration de l'essai d'impact-écho [39]

### Impact-écho

L'impact-écho, à l'origine développé pour mesurer l'épaisseur et l'intégrité d'une structure, est exécutée point par point, en utilisant un petit marteau pour frapper la surface de la zone auscultée à un endroit donné et en enregistrant l'énergie réfléchiée avec un accéléromètre placé à côté de l'impact (figure 2.8).

Dans cette technique, ce sont principalement les ondes de compression ou ondes P (P-waves) qui sont exploitées, elles se propagent vers l'intérieur du matériau et se réfléchissent au fur et à mesure qu'elles rencontrent les potentielles discontinuités du milieu [39].

La complexité des ondes enregistrées rend l'analyse dans le domaine temporel très difficile, raison pour laquelle l'analyse fréquentielle est recommandée pour l'impact-écho. Les crêtes dans le spectre des fréquences correspondent à l'épaisseur ou aux fréquences de résonance des discontinuités. Connaissant la vitesse de l'onde de compression dans le béton, la profondeur de la fissure correspondante peut être calculée.

### 2.4.2 Thermographie infrarouge

Lorsqu'un matériau est sollicité thermiquement (ex. réchauffement de façon naturelle par le soleil), la chaleur diffuse dans le matériau. La présence d'un défaut au sein du matériau (ex. une fissure) agit comme un isolant thermique et ralentit cette diffusion. Il s'en suit l'apparition d'une zone plus chaude en surface par rapport au matériau voisin dépourvu d'anomalie.

Les relevés de thermographie permettent, justement, d'obtenir, au moyen d'une caméra sensible aux rayonnements infrarouges, une image 2D mettant en évidence les variations de la température à la surface du béton. Celles-ci peuvent être causées par des variations de la porosité du béton (défauts étendus) et/ou par la présence de vides au sein du béton (défauts localisés). Sur l'image thermique (figure 2.9) prise après l'arrêt du réchauffement, on remarque des surfaces circulaires ayant une couleur plus claire que le reste de la structure. Dans le cas présent, ces surfaces correspondent à des vides d'air inclus dans la structure [40].

L'essai de thermographie infrarouge est normalisé. La norme existante (Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography) [41] concerne toutefois les conditions d'utilisation de cette technique pour la détection de la délamination dans les dalles des tabliers de ponts. Il y est notamment précisé que la surface doit être exempte de tout débris et que les mesures doivent être effectuées par un ciel dégagé au moins 24 h après des précipitations.

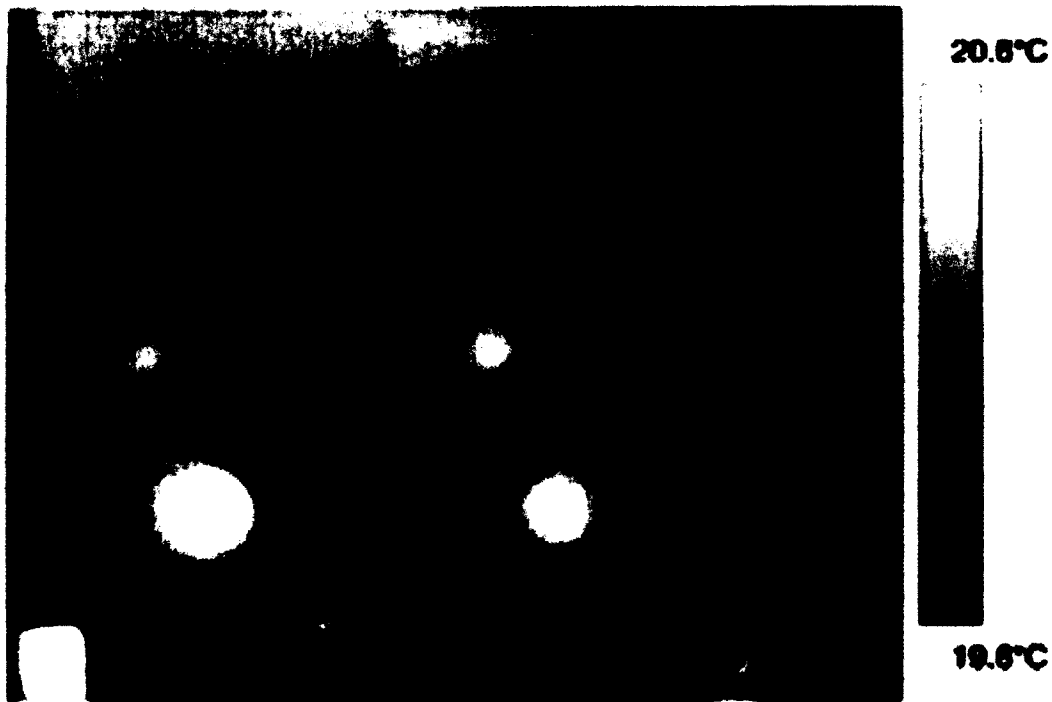


Figure 2.9 Image thermique d'une structure [40]

L'application de cette technique est intéressante dans le cadre de la recherche d'un défaut de jointoiment ainsi que pour la détection d'infiltrations d'eau dans les structures [42].

### 2.4.3 Technique radar

Le RADAR (Radio Detecting And Ranging) est une application de l'électromagnétisme. Le système émet de l'énergie électromagnétique (EM) qui se propage dans le milieu et se réfléchit sur des interfaces présentant une différence de propriétés EM. L'analyse du signal enregistré (vitesse et atténuation) peut donner des informations pertinentes comme la position de la cible ou les caractéristiques EM du milieu de propagation. Les principales approches développées de cette technique seront décrites ultérieurement (Chapitre 3).

### 2.4.4 Tableau comparatif

Le tableau 2.1 répertorie quelques-unes de ces méthodes en fonction du facteur de dégradation recherchée [43].

Tableau 2.1 Méthodes de CND pour le diagnostic des dégradations du béton [43]

Facteur de dégradation	Symptôme	Technique de Contrôle	
		Identification	Estimation des dommages
Réaction Alcali Granulats (RAG)	Fissuration Expansion	Carottage / pétrographie	Visuelle et pétrographie <i>Essai sonique</i> <i>Impact-écho</i> <i>Echographie ultrasonore</i> <i>Analyse modale</i>
Variation de l'humidité	Fissuration	Visuelle Carottage / pétrographie	Visuelle et pétrographie <i>Thermographie infrarouge</i> <i>Essai sonique</i> <i>Impact-écho</i> <i>Echographie ultrasonore</i> <i>Analyse modale</i>
Gel dégel	Ecaillage Fissuration Eclatement	Visuelle Carottage / pétrographie	Visuelle et pétrographie <i>Essai sonique</i> <i>Impact-écho</i> <i>Pulse écho</i> <i>Thermographie infrarouge</i> <i>RADAR</i>

*suite page suivante*

suite de la page précédente

Facteur de dégradation	Symptôme	Technique de Contrôle	
		Identification	Estimation des dommages
Cycle thermique	Eclatement	Visuelle	Visuelle et pétrographie
	Fissuration	Carottage / pétrographie	<b>Essai sonique</b>
	Perte de résistance		<b>Impact-écho</b> <b>Echographie ultrasonore</b> <b>Thermographie infrarouge</b>
Corrosion	Corrosion	Visuelle	Visuelle et pétrographie
		Carottage / pétrographie	<b>Impact-écho</b> <b>Echographie ultrasonore</b>
		<b>Méthode électrique</b>	Radiographie
		<b>Méthode chimique</b>	RADAR
		Perméabilité à l'air	
	<b>Méthode nucléaire</b>		
	Fissuration	Visuelle	Visuelle et pétrographie
	Délamination	Carottage / pétrographie	<b>Thermographie infrarouge</b> <b>Essai sonique</b> <b>Impact-écho</b> <b>Echographie ultrasonore</b>

Pour accéder à une bonne caractérisation des matériaux, ces techniques CND doivent être développées, tant sur le plan expérimental que théorique. Depuis une dizaine d'années, le groupe de recherche en auscultation et instrumentation (GRAI) de l'Université de Sherbrooke travaille sur le jumelage de différentes méthodes afin d'étudier l'effet de différents facteurs affectant leurs fiabilités et de définir les limites de l'application de chacune d'elles. L'un des objectifs de ces travaux est l'optimisation des procédures de contrôle appliquées aux dalles de béton.

# CHAPITRE 3

## Technique radar

### 3.1 Introduction

Cette méthode de Contrôle Non Destructif (CND) utilise les ondes électromagnétiques comme support de mesures. Dans ce contexte, il est nécessaire de connaître la permittivité complexe de l'objet ou du matériau à ausculter pour interpréter les signaux radars ; de même, la modélisation de l'interaction onde/matériau passe par la connaissance des propriétés électromagnétiques du matériau. Bien que les milieux auscultés correspondant aux mélanges rencontrés en génie civil soient hétérogènes (problèmes de mélanges, de teneurs en eau ou en vide, de granulométrie, d'orientation des grains . . . etc.), cette présentation sur la propagation d'ondes électromagnétiques ne considérera que des milieux homogènes (la taille des granulats étant considérée comme petite devant les longueurs d'onde).

### 3.2 Historique

Un système radar (RAdio Detection And Ranging) est un dispositif capable d'émettre des ondes électromagnétiques à balayage en fréquence et d'enregistrer un ensemble de réflexions générées par des objets (cibles) situés dans son environnement. Outre la simple détection de l'existence d'une cible, l'analyse des temps de propagation et de l'atténuation des signaux électromagnétiques peut donner accès à des paramètres intéressants tels que la position de la cible (radar aérien, météorologique) ou encore aux caractéristiques électromagnétiques (permittivité) du milieu de propagation. De tels systèmes radar ont commencé à se développer à partir de la seconde guerre mondiale sur des applications essentiellement militaires. Dans les années 1950, le développement du radar comme outil d'auscultation non destructive des matériaux s'est amorcé dans le secteur de la géophysique. L'analyse de la propagation des micro-ondes dans le sous-sol permet, en effet, de reconstruire une structure géologique à partir des réflexions générées par toute interface présentant un contraste d'impédance électromagnétique. Suite à des essais préliminaires concluants, on a pu assister quelques années plus tard au développement de plusieurs types de systèmes radars, généralement appelés GPR (Ground Probing Radar ou Ground Penetrating Radar ) du fait de leur utilisation initiale. Le nombre d'applications a très rapidement augmenté : épaisseur et



structure de glacier, détection d'objets enfouis, profils de fonds de lacs et rivières, sondage du sol lunaire, détection de déchets enfouis ... La technologie radar a de manière générale motivé un nombre important de projets de recherche qui ont contribué à positionner le radar dans des secteurs d'activités très divers (ingénierie, gestion de l'environnement, géologie) [44]. Les potentialités du radar dans le domaine du génie civil n'ont commencé à être exploitées qu'à partir de 1974 [45]. La première application du radar en génie civil a consisté à détecter la présence de cavités sous des dalles en béton de pistes aéroportuaires. Les structures à ausculter en génie civil étant de taille très inférieure aux structures géologiques, il a fallu procéder à une adaptation des systèmes, notamment par le développement d'antennes de fréquences plus élevées [46]. L'auscultation d'un massif rocheux nécessite des ondes de basses fréquences (quelques MHz) capables de pénétrer dans les matériaux à de grandes profondeurs, alors que l'auscultation d'ouvrages en béton sera réalisée avec des ondes de hautes fréquences (de l'ordre du GHz), l'augmentation de la fréquence améliorant la résolution de la technique. En génie civil, le radar est notamment utilisé pour l'auscultation des monuments historiques [47], des structures en maçonnerie [48, 49], des voies de chemin de fer [50] et des barrages en béton [51]. La sensibilité du radar aux propriétés physiques du béton a permis de montrer l'intérêt d'exploiter le signal de l'onde directe émetteur-récepteur comme observation physique sensible à l'état d'humidité [13].

### 3.3 Principe de la technique

Un système radar est un dispositif capable d'émettre et recevoir des ondes électromagnétiques à balayage en fréquence. En génie civil, le principe de mesure consiste à émettre une impulsion EM de courte durée dans la gamme des hyperfréquences (environ 100 à 3000 MHz) et à enregistrer un ensemble de signaux de natures diverses : signal de l'onde directe se propageant entre l'émetteur et le récepteur, signaux des réflexions générées par toute interface présentant un contraste diélectrique à proximité du dispositif, signaux des réflexions multiples. Dans le champ du génie civil, les interfaces potentiellement rencontrées sont diverses : « air / couche de roulement », « couche de roulement / béton », « béton / acier », « béton / air ». La figure 3.1 présente un schéma de principe de la mesure radar. L'antenne réceptrice mesure l'amplitude du champ électrique ( $A$ ) en fonction du temps ( $t$ ). Le signal Amplitude-Temps ainsi enregistré est usuellement qualifié de A-scan. Une partie de l'énergie est transmise directement de l'antenne émettrice vers l'antenne réceptrice appelée onde directe ( $S_d$ ). Une autre partie est réfléchiée par chaque interface présentant un contraste d'impédance électromagnétique. Dans cet exemple, les réflexions sont générées par l'interface « béton-armature » ( $S_r$ ) et « béton-air » ( $S_r'$ ). Les antennes sont généralement déplacées le

long d'un profil. On rajoute ainsi une information spatiale (X). Les signaux enregistrés selon un pas spatial fixés par l'opérateur sont préalablement convertis en niveau de couleurs, puis juxtaposés pour générer une coupe-temps radar (B-scan). Si la vitesse de propagation est connue, la coupe-temps peut être simplement converti en coupe-profondeur. Sur la coupe-temps présentée sur la figure 3.1 (B-scan), les 3 lignes horizontales en partie supérieure matérialisent le rayonnement direct émetteur-récepteur. La forme hyperbolique témoigne de la présence d'un réflecteur cylindrique en profondeur (armature). Cette signature résulte du caractère omnidirectionnel du rayonnement de l'antenne émettrice qui implique que le réflecteur commence à être perçu alors que l'antenne n'est pas exactement au droit de celui-ci (position X1). De même, il continue à se manifester sur une certaine distance après que l'antenne a dépassé sa position (position X3).

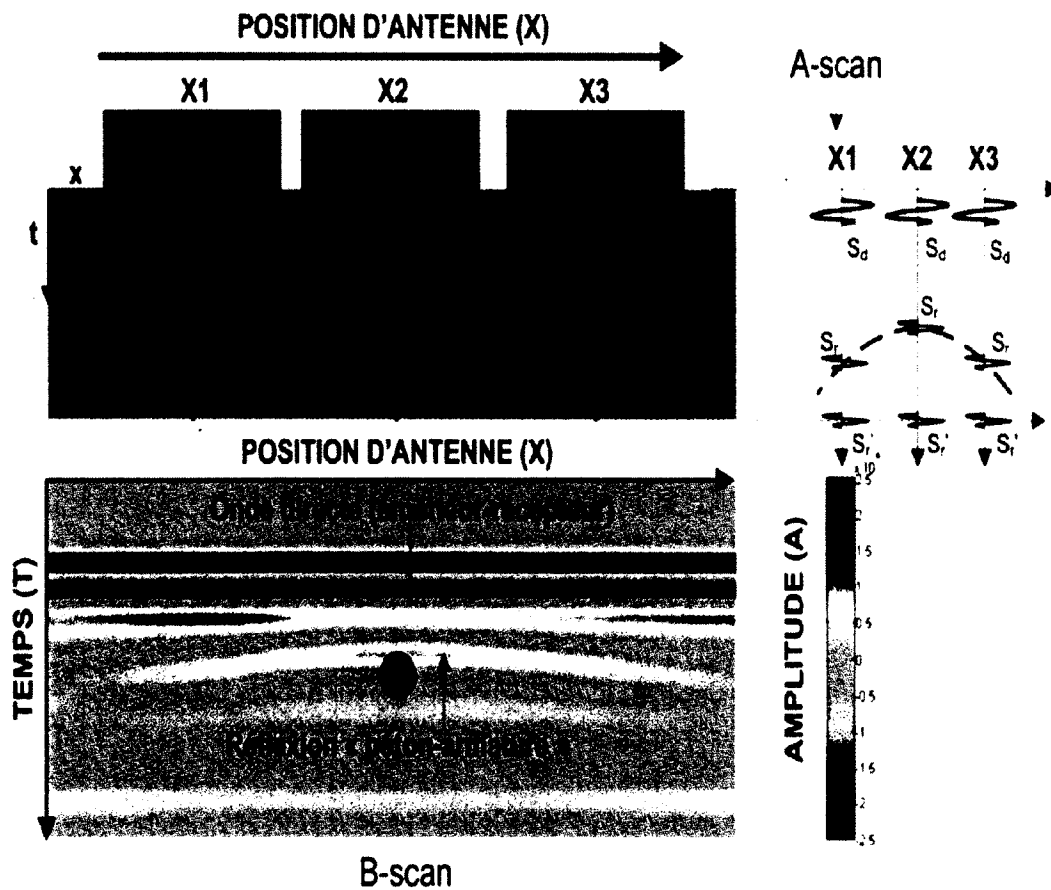


Figure 3.1 Schéma de principe de l'acquisition d'une coupe-temps radar (B-scan)

### 3.4 Instrumentation

Il existe deux types de radar géophysique : le radar impulsif et le radar à sauts de fréquences. Le radar impulsif permet de travailler dans la bande de fréquences 50 MHz – 2 GHz voir 50 MHz – 3 GHz. Diverses études ont montré son faible niveau de résolution pour l'auscultation des structures en béton armé précontraint, ou l'auscultation des chaussées [52, 53]. En effet, les longueurs d'onde des impulsions électromagnétiques se propagent dans du béton restant supérieures à 10 cm, alors que les géométries des hétérogénéités imposent des distances qui sont souvent à l'ordre des 2 à 5 cm. Ainsi, les armatures, les gaines de précontrainte ou les épaisseurs des chaussées n'étaient déterminées que d'une façon approximative. Pour améliorer la résolution, ces systèmes GPR ont évolué en termes de fréquence centrale et de largeur de bande. Ce type de radar est couramment utilisé pour la mesure des épaisseurs de chaussées. Notons que notre étude est principalement limitée à ce premier type de radar qui est utilisé de manière opérationnelle sur les chantiers.

La deuxième catégorie du radar est de conception plus récente et permet de travailler jusqu'à une dizaine de gigahertz. Ces derniers sont schématiquement constitués d'un analyseur de réseaux et d'antennes large bande ; ils permettent de travailler jusqu'à des fréquences centrales de 10 GHz [53]. Ces performances permettent de mieux suivre l'état de vieillissement des structures en béton. En effet, à partir de 10 GHz, la résolution quasi centimétrique permet d'ausculter plus finement la couche de béton de peau, qui assure l'interface entre la structure en béton et l'environnement agressif, là où apparaissent les premiers symptômes de dégradation de l'ouvrage. Toutefois, dans le domaine des hautes fréquences, l'interprétation des informations obtenues par échographie radar peut devenir délicate. La longueur d'onde devient en effet comparable à la taille des hétérogénéités du béton, d'où l'apparition du phénomène de diffusion, qui nuit à l'interprétation de la mesure. Toutefois, ce type de radar est utilisé en laboratoire ou pour des prestations spécifiques. Nous l'utilisons dans cette étude pour la caractérisation des dalles de béton au laboratoire.

A ces deux techniques radar, on associe deux configurations de mesures possibles : le mode monostatique [54] et mode bistatique (ou multistatique) [55].

Dans tous les cas, il est nécessaire, dans un premier temps, de connaître au préalable la variation fréquentielle de la permittivité complexe du béton et, dans un deuxième temps, d'adopter une loi d'homogénéisation adaptée au béton qui tient compte de la bande de fréquence utilisée afin de mieux interpréter les signaux radars mesurés. Cela requiert le développement d'une technique de modélisation de la permittivité complexe des bétons.

### 3.4.1 Configuration monostatique

Dans une configuration de mesures monostatique, l'antenne d'émission sert également d'antenne de réception. Les mesures sont généralement effectuées à incidence normale : on mesure le signal réfléchi par le milieu. L'inconvénient majeur de cette configuration est lié à l'existence d'un signal transitoire, qui apparaît en début d'enregistrement. Ce dernier représente le signal propagé sur toute la hauteur d'antenne. Son influence dépend fortement du type d'antennes utilisé. Pour s'affranchir de son influence, il faut procéder par une étape de calibrage [56? ].

### 3.4.2 Configuration bistatique

Pour le mode de mesures bistatique, les antennes d'émission et de réception sont déportées l'une de l'autre d'une certaine distance. Les mesures sont réalisées à incidence oblique. Cette configuration est souvent utilisée en géophysique pour réaliser un dispositif de mesures en point milieu commun (CMP) [52]. Selon la distance, le couplage entre les antennes d'émission et de réception peut induire des modifications du diagramme de rayonnement. Dans cette configuration, on observe en début d'enregistrement le signal de l'antenne émettrice ; on parle d'onde directe dans l'air. L'onde directe peut être aisément éliminée par fenêtrage temporel dès lors que les antennes sont suffisamment surélevées au-dessus de la surface à ausculter.

Remarque : Configuration quasi monostatique : Les radars conventionnels disposent en général d'antennes d'émission et de réception distinctes, et fixées l'une à l'autre (par exemple, le système GSSI). En surélevant le système antennaire d'une hauteur suffisante, l'onde directe se détache du premier écho réfléchi et peut être aisément filtrée. La configuration de mesures devient similaire à la configuration monostatique précédente ; on parle par la suite de conditions quasi monostatiques. Par comparaison avec le mode monostatique, le calibrage du système est simplifié. Le radar impulsif est composé d'un générateur d'impulsions, d'une (ou plusieurs) antenne(s) émettrice(s) et d'une (ou plusieurs) antenne(s) réceptrice(s). Ce radar permet d'envoyer des impulsions à intervalles réguliers, à une fréquence de répétition appelée PRF (Pulse Repetition Frequency). Après passage dans l'antenne, cette impulsion génère une onde électromagnétique qui se réfléchit au sein du milieu [57] (figure 3.2 et figure 3.3).

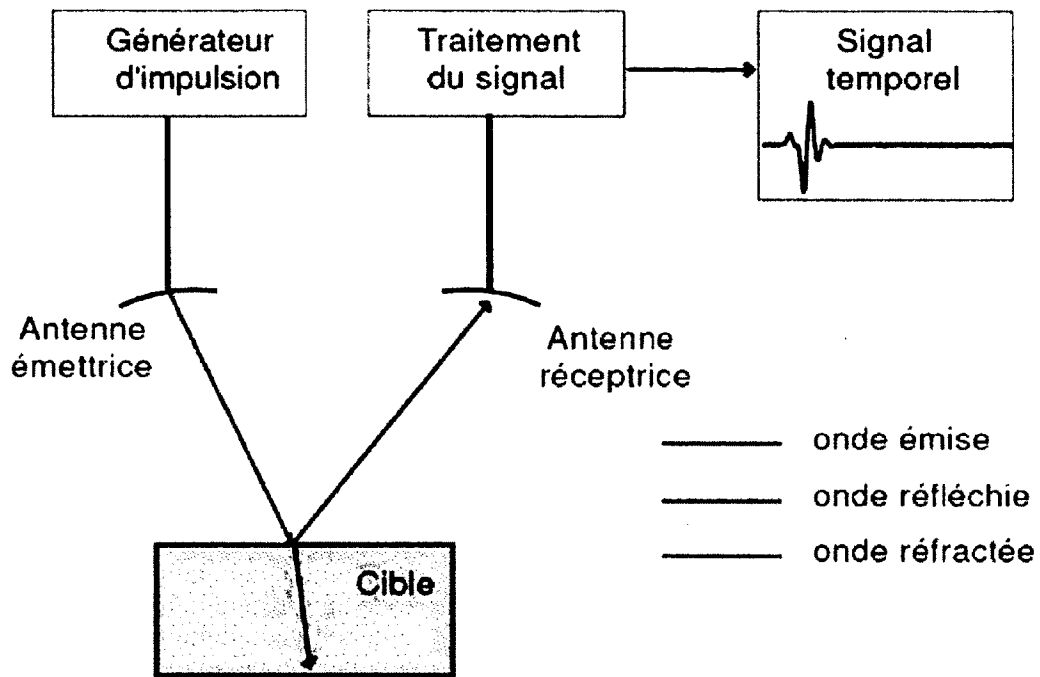


Figure 3.2 Schéma synoptique d'un radar impulsif

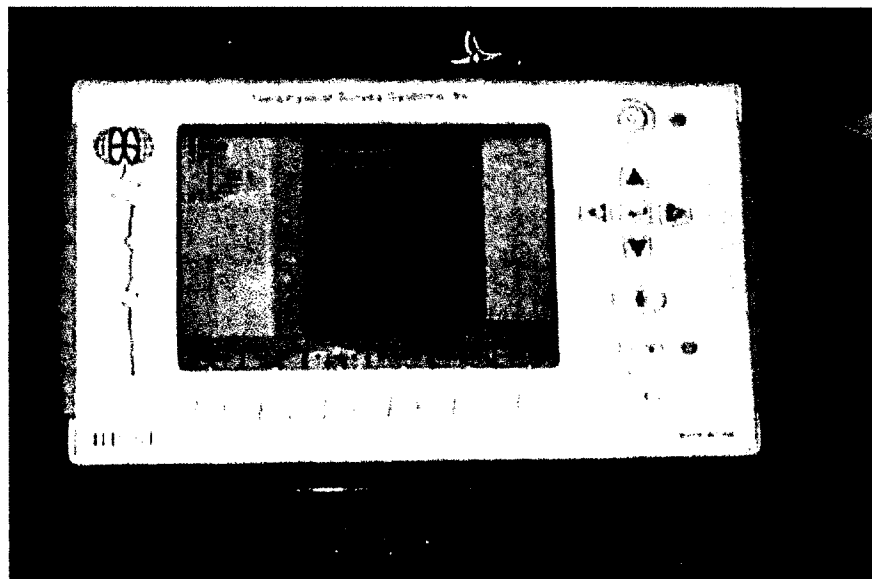


Figure 3.3 Exemple de radar impulsif portable (SIR-3000, marque GSSI)

Le tableau 3.1 indique les principales caractéristiques techniques de différents systèmes radars commercialisés.

Tableau 3.1 Différents systèmes radar commercialisés

Radar	$f_c$ (GHz)	Type d'antenne	Conditions de mesures
GSSI SIR-3000+antenne 5100	1.6	papillon	Au contact du milieu
GSSI SIR-20+antenne cornet 4105	2	cornet	Déporté du milieu
MALA GeoScience Cx	1.2 ou 1.6	papillon	Au contact du milieu
Radar Systems Inc. ZOND 12e	1.5 ou 2	-	Au contact du milieu
IDS-RIS	2	papillon	Au contact du milieu

$f_c$  : Fréquence centrale.

## 3.5 Propagation des ondes électromagnétiques dans les matériaux

Les mécanismes de propagation d'une onde EM dans un matériau sont principalement régis par les propriétés diélectriques de ce dernier [58]. Ainsi l'objectif primaire de cette partie est d'asseoir les bases physiques et mathématiques de cette interaction onde/matériau. Pour plus de détails sur cette théorie, la consultation de l'ouvrage de Kraus [59] est recommandée.

### 3.5.1 Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell, à la base de la notion de champ électromagnétique, conduisent aux équations de propagation suivantes pour les champs électrique  $E$  [V/m] et magnétique  $H$  [A/m], dans un milieu donné de caractéristiques électromagnétiques  $\epsilon, \sigma$  et  $\mu$  :

$$\Delta E = \sigma \mu \frac{\partial E}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

$$\Delta H = \sigma \mu \frac{\partial H}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (3.2)$$

$\epsilon$  : permittivité diélectrique [F/m]

$\sigma$  : conductivité électrique [S/m]

$\mu$  : perméabilité magnétique [H/m]

Comme les phénomènes électromagnétiques mis en jeu sont principalement électriques, que le champ magnétique se déduit du champ électrique par les équations de Maxwell, et enfin que les matériaux du génie civil ne sont généralement pas magnétiques, nous ne présenterons que les relations contenant le champ électrique  $\vec{E}$ .

Dans le domaine tempore pour une fréquence donnée, une solution simple de l'équation 3.1 pour une onde plane, polarisée selon l'axe  $x$  et se propageant suivant la direction  $z$ , s'écrit :

$$E(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (3.3)$$

Avec  $\beta$  : coefficient de phase [rad/m],  $\alpha$  : coefficient d'atténuation [rad/m] et  $\omega = 2\pi f$  : pulsation à la fréquence  $f$  [rad/s].

On trouve le facteur de propagation (ou facteur d'Helmoltz) [rad/m<sup>2</sup>] :

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (3.4)$$

et le facteur d'onde [rad/m] :

$$k = -i\gamma \quad (3.5)$$

Physiquement, le terme  $E_0 e^{-\alpha z}$  correspond à l'enveloppe dans laquelle se propage le champ électrique et le terme  $e^{i(\omega t - \beta z)}$  nous permet d'avoir une représentation du champ à un instant  $t$  donné (figure 3.4).

### La perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique  $\mu$  [H/m] permet de décrire le comportement d'une matière soumise à un champ magnétique  $\vec{H}$  [A/m]. En l'absence d'un moment magnétique rémanent

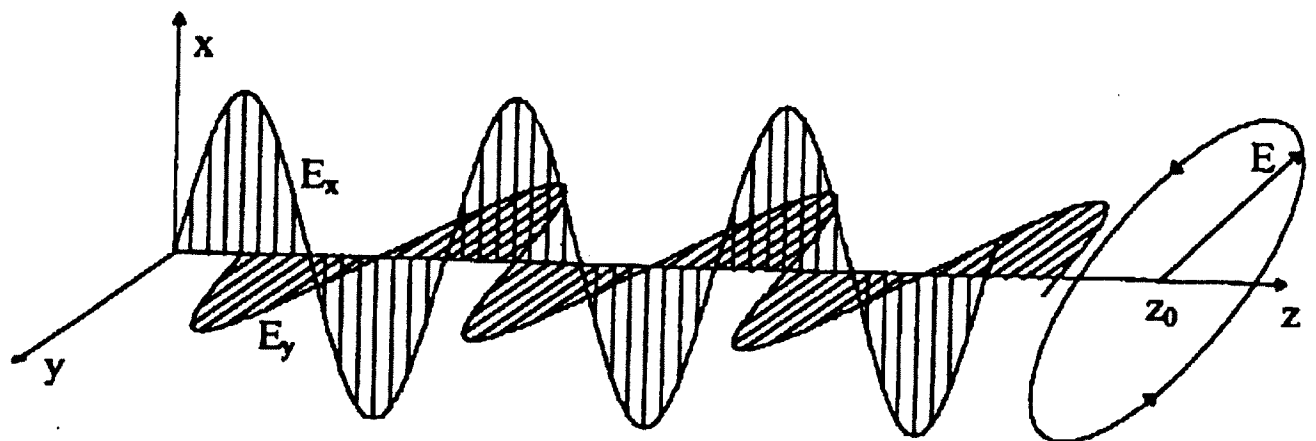


Figure 3.4 Forme d'une onde électromagnétique à un instant donné

(aimantation permanente), l'induction magnétique  $\vec{B}$  [T] s'écrit :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.6)$$

Dans le vide, la perméabilité magnétique  $\mu_0$  vaut  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

En dehors de quelques études rendant compte de mesures de perméabilité en géophysique réalisées sur des roches à très fortes teneurs en fer ou oxyde de fer [57], la majorité des matériaux présente une perméabilité magnétique pratiquement égale à celle du vide ( $\mu = \mu_0$ ).

Dans le cadre du travail présenté ici, nous poserons donc cette hypothèse simplificatrice dans l'ensemble des formules.

Il faut cependant remarquer que dans de nombreuses applications de la méthode radar, les objets que l'on cherche à localiser ne sont pas des matériaux géologiques mais sont des éléments de nature métallique (fûts, canalisations, câbles, etc.). Dans ce cas et en toute rigueur, l'hypothèse  $\mu = \mu_0$  n'est plus valable. [61] propose un développement mathématique complet pour tenir compte d'une perméabilité magnétique différente de celle du vide et précise les implications de cette dernière sur les signaux radar.

Toutefois ces développements ne s'appliquent pas dans le cadre de ce travail (mesure d'épaisseurs des dalles de béton non armé) où les discontinuités de nature métallique ne sont pas à prendre en compte

### **La conductivité électrique**

L'application d'un champ électrique à un milieu quelconque provoque un courant de charges dites « libres ». La conductivité électrique est caractérisée par les phénomènes associés aux mouvements de ces charges. Il est possible de scinder la conductivité des milieux à ausculter en deux phénomènes :

- le mouvement d'électrons libres à l'intérieur de substances métalliques susceptibles de composer le matériau ;
- le mouvement d'espèces ioniques contenues dans les fluides du matériau (conduction électrolytique).

Compte tenu de la faible teneur en métaux ou oxydes métalliques de la plupart des milieux rencontrés en génie civil, c'est essentiellement le dernier mécanisme qui gouverne la conductivité des matériaux. La quantité et la composition de l'eau contenue dans ces derniers sont



donc particulièrement déterminantes. D'après la loi d'Ohm, les courants de conduction sont reliés au champ électrique par la relation :

$$\vec{j}_c = \sigma \vec{E} \quad (3.7)$$

La conductivité électrique  $\sigma$  peut également être considérée comme une grandeur complexe :

$$\sigma = \sigma' + i\sigma'' \quad (3.8)$$

Ce formalisme reflète que les charges libres ne répondent pas nécessairement instantanément au champ électrique.

### La permittivité diélectrique

La permittivité diélectrique  $\varepsilon$  [F/m] caractérise le mouvement de charges liées (ou plus exactement, la redistribution locale de charges liées) sous l'action d'un champ électrique  $\vec{E}$  [V/m]. Elle décrit le pouvoir de polarisation du milieu. En considérant un milieu linéaire, homogène et isotrope le vecteur induction électrique  $\vec{D}$  [C/m<sup>2</sup>] s'écrit de la façon suivante :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.9)$$

La loi de conservation des charges permet d'aboutir à la relation exprimant les courants de déplacement  $\vec{j}_d$  en fonction du champ électrique :

$$\vec{j}_d = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.10)$$

La permittivité peut être définie comme une grandeur complexe :

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (3.11)$$

Cette écriture complexe reflète le fait que les charges liées ne répondent pas nécessairement instantanément en quadrature de phase au champ électrique. La partie imaginaire de la permittivité représente les pertes d'énergie engendrées par les mécanismes de polarisation.

L'effet de la polarisation diélectrique avait été découvert par Michael Faraday en 1837. On distingue plusieurs types de polarisation (figure 3.5) : électronique, ionique, dipolaire, macroscopique, interfaciale (ou du type Maxwell -Wagner) et spontanée.

La polarisation totale est la somme des différents types de polarisation [60, 62, 63]. La figure 3.6 présente cette propriété d'additivité.

### Courant total et paramètres effectifs

On peut définir la densité de courant totale  $\vec{j}$  [A/m<sup>2</sup>] comme la somme de la densité de courant de conduction et de la densité de courant de déplacement :

$$\vec{j} = \vec{j}_c + \vec{j}_d = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.12)$$

Si  $\vec{E}$  est un champ électrique en régime harmonique (onde EM représentée par une seule fréquence) et le milieu est linéaire, homogène et isotrope , les expressions suivantes peuvent être établies dans le domaine de fréquentiel :

$$\vec{j} = \{(\sigma' + \omega \epsilon'') + i(\sigma'' + \omega \epsilon')\} \vec{E} \quad (3.13)$$

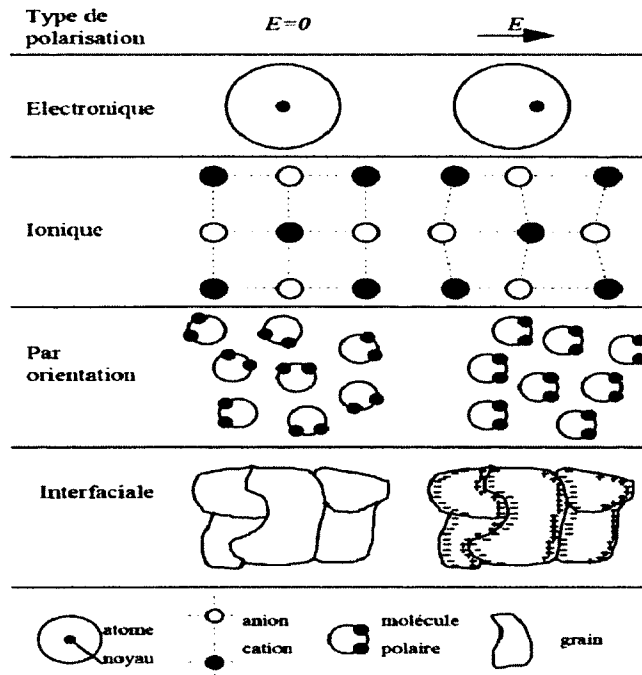
$$\vec{j} = \left\{ \left( \epsilon' + \frac{\sigma''}{\omega} \right) - i \left( \epsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega} \right) \right\} * i \omega \vec{E} \quad (3.14)$$

où  $\omega$  [rad/s] est la pulsation (ou fréquence angulaire).

Ici on ne fait plus la distinction entre les courants de conduction et les courants de déplacement. De ce fait, cette représentation montre que la partie imaginaire de la permittivité joue le rôle d'une conductivité, et que la partie imaginaire de la conductivité joue le rôle d'une permittivité. On définit alors les notions de permittivité effective  $\epsilon_e$  [F/m] et de conductivité effective  $\sigma_e$  [S/m] :

$$\vec{j} = \sigma_e \vec{E} = (\sigma'_e + i \sigma''_e) \vec{E} \quad (3.15)$$

$$\vec{j} = \epsilon_e \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = (\epsilon'_e + i \epsilon''_e) \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.16)$$



Les déplacements des charges sont très fortement exagérés

Figure 3.5 Différents types de polarisation diélectrique

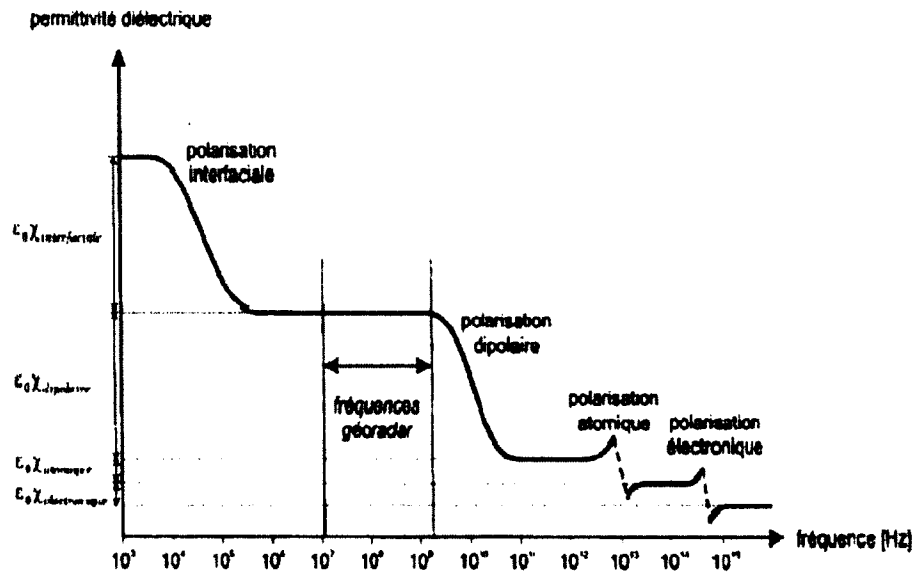


Figure 3.6 Évolution de la permittivité diélectrique sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Propriété d'additivité des susceptibilités électriques d'après [64]

$$\sigma_e = i\omega\varepsilon_e \quad (3.17)$$

Avec :

$$\sigma'_e = \sigma' + \omega\varepsilon'' \quad (3.18)$$

$$\sigma''_e = \sigma'' + \omega\varepsilon' \quad (3.19)$$

$$\varepsilon'_e = \varepsilon' + \frac{\sigma''}{\omega} \quad (3.20)$$

$$\varepsilon''_e = \varepsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega} \quad (3.21)$$

Expérimentalement on ne sait quantifier que les paramètres effectifs par le biais de la mesure de la composante en phase ou en quadrature de phase du courant total, et ceci, quels que soient les phénomènes physiques mis en jeu (déplacements de charges libres ou liées). En d'autres termes, il est impossible expérimentalement de différencier les contributions de  $\sigma'$  et  $\varepsilon''$  d'une part, et de  $\sigma''$  et  $\varepsilon'$  d'autre part pour une fréquence donnée [65]. Par la suite, on admettra que la participation de la partie imaginaire de la conductivité ( $\frac{\sigma''}{\omega}$ ) est nulle, ce qui est le cas pour la plupart des matériaux en génie civil aux fréquences géoradar. Avec cette hypothèse :

$$\varepsilon'_e = \varepsilon' \quad (3.22)$$

On retiendra que la constante diélectrique  $\varepsilon_r$  (ou permittivité effective relative) est définie comme le rapport de la partie réelle de la permittivité effective ( $\varepsilon'_e$ ) et de la permittivité du vide ( $\varepsilon_0$ ) :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon'_e}{\varepsilon_0} \quad (3.23)$$

Dans ce rapport, pour plus de clarté, toutes les valeurs numériques de permittivité diélectrique seront exprimées de manière relative par rapport à la permittivité du vide.

### Angle de perte

L'angle de perte  $\delta$  est un paramètre qui permet de caractériser les phénomènes d'atténuation des ondes. La tangente de l'angle de perte est une mesure de la quantité d'énergie dissipée lors de la propagation de l'onde électromagnétique dans le milieu considéré. Elle correspond

au rapport de l'énergie perdue sur l'énergie stockée. On peut déterminer l'angle de perte de la façon suivante :

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon_e''}{\varepsilon_e'} = \frac{\varepsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega}}{\varepsilon'} = \frac{\sigma'}{\omega\varepsilon'} + \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.24)$$

Le premier terme décrit les pertes d'énergie par conduction et le deuxième les pertes diélectriques. Plus le milieu sera conducteur, plus les pertes seront importantes. On en déduit qu'un milieu conducteur n'est pas favorable à la transmission des ondes.

En utilisant le formalisme des paramètres effectifs et la définition de l'angle de perte 3.24, il apparaît que la propagation est dominante si, à une fréquence donnée,  $\tan(\delta) \ll 1$  : l'essentiel de la transmission de l'énergie s'effectue par courant de déplacement.

C'est le domaine d'application préférentiel du radar géologique (hautes fréquences). À l'inverse, si  $\tan(\delta) \gg 1$  : l'essentiel de la transmission de l'énergie s'effectue par courant de conduction. C'est le domaine des méthodes EM Basses Fréquences.

Dans le béton et aux fréquences utilisées par les géoradars, la propagation domine généralement sur la diffusion.

Les facteurs  $\alpha$  (facteur d'atténuation) et  $\beta$  (facteur de phase) sont exprimés par les équations suivantes :

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu\varepsilon_e'} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_e''}{\varepsilon_e'}\right)^2} - 1 \right)} = \omega \sqrt{\mu\varepsilon_e'} \frac{\tan\left(\frac{\delta}{2}\right)}{\sqrt{1 - \tan^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}} \quad (3.25)$$

et

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\varepsilon_e'} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_e''}{\varepsilon_e'}\right)^2} + 1 \right)} = \omega \sqrt{\mu\varepsilon_e'} \frac{1}{\sqrt{1 - \tan^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}} \quad (3.26)$$

S'il est possible d'extraire les facteurs de phase et d'atténuation d'un signal, il est alors possible de calculer la permittivité diélectrique effective du milieu correspondant en utilisant les relations inverses suivantes :

$$\varepsilon_e' = \frac{\beta^2 - \alpha^2}{\mu\omega^2} \quad (3.27)$$

$$\varepsilon_e'' = \frac{2\alpha\beta}{\mu\omega^2} \quad (3.28)$$

L'une des applications les plus intéressantes de la formulation en paramètres effectifs est l'expression simple du nombre d'onde :

$$k = \omega \sqrt{\mu\varepsilon_e} \quad (3.29)$$

### Facteur de qualité

Le facteur de qualité Q (analogue à celui utilisé en sismique) est défini comme étant l'inverse de la tangente de l'angle de perte :

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{\varepsilon_e'}{\varepsilon_e''} \quad (3.30)$$

Le facteur de qualité est très utilisé pour caractériser l'atténuation d'un milieu [65, 66]. Celle-ci (l'atténuation) peut être définie comme la diminution de l'amplitude et une perte préférentielle des hautes fréquences de l'onde électromagnétique en fonction de la distance de propagation.

En sismique le facteur de qualité Q est un paramètre important pour l'interprétation de données telles qu'acquises par des relevés de tomographie ou des relevés de réflexion et réfraction. Ainsi, une diminution de Q relative et locale est indicatrice d'un endommagement potentiel du matériau [67]. Des études semblables ont été proposées et adaptées pour des ondes du géoradar. En effet, pour les ondes électromagnétiques, il est très courant d'exprimer les phénomènes de propagation en terme de vitesse ou de facteur de qualité. La vitesse  $v$  [m/s] est obtenue à partir du facteur de phase [ $v = \frac{\omega}{\beta}$ ] et le facteur de qualité s'obtient directement à partir de l'inverse de l'angle de perte [68]. Ce dernier paramètre, déjà introduit en 3.24, définit le rapport entre l'énergie dissipée et l'énergie stockée par cycle.

### 3.5.2 Les propriétés électromagnétiques des matériaux génie civil aux fréquences radar

Nous venons de présenter les mécanismes liés aux paramètres constitutifs de l'électromagnétisme dans les matériaux génie civil. Nous avons pu constater que, d'une part, l'approximation ( $\mu = \mu_0$ ) peut être posée et que d'autre part, conductivité électrique et permittivité

diélectrique peuvent s'écrire sous la forme d'un paramètre unique : la permittivité diélectrique effective. Nous allons maintenant nous intéresser aux ordres de grandeur de ce paramètre dans le domaine plus restreint des fréquences géoradar.

Nous avons donc rassemblé un ensemble de mesures de permittivité diélectrique effective, concernant une grande variété de béton. L'ensemble de ces mesures est issu de travaux précédents [69–71]. Les différents dispositifs instrumentaux utilisés par ces auteurs pour réaliser ces analyses suivent le même principe de mesure : un analyseur de réseau mesure la phase et l'amplitude des ondes réfléchies et transmises sur un échantillon de béton, placé à l'intérieur d'une cellule coaxiale. La figure 3.7 présente une des variantes de ce type de système permettant la mesure de permittivité diélectrique effective.

Les figures 3.8, 3.9 et 3.10 présentent quelques courbes de permittivités diélectriques effectives en fonction de la fréquence et pour différentes teneurs en eau.

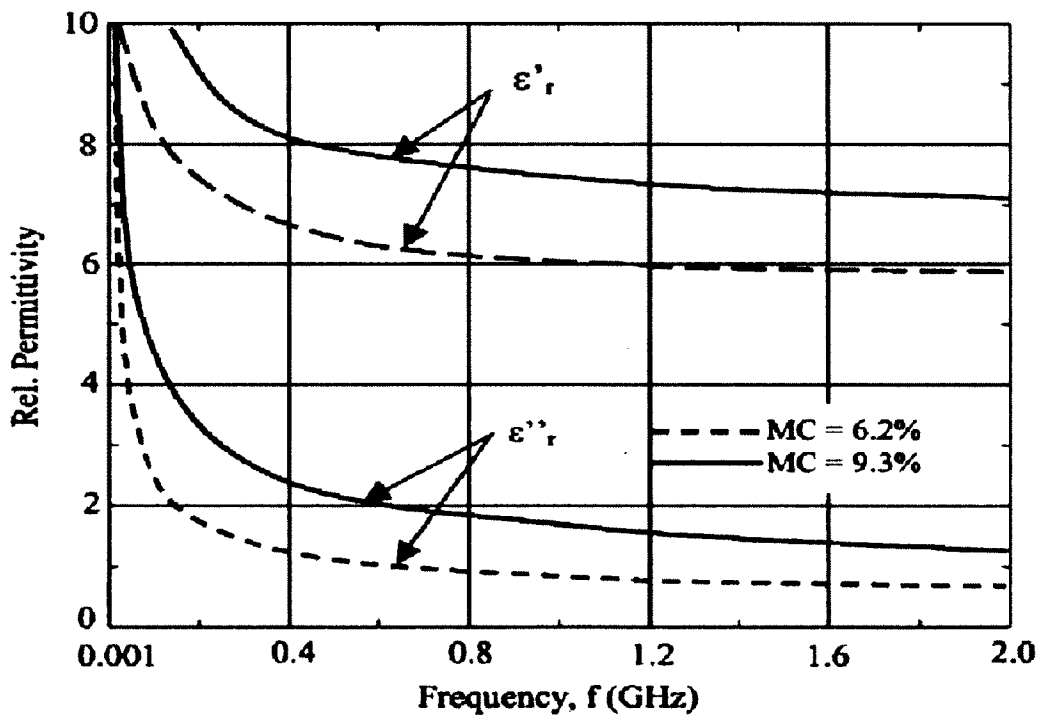


Figure 3.8 Propriétés diélectriques de béton pour différentes teneur en eau (6,2% et 9,3%) [73] d'après [69]

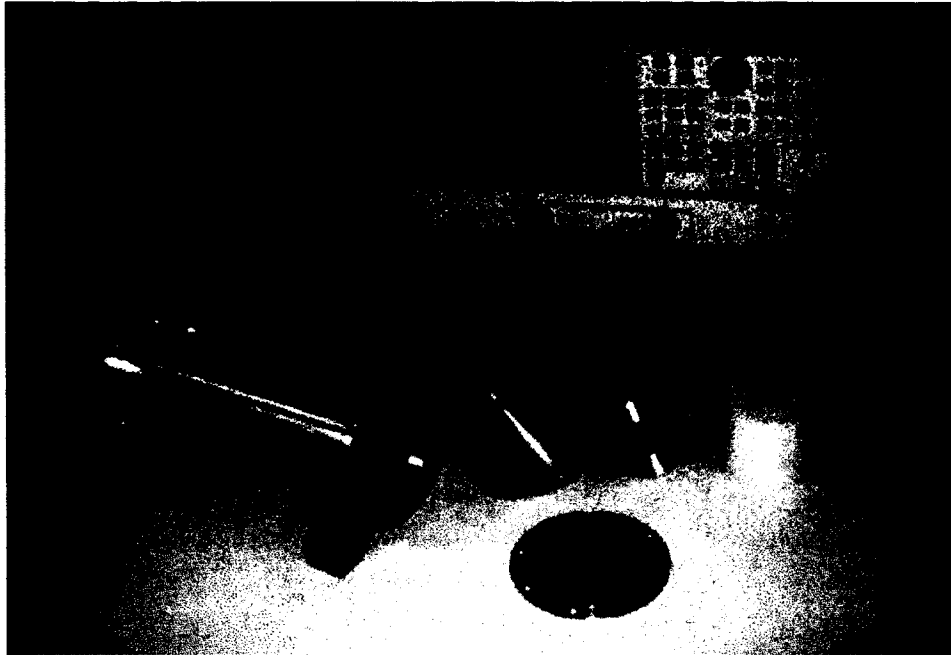


Figure 3.7 Cellule de mesure (ligne coaxiale et guide cylindrique court-circuité) reliée à l'analyseur de réseaux vectoriel et éléments constitutifs du kit d'étalonnage (court-circuit, court-circuit coulissant, échantillons cylindriques étalons) [72]

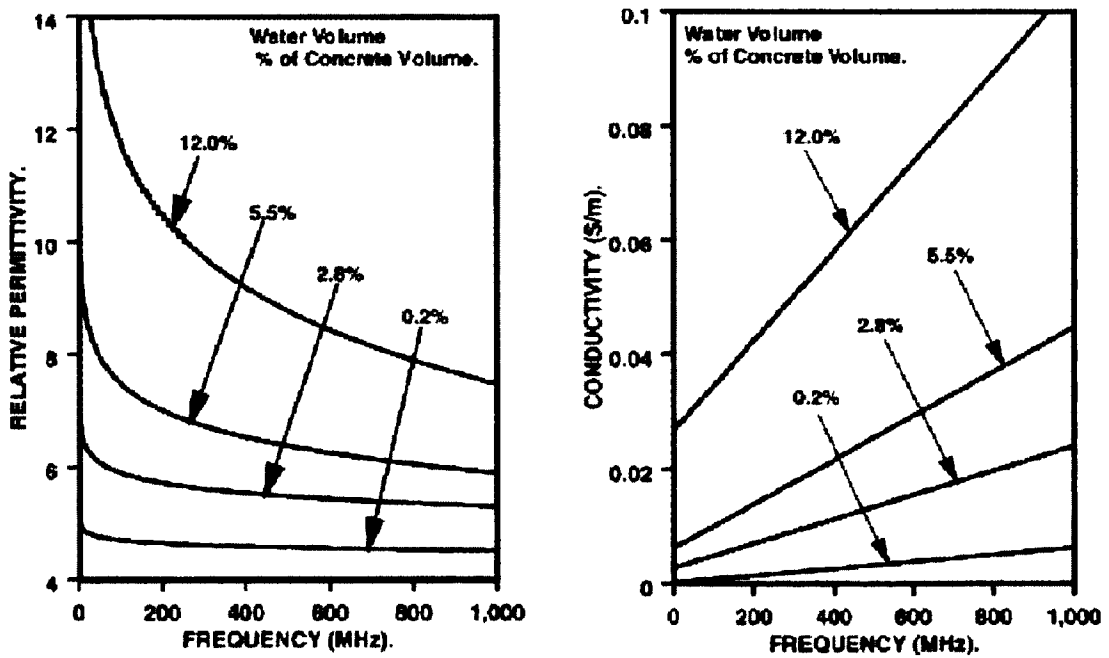


Figure 3.9 Variations typiques de la constante diélectrique et de la conductivité en fonction de la fréquence et la teneur en eau [70]



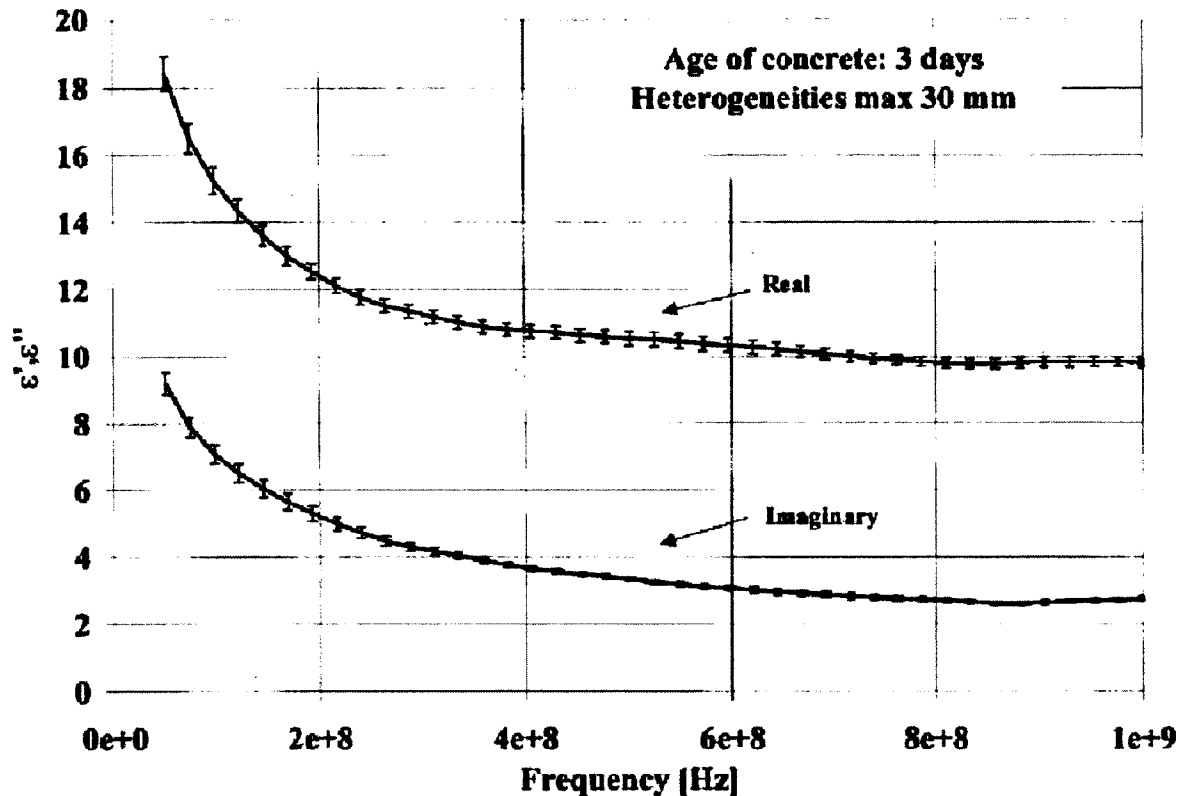


Figure 3.10 Partie réelle et partie imaginaire de la permittivité du béton [0 30] mesurées 3 jours après la fabrication. Le résultat présenté est la moyenne mesurée sur cinq échantillons [71]

Les remarques qui peuvent être formulées à partir de ces données sont nombreuses, entre autres on peut citer :

- Les paramètres  $\epsilon'_e$  et  $\epsilon''_e$  varient en fonction de la fréquence, cette variation n'est pas négligeable aux basses fréquences mais elle l'est aux hautes fréquences. Dans la totalité des cas,  $\epsilon'_e$  et  $\epsilon''_e$  sont décroissantes avec la fréquence ;
- Les valeurs du paramètre  $\epsilon'_e$  varient entre 5 et 19. Les contrastes de permittivité peuvent donc être importants dans les matériaux génie civil. La variabilité de ce paramètre couvre une marge non négligeable ;
- Les variations du paramètre  $\sigma'_e$  sont encore plus fortes : ce paramètre couvre plus de marge (de 0,005 S/m à plus de 0,1 S/m). Les proportions en eau influencent considérablement les valeurs de conductivité effective.

## CHAPITRE 4

# Modélisation de la variation de la permittivité diélectrique effective

Les ondes radar sont caractérisées par une atténuation et une dispersion en fréquence dépendantes des propriétés diélectriques du milieu de propagation. Les propriétés diélectriques du béton (permittivité et conductivité) sont des grandeurs complexes qui dépendent de la fréquence. L'atténuation des ondes radar est étroitement liée à la permittivité effective ( $\epsilon_e$ ) comme le montre le calcul du nombre d'onde (équation 2.27). La réponse du béton aux ondes EM variant en fonction de la fréquence, il est indispensable de pouvoir modéliser correctement la dépendance fréquentielle de la permittivité effective. Plusieurs modèles empiriques existent pour décrire la dépendance fréquentielle de la permittivité diélectrique effective ( $\epsilon_e$ ). Dans la littérature on distingue les modèles classiques de Debye [74], Cole-Cole [75] et Davidson-Cole [76], et le modèle de Jonscher [77]. Une expression homogène entre les différents modèles peut s'écrire :

$$\epsilon_e(\omega) = \epsilon_\infty + \epsilon_0 \chi_e(\omega) - i \frac{\sigma_{dc}}{\omega} \quad (4.1)$$

où :  $\epsilon_\infty$  [F/m] est la valeur limite à haute fréquence de la partie réelle de la permittivité effective. Il décrit la contribution des mécanismes de polarisation caractérisés par des fréquences de relaxation largement supérieures à la gamme de fréquence à laquelle on s'intéresse ; c'est un paramètre réel et constant.

$\sigma_{dc}$  [S/m] décrit la contribution de la conductivité électrique définie à fréquence nulle (« Direct Current »). C'est également un paramètre réel et constant.

$\chi_e$  [sans dimension] est la susceptibilité électrique effective, caractérisant les phénomènes de polarisation non compris dans le terme  $\epsilon_\infty$ .

$\omega$  [rad/s] est la fréquence angulaire de l'onde électromagnétique. Les différents modèles présentés dans la littérature se distinguent par leur façon de caractériser  $\chi_e$  qui est une grandeur complexe et dépendante de la fréquence.

## 4.1 Les modèles classiques

Le modèle de Debye exprime la susceptibilité électrique effective en fonction de  $\varepsilon_\infty$ , d'une valeur limite de permittivité à basse fréquence  $\varepsilon_s$  [F/m], et d'un temps de relaxation  $\tau$  [s] (temps nécessaire pour établir une polarisation donnée) :

$$\chi_e(\omega) = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (4.2)$$

La fréquence critique de relaxation, qui correspond au maximum de dissipation (valeur maximale de  $\varepsilon_e''$ ), est définie par :

$$\omega_c = 1/\tau \quad (4.3)$$

Le modèle classique de Debye a fréquemment été utilisé pour décrire la dispersion diélectrique dans un système avec un seul temps de relaxation. Cependant, la plupart des matériaux, comme les roches, ne montrent pas un comportement du type Debye à un seul temps de relaxation [66]. Les modèles classiques de Cole-Cole et de Davidson-Cole sont des variantes du modèle de Debye qui introduisent des facteurs d'amortissement  $a$  et  $b$  sans dimension :

$$\chi_e(\omega) = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + (i\omega\tau)^{1-a})} \quad (4.4)$$

$$\chi_e(\omega) = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + i\omega\tau)^b} \quad (4.5)$$

Ces différents modèles classiques ne sont efficaces que pour des matériaux où la polarisation de type dipolaire domine, ce qui n'est pas le cas des solides, donc en particulier des roches (exceptées les roches saturées en eau). Ces modèles ne sont donc pas applicables à l'étude des matériaux géologiques. Afin de caractériser la permittivité diélectrique effective, le nombre de paramètres constants et réels nécessaire à la caractérisation d'un milieu donné est le suivant :

- Quatre pour le modèle de Debye ( $\sigma_{dc}, \varepsilon_\infty, \varepsilon_s, \tau$ )
- Cinq pour le modèle de Cole-Cole ( $\sigma_{dc}, \varepsilon_\infty, \varepsilon_s, \tau, a$ )
- Cinq pour le modèle de Cole-Davidson ( $\sigma_{dc}, \varepsilon_\infty, \varepsilon_s, \tau, b$ )

## 4.2 Le modèle de Jonscher

Le modèle de Jonscher [78], aussi connu sous le nom de “réponse diélectrique universelle”, est basé sur l’universalité de la forme de la réponse diélectrique [77], en d’autres termes, ce modèle est adaptable à toutes sortes de diélectriques et valable pour de très larges bandes d’étude. [79] propose d’utiliser le modèle de Jonscher, qui contrairement aux modèles classiques ne considère plus la notion de fréquence de relaxation. Les auteurs ont reformulé ce modèle de la façon suivante :

$$\chi_e(\omega) = \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[ 1 - i \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \right] \quad (4.6)$$

Cette expression utilise une fréquence de référence qui peut être définie de façon purement arbitraire (il ne s’agit pas d’un paramètre d’ajustement du modèle comme les fréquences de relaxation des modèles précédents). Dans ce mémoire, la fréquence de référence sera toujours fixée à 100 MHz. Le paramètre  $\chi_r$  est la partie réelle de la susceptibilité à la fréquence de référence ;  $n$  [sans dimension], un facteur caractérisant l’intensité de la variation de la fréquence ( $n$  varie entre 0 et 1). Dans la formulation de Jonscher, le rapport entre la partie imaginaire et réelle de la susceptibilité est constant et la valeur de ce rapport est fonction du paramètre  $n$ .

$$\chi_e'(\omega) / \chi_e''(\omega) = \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \quad (4.7)$$

La permittivité diélectrique effective se formule alors :

$$\varepsilon_e(\omega) = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[ 1 - i \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \right] + \varepsilon_\infty - i \frac{\sigma_{DC}}{\omega} \quad (4.8)$$

Cette équation fait intervenir quatre paramètres indépendants, constants et réels nécessaires à la caractérisation d’un milieu :  $(\sigma_{dc}, \varepsilon_\infty, \chi_r, n)$ .

Elle requiert donc une estimation simultanée de quatre paramètres faisant appel à des procédures d’optimisation non linéaires. Certaines simplifications peuvent être apportées. Il est par exemple possible de considérer que la contribution physique de la conductivité à fréquence nulle est implicitement incluse dans la modélisation de la partie imaginaire de la susceptibilité électrique. Il est alors possible de ne pas prendre en compte la contribution (mathématique) du terme dans le calcul de [79]. D’après [80] et [65], compte tenu du domaine hautes fréquences utilisées en prospection géoradar, le terme peut être négligé dans

l'équation 4.8. La permittivité diélectrique effective s'écrit alors :

$$\varepsilon_e(\omega) = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[ 1 - i \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \right] + \varepsilon_\infty \quad (4.9)$$

La dépendance fréquentielle de la permittivité effective est donc décrite par 3 paramètres réels et constants :  $\chi_r$ ,  $n$  et  $\varepsilon_\infty$ . Dans [79], ces trois paramètres ont été estimés à partir de la minimisation de l'écart entre la mesure de la permittivité relative complexe et le modèle pour une largeur de bande prédéfinie. Dans [81], ces mêmes paramètres ont été estimés à partir de la minimisation de l'écart entre les coefficients de réflexion de Fresnel pour une incidence normale et le modèle de ces mêmes coefficients. Dans le cas de cette étude, nous avons choisi de déterminer ces trois paramètres par une méthode d'estimation basée sur une sélection subjective de seulement deux points fréquentiels (voir 5.4 Adaptation of the Jonscher model to concrete).

Dans le contexte du formalisme de Jonscher le facteur de qualité  $Q$  n'est pas constant et croit avec la fréquence [79]. Il est décrit par l'équation 4.10.

$$Q(\omega) = \tan \left( \frac{n\pi}{2} \right) \left[ 1 + \frac{\varepsilon_\infty}{\varepsilon_0 \chi_r} \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{(1-n)} \right] \quad (4.10)$$

### 4.3 Comparaison des modèles

Les auteurs de [79] ont réalisé une étude paramétrique sur les capacités de chacun des modèles présentés précédemment à décrire la variation de la permittivité diélectrique effective complexe (respectivement la susceptibilité électrique effective complexe) en fonction de la fréquence (figure 4.1).

Les modèles de Debye, Cole-Cole et Cole-Davidson présentent des parties réelles de la susceptibilité électrique décroissantes en fréquence, et des parties imaginaires affichant une variation « en cloche ». En effet, la susceptibilité électrique effective imaginaire croit avec la fréquence jusqu'à la valeur ( $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ ), puis décroît au-delà. Le modèle de Jonscher présente des courbes de susceptibilité strictement décroissantes. Pour obtenir la partie réelle de la permittivité diélectrique effective, la contribution (constante) du paramètre ( $\varepsilon_\infty$ ) est ajoutée à la partie réelle de la susceptibilité électrique ; pour obtenir la partie imaginaire, la contribution (inversement proportionnelle à la fréquence) du paramètre ( $\frac{\sigma_{DC}}{\omega}$ ) est ajoutée à la partie imaginaire de la susceptibilité électrique. Les unités portées sur les axes sont arbitraires. Les résultats montrent que le calage des courbes modélisées sur les données

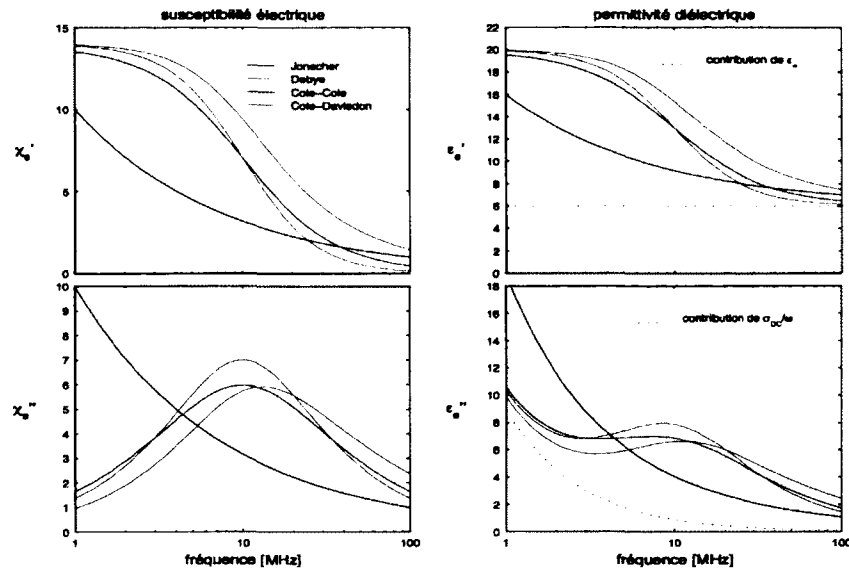


Figure 4.1 Variation en fréquence de la susceptibilité électrique effective et de la permittivité diélectrique effective pour différents modèles (Debye, Cole-Cole, Cole-Davidson et Jonscher) [79]

expérimentales (issues des mesures en cellule coaxiale EM sur des échantillons de milieux géologiques) fait apparaître des anomalies majeures notamment sur les parties imaginaires. Les auteurs ont montré que parmi tous ces modèles, seul le modèle de Jonscher à 3 paramètres (équation 2.39) a permis de décrire parfaitement les variations de permittivités effectives mesurées en laboratoire. En effet nous pouvons constater des pics de résonance (ou de perte) à des fréquences dites de “relaxation”, alors que le modèle de Jonscher parfaitement superposé aux données expérimentales décrit une décroissance continue des courbes sur toute la bande fréquentielle d’étude. Par ailleurs, l’utilisation de ces modèles (Debye, Cole-Cole et Cole-Davidson) est plutôt adaptée à la caractérisation des mécanismes de polarisation de type dipolaire aux alentours des fréquences de relaxation.

En génie civil, la permittivité du béton varie fortement dans le domaine de fréquence du géoradar et décroît pour des fréquences croissantes (voir 3.5.2). Différents modèles ont été étudiés : en s’inspirant du travail fait par Les auteurs de [57] qui ont mesuré la permittivité des sols et ont remarqué que la relation de Cole-Cole permettait de décrire la variation en fréquence de la permittivité, l’auteur de [71] a utilisé la relation de Cole-Cole à cinq paramètres pour décrire la variation de la permittivité diélectrique effective des bétons hydrauliques en fonction de la fréquence. Il a validé son modèle par des mesures effectuées sur des échantillons de béton dont les granulats avaient un diamètre maximum de 30mm

(figures 4.2 et 4.3 où le modèle de polarisation de double couche est décrit par :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (2i\omega\tau)^b + i\omega\tau} - i \frac{\sigma_{dc}}{\omega\varepsilon_0} \quad (4.11)$$

et les deux modèles qui font l'hypothèse que le béton est constitué d'inclusions ellipsoïdales plongées dans une matrice homogène : le modèle auto-similaire SSC (self similar mode) décrit par :

$$\left( \frac{\varepsilon_{mat} - \varepsilon_{mix}}{\varepsilon_{mat} - \varepsilon_w} \right) \left( \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{mix}} \right)^{1/3} = \Phi \quad (4.12)$$

et le modèle de CRIM (Complex Refraction Index Model) décrit par :

$$\sqrt{\varepsilon_{mix}} = (1 - \Phi) \sqrt{\varepsilon_{mat}} + \Phi \sqrt{\varepsilon_w} \quad (4.13)$$

avec  $\Phi$  : la porosité,  $\varepsilon_{mix}$  : la permittivité du mélange,  $\varepsilon_{mat}$  : la permittivité de la matrice et  $\varepsilon_w$  : la permittivité de l'eau).

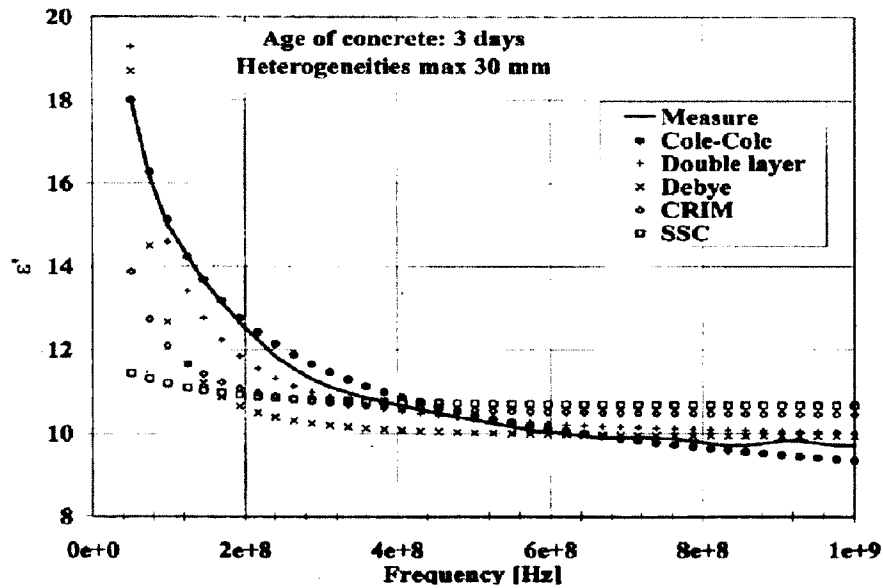


Figure 4.2 Partie réelle de la permittivité du béton 0-30 en fonction de la fréquence et résultats du calcul par les modèles de Cole-Cole, de polarisation de double couche, de Debye (à 4 paramètres), de CRIM et SSC [71]

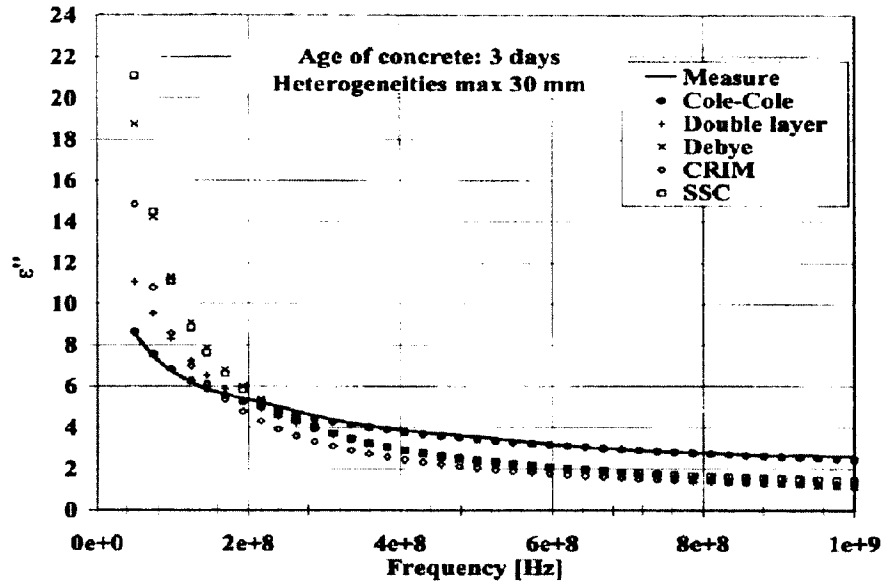


Figure 4.3 Partie imaginaire de la permittivité du béton 0-30 en fonction de la fréquence et résultats du calcul par les modèles de Cole-Cole, de polarisation de double couche, de Debye de CRIM et SSC [71]

Il a montré que la permittivité est très influencée à 50 MHz par le taux d'hydratation, la teneur en eau et par la présence de chlorures dans la solution contenue dans les pores. Par contre, la permittivité mesurée à 1 GHz n'est pas influencée par la teneur en chlorures et dépend quasi linéairement de la saturation en eau du béton.

Toutefois, dans le cas de ce modèle (Cole-Cole), [79] a pu vérifier qu'un ensemble de paramètres, correspondant à des valeurs aberrantes d'un point de vue phénoménologique, peut conduire, sur la bande des fréquences radar, à des courbes totalement satisfaisantes vis-à-vis des données expérimentales. De même, deux ensembles de paramètres totalement différents peuvent aboutir à des courbes de permittivité semblables et également satisfaisantes vis-à-vis des données expérimentales. Donc ce modèle manque de robustesse et d'unicité des résultats.

Pour représenter le comportement de la permittivité complexe du béton par un modèle de dispersion diélectrique qui peut être utilisé dans différents simulateurs numériques basés sur la méthode TLM (Transmission Line Modelling Method) ou la méthode FIT (Finite Integration Technique) par exemples, les auteurs de [82] ont fait une comparaison entre le modèle de Debye à trois paramètres et le modèle de Debye étendu, soit Debye à quatre paramètres (voir 6.2.1). Ce dernier a donné la représentation la plus appropriée (figures 4.4 et 4.5).



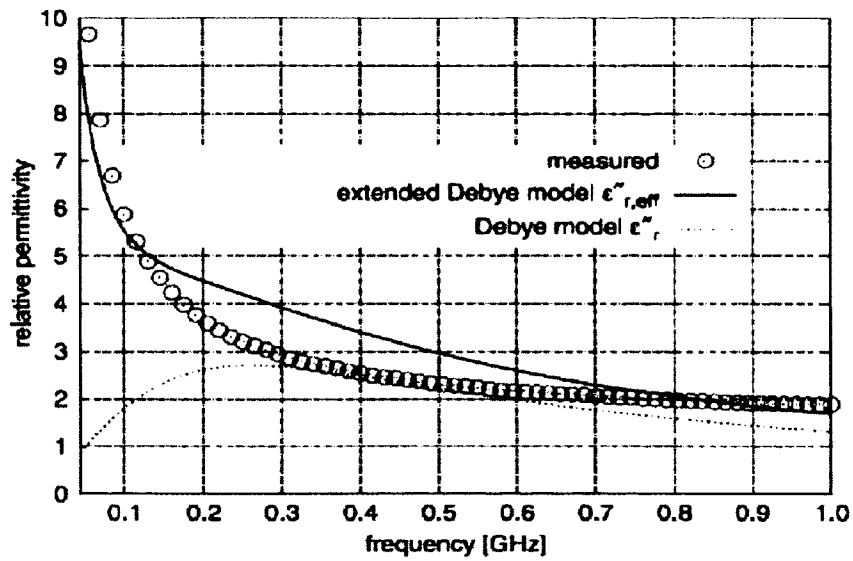


Figure 4.4 Partie imaginaire de la permittivité du béton en fonction de la fréquence et résultats du calcul par les modèles de Debye et de Debye étendu (teneur en eau =12,0%) [82]

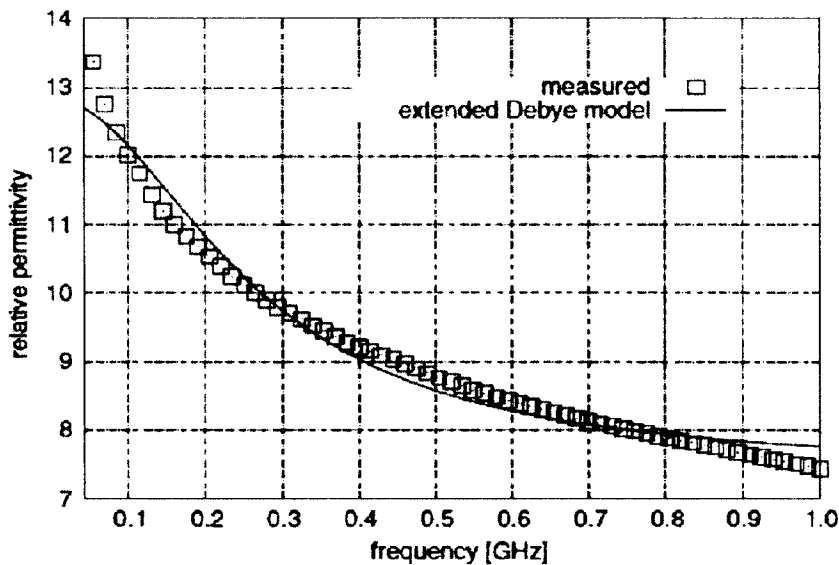


Figure 4.5 Partie réelle de la permittivité du béton en fonction de la fréquence et résultat du calcul par le modèle de Debye étendu (teneur en eau =12,0%) [82]

En associant les résultats de cette étude à la nécessité d'utilisation d'un nombre restreint de paramètres des modèles, nous avons choisi de nous passer du modèle de Debye et de ses variantes pour l'estimation de la permittivité diélectrique effective complexe des différents

types de béton étudiés dans cette thèse. Nous avons choisi d'utiliser le modèle de Jonscher à trois paramètres pour caractériser la dépendance fréquentielle de la permittivité effective du béton. Cependant, ce choix doit faire face à trois défis majeurs :

1. le premier défi est de développer et valider expérimentalement le modèle choisi sur la bande de fréquence géoradar.
2. Le second défi est de comparer ce modèle aux principaux modèles appliqués à la constante diélectrique du béton en génie civil. Il s'agit de démontrer que les résultats obtenus avec ce modèle sont supérieurs à ceux des autres modèles.
3. Le troisième défi est d'utiliser ce modèle pour prédire la réponse fréquentielle du géoradar sur une dalle de béton. Cette réponse va permettre la mesure de l'épaisseur d'une dalle de béton dans le domaine fréquentiel.

# CHAPITRE 5

## Validation du modèle de Jonscher

Ce premier article est destiné à surmonter notre premier défi et de modéliser les variations en fréquence de la permittivité diélectrique effective du béton sur la bande de fréquence géoradar. Il débute par un rappel général de la théorie des phénomènes de polarisation d'un matériau diélectrique sous l'effet d'un champ électrique. Ensuite, il présente plus spécifiquement les phénomènes de polarisation concernant le béton. Une formulation originale est proposée, nécessitant moins de paramètres que les modèles habituellement publiés dans la littérature. La validation expérimentale du modèle et son adaptation à la permittivité diélectrique effective du béton est effectuée en comparant les résultats donnés par le modèle et ceux mesurés au laboratoire sur différents échantillons de béton à différentes teneurs en eau.

### Avant-propos

#### Auteurs et affiliation:

T. Bourdi, étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

J. E. Rhazi, professeur associé, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

F. Boone, professeur, Université de Sherbrooke, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique et de génie informatique.

G. Ballivy, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

**Date d'acceptation:** 1<sup>er</sup> octobre 2008

**État de l'acceptation:** version finale publiée

**Revue:** Journal of Physics D : Applied Physics

**Référence:** [83]

**Titre français:** Utilisation du modèle de Jonscher pour caractériser la permittivité du béton.

**Contribution au document:**

Cet article contribue à la thèse en appliquant le modèle de Jonscher dans le domaine génie civil. Nous développons la procédure d'utilisation du modèle à trois paramètres pour décrire la variation fréquentielle de la permittivité du béton. Les résultats obtenus sur différents types de bétons sont comparés aux mesures expérimentales afin de valider l'efficacité du modèle sur la bande de fréquence géoradar.

**Résumé en français:**

L'étude des ondes électromagnétiques se propageant dans le béton est un problème complexe. Comprendre le phénomène d'interaction entre l'onde et le milieu est liée à la connaissance du processus de variation des propriétés électromagnétiques du béton en fonction de ses caractéristiques physiques. En particulier, la permittivité diélectrique du béton est affectée par la teneur en eau et la variation de la fréquence du champ électromagnétique appliqué. Dans cette étude, nous appliquons le modèle de Jonscher à trois paramètres  $(n, \chi_r, \epsilon_\infty)$  pour montrer l'aspect dispersif du béton. La validation de ce modèle est réalisée, d'une part, par des tests sur mortier et béton au laboratoire et par la comparaison des résultats avec les données obtenues précédemment par d'autres chercheurs, d'autre part. Les paramètres  $(n, \chi_r, \epsilon_\infty)$  sont estimés à partir de la mesure de permittivité à deux fréquences distinctes. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance des valeurs numériques et expérimentales de la permittivité diélectrique et rendent compte de l'aspect dispersif du béton. Cela montre que le modèle de Jonscher est très efficace et très approprié pour représenter les propriétés diélectriques du béton à des niveaux différents d'humidité, des hétérogénéités et des porosités.

**Note:** À la suite des corrections demandées par les membres du jury, le contenu de cet article peut différer de celui qui a été publié.

## **Application of Jonscher model for the characterisation of the dielectric permittivity of concrete**

### **Abstract**

The study of electromagnetic waves propagation in concrete is a complex problem. Understanding the phenomena of interaction between the wave and the matter is related to the knowledge of the variation process of the concrete electromagnetic properties in terms of

its physical characteristics. In particular, dielectric permittivity of concrete is affected by moisture content and change of the frequency of the electromagnetic field applied. In this study, we apply the three-parameters Jonscher model ( $n, \chi_r, \varepsilon_\infty$ ) to show the dispersive aspect of the concrete. The validation of this model is carried out through tests on mortar and concrete at the laboratory, on one hand, and by comparison of the results with data obtained previously by other researchers, on the other hand. The Jonscher model matches very well the experimental measurements of the concrete. At different moisture levels, different heterogeneity and different porosities, the obtained results are very good. This shows that this model is very effective and very suitable to represent the dielectric properties of concrete.

## 5.1 Introduction

Ground Penetrating Radar (GPR) is a non destructive testing method increasingly used to evaluate concrete structures. This technique is based of the propagation on electromagnetic waves. A good understanding of the interaction between electromagnetic waves and concrete is thus necessary to the adequate analysis of GPR data. One of the most important physical properties that governs electromagnetic waves propagation is the permittivity of the concrete. Indeed, the dielectric permittivity of a material characterizes the motion of charges linked under the action of an electric field. These phenomena called polarizations are diverse and overlapping [64]. We distinguish :

- Electronic polarization due to the distortion of the electronic cortege of an atom with respect to its nucleus ;
- Ionic polarization due to the relative motion of anions and cations within a crystalline structure ;
- Dipole polarization, due to the dipole orientation of dipole molecules (i.e., characterized by a permanent dipole moment) ;
- Space charge polarization or interfacial, due to the migration of charged particles that can locally be considered free ; However, this in heterogeneous environments are not involved in the electrical conductivity ; these particles accumulate then along the interfaces they can not cross.

These phenomena are characterized by relaxation time (or by its inverse relaxation frequency). Consider a given mechanism : where the applied electric field changes sufficiently slowly (oscillation frequency well below the relaxation frequency of the phenomenon under

consideration), polarization will have time to settle : permittivity associated with this phenomenon will contribute to the overall permittivity. If on the contrary, the field oscillates at a frequency far greater than the relaxation frequency, polarization will not settle : permittivity associated with this mechanism will not contribute of the total permittivity. Using the concept of electric susceptibility, we have :  $\chi_{\text{ionic}} + \chi_{\text{dipolaire}} + \chi_{\text{interfacial}}$ )

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (\chi_{\text{electronic}} + \chi_{\text{ionic}} + \chi_{\text{dipolaire}} + \chi_{\text{interfacial}}) \quad (5.1)$$

where

$$\varepsilon_0 = 8.8541878176 \cdot 10^{-12} \text{ F/m (or } C^2N^{-1}m^{-2}\text{)}; \quad (5.2)$$

is the free-space permittivity ;  $\chi_{\text{interfacial}}$  is the electric susceptibility associated with interfacial phenomena of polarization (with no dimensions) ;  $\chi_{\text{dipolaire}}$  is the electric susceptibility linked to the dipole polarization phenomena, and so on. Relaxation frequencies of electronic and ionic polarizations ( $10^{15}$  Hz and  $10^{13}$  Hz respectively) are far greater than radar frequencies **usually used to nondestructive testing of concrete structures** (100 MHz – 2 GHz). These phenomena are applicable to all solids. At radar frequencies and in the absence of dipole particles, it is these phenomena that dominate, and it is the mineralogical composition of the material that determines the value of permittivity ( $\varepsilon_r = 4.6$  for quartz ;  $\varepsilon_r = 7.5$  for calcite). Dipole polarization mechanisms give relaxation frequencies that are close to radar frequencies : they are of great importance to the extent that the material contains dipole molecules. **The degree of polarization of homogeneous dipolar substances (such as water) depends strongly on the temperature. The thermal agitation counteracts the alignment of the molecules in the direction of electric field. These substances have large dielectric constants.** Thus, the proportion of water contained in a material is crucial. Indeed, due to the asymmetrical aspect of its molecule, water has a very high permittivity ( $\varepsilon_r = 81$ ). The combined relaxation frequency is about 20 GHz.

Concrete, which is a porous material and whose pores are filled with electrolyte corresponds to this structure. Once under an electric field, charges accumulate on the surface of the pores and produce a dipole moment. The interfacial polarizations are characterized by very low relaxation frequencies (1 kHz to 100 kHz) and do not contribute to the permittivity in the radar frequency band.

To describe the frequency dependence of the dielectric permittivity of concrete, it would be interesting to be able to measure it on the material. However, it is not easy to determine it directly. We must first have a suitable measuring instrument (a measuring unit with a frequency band that matches that of the GPR) and the size of the sample must be significant

enough to ensure a good representation of the measure. Then perform necessary computations to extract the value of the permittivity versus frequency from measurements [72]. However, the dielectric permittivity has a physical relationship between the real and imaginary parts that allows its modelling using the relationship Kramers-Kronig described by the formulas (5.3) and (5.4) [78].

$$\varepsilon'(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\omega \varepsilon''(\omega)}{\omega^2 - \omega_r^2} d\omega \quad (5.3)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{2\omega_r}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{1 - \varepsilon'(\omega)}{\omega^2 - \omega_r^2} d\omega \quad (5.4)$$

where  $\omega_r$  is a reference frequency and  $\omega$  is the frequency ranging from zero to infinity. Apart from the model of Kramers-Kronig, there are models to calculate the real and imaginary parts permittivity for many materials versus frequency. These models are based on the fact that it is possible to measure the real part of permittivity at low frequency ( $\varepsilon_0$ ) and at very high frequency ( $\varepsilon_\infty$ ). For example, the Debye model and others derived from it, such as the Cole-Cole and the Cole-Davidson models, are empirical models that can describe the permittivity frequency dependence on conductivity. However, these models are not fully adapted to numerous radar frequencies [79]. In this study on dielectric characterization of concrete in the frequency band (100 MHz – 2 GHz), we use a more global model called Universal Dielectric Response (UDR) introduced by [77]. The validity of the model was tested by a comparison with experimental data published by other authors.

## 5.2 Electromagnetic waves propagation models

Currently, there is a set of mathematical methods, which is highly efficient and diverse with regard to the modeling of electromagnetic waves propagation, e.g. : the method of moments [84, 85], rays delineation method, with spectral or pseudo spectral methods [86–91], methods of differential expression resolutions of Maxwell equations such as differences and Finite Elements Method [92–99]. However, the modeling of the propagation in concrete is not possible without the modeling of the permittivity of the concrete. The concrete is a heterogeneous material consisting principally of aggregates, sand, cement and water. Its permittivity depends on these constituents and also on the frequency of the electromagnetic signal as well. However, we can talk about the homogenization of concrete when the size of the heterogeneities is small enough with respect to the wavelength of the signal. In this case, the concrete could be represented by an average permittivity, called 'effective'. Choices of electromagnetic waves models become thus more limited. It is commonly acknowledged

that, when using pulsed radar at a particular frequency (the center frequency) the spectrum covered by the emission is narrow, so that the permittivity allocated to the material is usually a constant, independent of the frequency. This is also true for the studies concerned with concrete buildings effects on RF communications [100–102].

Many authors take into account the frequency dependence on the dielectric constant of concrete, including the radar frequency band (100 MHz – 2 GHz) [69, 70, 72, 103]. It is therefore important to have a mathematical formulation or a simple empirical model to describe this behaviour.

### 5.3 Jonscher model

Jonscher uses complex electric susceptibility (a dimensionless complex number), which is related to the dielectric constant by

$$\varepsilon_e(\omega) = \varepsilon_\infty + \varepsilon_0 \chi_e(\omega) - i \frac{\sigma_{DC}}{\omega} \quad (5.5)$$

The  $\varepsilon_\infty$  [F/m] is the limiting high-frequency value of the real part of the effective permittivity. It is constant and real, and it describes the mechanisms of polarization that rapidly respond to the application of an electric field. The value  $\sigma_{DC}$  is defined as dc conductivity (real and constant).  $\chi_e$  is the sum of various susceptibilities related to polarizations responding more slowly to the application of the electric field. It is expressed by the relationship called the Jonscher universal dielectric response [79]

$$\chi_e(\omega) = \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[ 1 - i \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \right] \quad (5.6)$$

where

- $n$  is an empirical parameter without dimension that characterizes the change in amplitude as a function of frequency ; this parameter varies between 0 for materials with high dielectric loss and 1 for materials without dielectric losses ;
- $\chi_r$  is the real part of the susceptibility to the frequency reference ;
- and  $\omega_r$  is a reference frequency, arbitrarily chosen.

The ratio  $\sigma_{dc}/\omega$  decreases with frequency and we can neglect this quantity at radar frequencies in equation (5.5). With this assumption, the effective dielectric permittivity can be



written [79]

$$\varepsilon_e(\omega) = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[ 1 - i \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \right] + \varepsilon_\infty \quad (5.7)$$

The variation of the effective permittivity with frequency is thus described by the three real parameters only :  $n$ ,  $\chi_r$  and  $\varepsilon_\infty$ .

In order to link these parameters to physical properties, effective parameters can be computed at different frequencies by

$$\varepsilon_r(\omega) = \text{Re}(\varepsilon_e(\omega)) \quad (5.8)$$

$$\sigma_r(\omega) = \varepsilon_0 \omega \text{Im}(\varepsilon_e(\omega)) \quad (5.9)$$

## 5.4 Adaptation of the Jonscher model to concrete

To build a Jonscher model describing the permittivity of concrete in the frequency domain, the knowledge of the three parameters  $n$ ,  $\chi_r$  and  $\varepsilon_\infty$  is required. In general, the parameters of a model (four or more) are not readily available from measurement data, and a non-linear algorithm for extracting them is usually used. In our case, since we opted for a three-parameter Jonscher model, we use the following method to determine these parameters. According to the formula (5.7), we can write

$$\varepsilon_e(\omega) = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[ 1 - i \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \right] + \varepsilon_\infty = \varepsilon'_e - i\varepsilon''_e \quad (5.10)$$

so,

$$\text{Re}(\varepsilon_e(\omega)) = \varepsilon'_e = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} + \varepsilon_\infty \quad (5.11)$$

and

$$\text{Im}(\varepsilon_e(\omega)) = \varepsilon''_e = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right). \quad (5.12)$$

Formula (5.9) gives

$$\begin{aligned} \sigma_r(\omega) &= \varepsilon_0 \omega \text{Im}(\varepsilon_e(\omega)) \\ &= \varepsilon_0^2 \omega \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (5.13)$$

Let  $f_1$  and  $f_2$  be two frequencies selected in the radar frequency band :

$$\sigma_r(\omega_1) = \varepsilon_0^2 \omega_1 \chi_r \left( \frac{\omega_1}{\omega_r} \right)^{n-1} \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \quad (5.14)$$

and

$$\sigma_r(\omega_2) = \varepsilon_0^2 \omega_2 \chi_r \left( \frac{\omega_2}{\omega_r} \right)^{n-1} \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right). \quad (5.15)$$

Dividing (5.14) by (5.15) and using the natural logarithm function we obtain

$$\ln \left[ \frac{\sigma_r(\omega_1)}{\sigma_r(\omega_2)} \right] = \ln \left[ \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^n \right] \quad (5.16)$$

leading to

$$n = \frac{\ln [\sigma_r(\omega_1)/\sigma_r(\omega_2)]}{\ln (\omega_1/\omega_2)}. \quad (5.17)$$

Let  $\varepsilon'_{e1}$  and  $\varepsilon'_{e2}$  be the two effective permittivities corresponding respectively to  $f_1$  and  $f_2$ . We have

$$\varepsilon'_{e1} = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega_1}{\omega_r} \right)^{n-1} + \varepsilon_\infty \quad (5.18)$$

$$\varepsilon'_{e2} = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega_2}{\omega_r} \right)^{n-1} + \varepsilon_\infty. \quad (5.19)$$

Since  $\omega_r$  can be chosen arbitrarily, let choose  $\omega_r = \omega_1$  and using (5.18) and (5.19), we obtain

$$\varepsilon'_{e2} - \varepsilon'_{e1} = \varepsilon_0 \chi_r \left[ \left( \frac{\omega_2}{\omega_r} \right)^{n-1} - 1 \right] \quad (5.20)$$

leading to

$$\chi_r = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon'_{e2} - \varepsilon'_{e1}}{\left( \frac{\omega_2}{\omega_r} \right)^{n-1} - 1} \quad (5.21)$$

and finally

$$\varepsilon_\infty = \varepsilon'_{e1} - \varepsilon_0 \chi_r. \quad (5.22)$$

We can now solve for the variation of the complex dielectric permittivity of the concrete as a function of frequency by simply using the values corresponding to the three parameters  $n$  equation (5.17),  $\chi_r$  equation (5.21) and  $\varepsilon_\infty$  equation (5.22) in the Jonscher model equation (5.7).

## 5.5 Validation of the Jonscher model on published data

In this analysis, the Jonscher model parameters  $n$ ,  $\chi_r$  and  $\epsilon_\infty$  for concrete are calculated from the experimental results published in [70] and [69] in the respective frequency ranges 10 MHz – 1 GHz and 1 MHz – 2 GHz respectively.

The different experimental devices used to achieve these measures are all governed by the same principle of measurement that follows : a vector network analyzer (VNA) measures the phase and amplitude of the waves transmitted and reflected on a sample of concrete, placed inside a coaxial cell. An inverse computation gives the values of real and imaginary parts of  $\epsilon_e$  along with the magnetic permeability [104]. In [70] measurements were performed on 19 concrete samples for various levels of water content. All samples were made using Ordinary Portland cement and the concrete mixes were made with Staffordshire Pink 10 mm gravel aggregate with Hope Quarry sand. Each specimen was weighed after each transmission-line test and after oven drying; the percentage of water by volume in each specimen was then calculated from the ratio of the volume of water (obtained from the difference of the two weights) and the volume of specimen. [70] provided measurement data showing the variation of permittivity and conductivity with frequency and moisture content. Similar transmission-line measurements of moisture conditioned concrete specimens were performed in [69] for a wider frequency range.

### 5.5.1 Computation of Jonscher's parameters

For each type of concrete, two values of the corresponding relative dielectric permittivity at two distinct frequencies were used. Formulas (5.17), (5.21) and (5.22) were used to calculate Jonscher's parameters for different samples. These parameters are the same across the frequency band considered. Results of the computations for six different water contents are summarized in table 5.1.

### 5.5.2 Results and Discussions

Figures 5.1 to 5.4 show the variation of  $\epsilon'_r$  and  $\epsilon''_r$  as a function of frequency for different moisture contents (MC) selected from table 5.1.

Broadly speaking, the relative permittivity (real and imaginary parts) is decreasing as a function of frequency. Variation is important for low-frequency (< 500 MHz). The most saturated concretes have permittivity (real part of the relative permittivity) and conductivity (imaginary part of the relative permittivity) that are larger than other concretes.

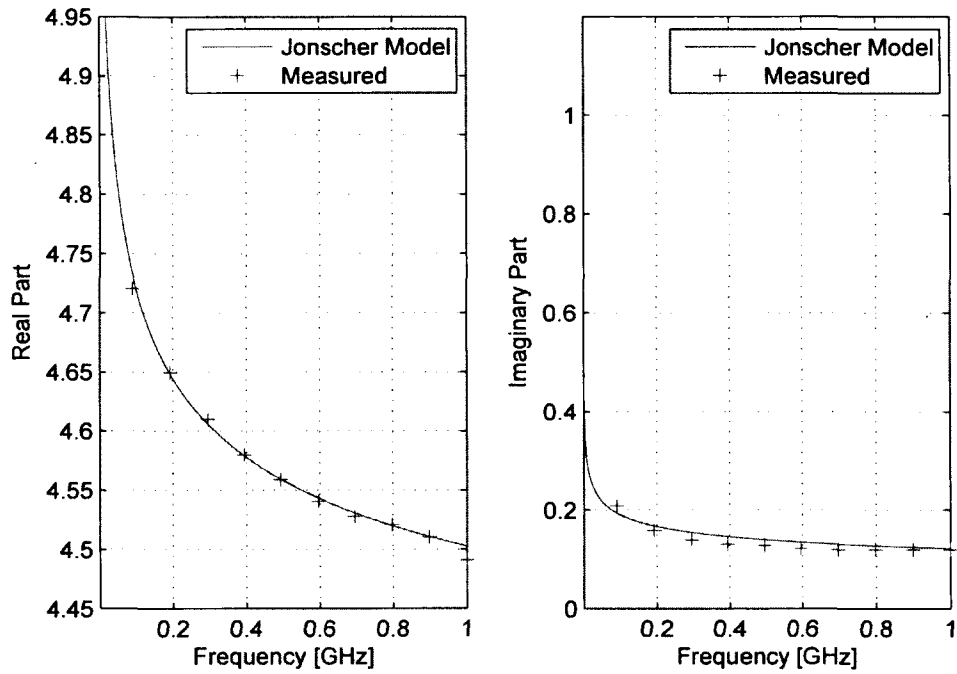


Figure 5.1 Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling, where concrete MC = 0.2%.

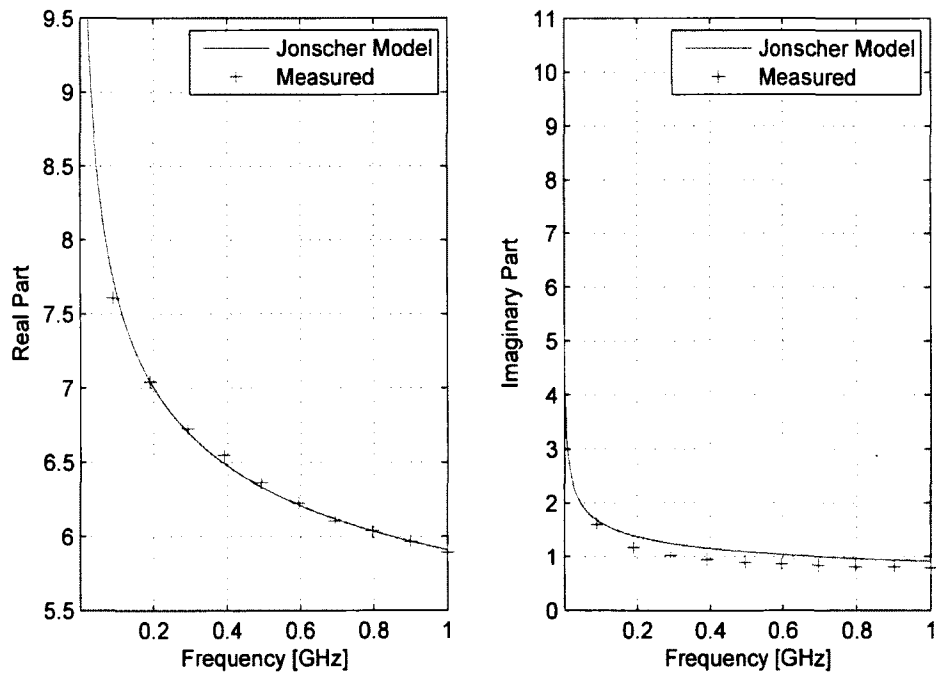


Figure 5.2 Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling, where concrete MC = 5.5%.

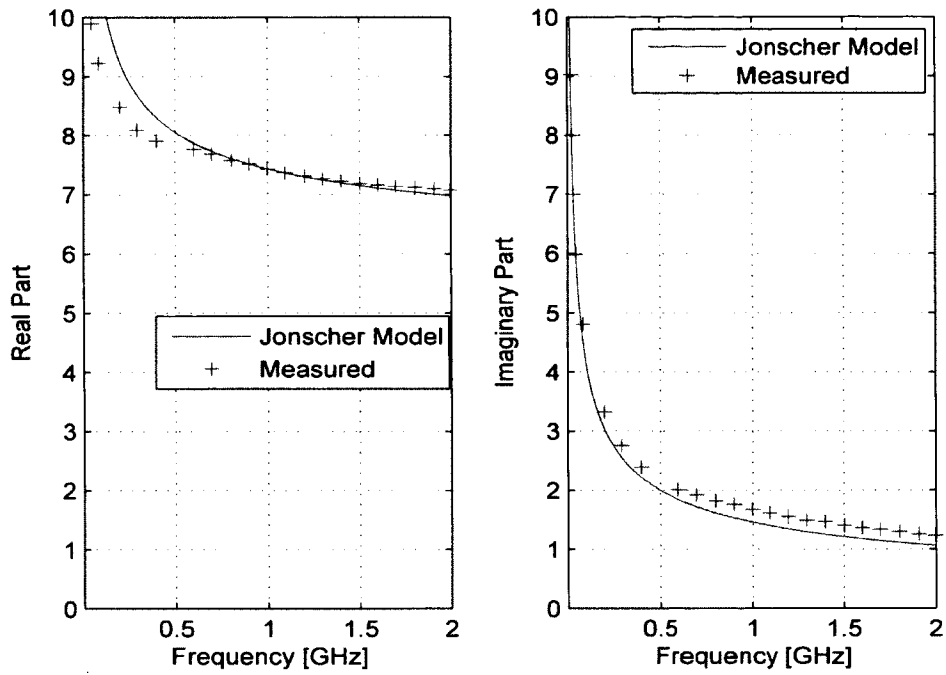


Figure 5.3 Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling, where concrete MC = 9.3%.

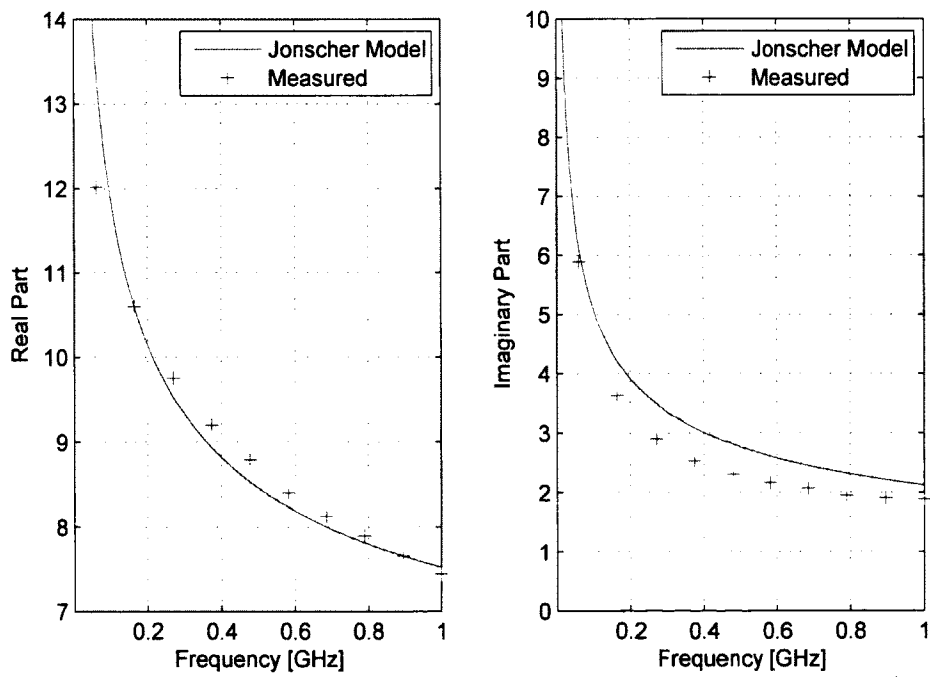


Figure 5.4 Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling, where concrete MC = 12.0%.

Tableau 5.1 Jonscher's parameters determined to adjust the Jonscher model to the effective dielectric constant measurements.

MC <sup>a</sup> (%)	Reference	$n$	$\chi_r$	$\epsilon_\infty/\epsilon_0$
12	[70]	0.62	7.49	4.39
9.3	[69]	0.54	4.77	5.75
6.2	[69]	0.60	2.99	4.94
5.5	[70]	0.74	3.87	3.75
2.8	[70]	0.74	1.49	4.45
0.2	[70]	0.80	0.60	4.11

<sup>a</sup> Moisture Content.

In terms of modelling, results given by Jonscher model are perfectly consistent with the experimental measurements, especially for figures 5.1 and 5.2 corresponding to 0,2% and 5,5% moistures.

A slight difference is noticeable on curves in figure 5.3 on the concrete moisture MC = 9.3%. This is limited to the real part of the relative permittivity on the frequency band below 500 MHz. In addition, a small difference is noticeable on curves in Figure 4 on concrete moisture MC = 12%. But in this case, it concerns the imaginary part of permittivity on the relative frequency band 300 MHz – 600 MHz.

## 5.6 Validation of the Jonscher model with respect to laboratory measurements

This section provides a comparison of the Jonscher model with experimental results obtained on samples of mortar and concrete. Results analysis concerns the sensitivity of the model to the variation of the heterogeneity of concrete as well as the variation of the water-cement ratio ( $W/C$ ) and porosity of samples.

### 5.6.1 Data acquisition and measurement system

The acquisition of the necessary data in this work was made possible through the use of a coaxial probe of the laboratory of the research group on testing and instrumentation (*Groupe de recherche sur l'auscultation et l'instrumentation (GRAI)*) at the University of Sherbrooke. The frequency band of use of the coaxial probe varies between 200 MHz and 900 MHz a band [105].

The complete measuring system (figure 5.5) mainly comprises a central processing unit (computer), a coaxial probe and vector network analyzer (VNA).



Figure 5.5 Measurement system

The coaxial probe, which forms a waveguide consists of two coaxial cylinders . The inner cylinder (kernel) is a  $2a$  diameter conductor. The outer cylinder hollow ( $2b$  diameter  $> 2a$ ) contains a dielectric material surrounding the nucleus. The waveguide ends with an aperture that is in contact with the flat surface of the sample under test.

Electromagnetic waves are generated by the VNA and are transmitted to the probe through the coaxial cable. When these waves get to the surface of the sample, they are reflected inward of the probe, carrying out information on the electromagnetic properties of the environment in contact with the aperture of the probe. VNA allows also the reflection at the aperture of the probe, and saves the data. Indeed, the results of measures represent reflection coefficient as a function of frequency of the waves driven and reflected at the aperture of the probe.

The data is then extracted from the VNA and processed on a special computer program developed for this purpose. This program allows the commutation of the real and imaginary parts of permittivity as a function of frequency.

The probe was calibrated and validation tests of the system were carried out successfully on saline solutions of 10, 15 and 20 part per thousand, as well as samples of solid limestone and granite.

We computed Jonscher's parameters corresponding to these environments for comparison with measurements of the probe. Figure 5.6 illustrates the example of 15 part per thousand Saline ( $n = 0.0055$ ,  $\chi_r = -3.5410$ ,  $\epsilon_\infty/\epsilon_0 = 72.8565$ ).

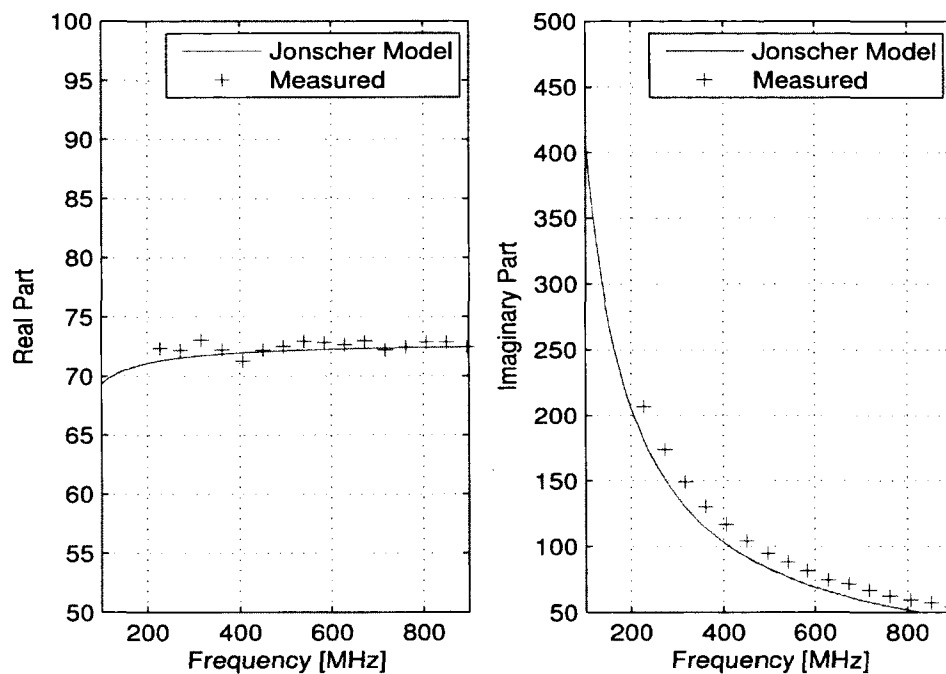


Figure 5.6 Comparison between the measured values and those given by modelling of the change in the relative dielectric permittivity as a function of frequency. Case of saline 15 part per thousand

Figure 5.6 shows a good correlation between the measured values and those given by Jonscher model during the calibration.

## 5.6.2 Samples considered

The framework of this study concerns two sets of environments :

- saturated slabs M1 and M2 of mortar.
- and concrete slabs B1, B2, B3 and B4. These concrete slabs have been dried in an oven until stabilization of the mass,



All slabs (mortar and concrete) have the same dimensions 28 cm x 28 cm x 7cm. The measurement were done in laboratory and the temperature of the samples was about 22°C. The characteristics of these samples are given in table 5.2.

### 5.6.3 Jonscher's parameters computation

In the computation of Jonscher's parameters for each type of samples we used the technique shown in section 5.3. It was also used for each type of sample two relative dielectric permittivity values corresponding to two different frequencies in the interval 200 MHz – 900 MHz. Jonscher's coefficients obtained after computation for the different samples are presented in table 5.3.

### 5.6.4 Results and discussions

The comparison of M1 and M2 mortar slabs shows that at saturated state, the most porous (in this case M2) has a higher permittivity. This result stems from the fact that the pores saturated with water have permittivities equal to that of water ( $\epsilon'_r = 81$ ), which has a direct impact on the overall permittivity of the medium; i.e., the more porous the material, the more important its moisture content, and hence the higher its permittivity is. Figure 5.7 shows a comparison between the experimental measurements and model data values of the change in the relative dielectric permittivity ( $\epsilon'_r$  and  $\epsilon''_r$ ) as a function of frequency for both mortar slabs M1 and M2.

The Jonscher model gives very satisfactory results that follow those representating measurements of mortar permittivities.

For concrete, comparing measurements made on B1, B2, B3 and B4 slabs shows that the concrete B1 ( $W/C = 0.3$ ) has the largest permittivity. This result indicates that, for dry concretes, permittivity decreases when the concrete  $W/C$  ratio increases. Figure 5.8 provides a comparison between the experimental measurements and model data values of the

Tableau 5.2 Characteristics of investigated concretes.

	M1	M2	B1	B2	B3	B4
W/C	0.38	0.56	0.3	0.66	0.75	0.84
Compressive strength on the 28th day (Mpa)	31	23	80.1	29.2	12.5	15
Stiffness in the 28th day (Gpa)	29	27	38.4	28.8	24	21.9
Average porosity (%)	—	—	8.7	13.7	16.9	13.3
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	—	—	2.27	2.18	2.17	2.17

Tableau 5.3 Jonscher's parameters determined to adjust the Jonscher model with measures of the effective dielectric constant on various samples.

Concrete sample	$n$	$\chi_r$	$\epsilon_\infty/\epsilon_0$
M1	0,5499	7,6573	5,0452
M2	0,5496	9,0306	5,6716
B1	0,7768	3,8222	3,5655
B2	0,6835	2,1021	3,7152
B3	0,7104	1,9043	3,3405
B4	0,7227	2,0439	3,4322

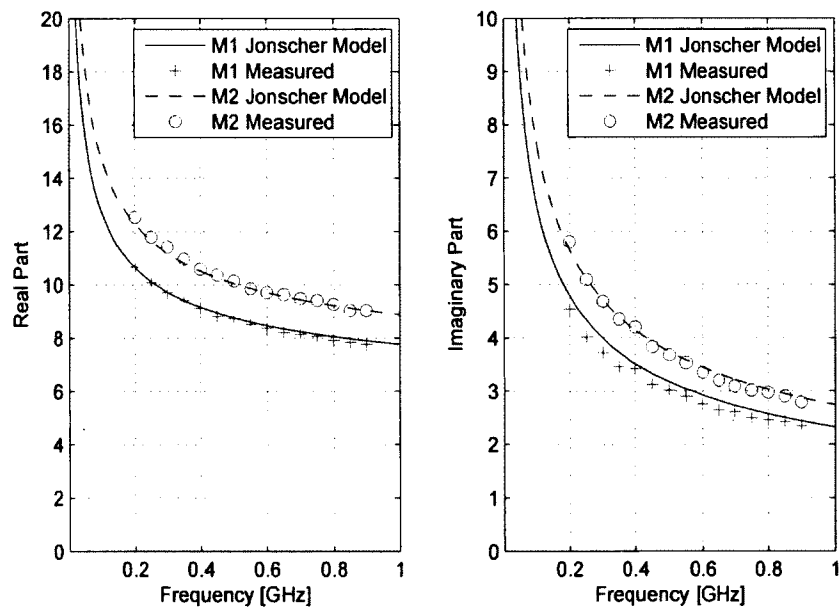


Figure 5.7 Comparison of the values of relative dielectric permittivity ( $\epsilon'_r$  and  $\epsilon''_r$ ) given by the Jonscher models corresponding to various M1 and M2 mortars and the measures taken by the probe.

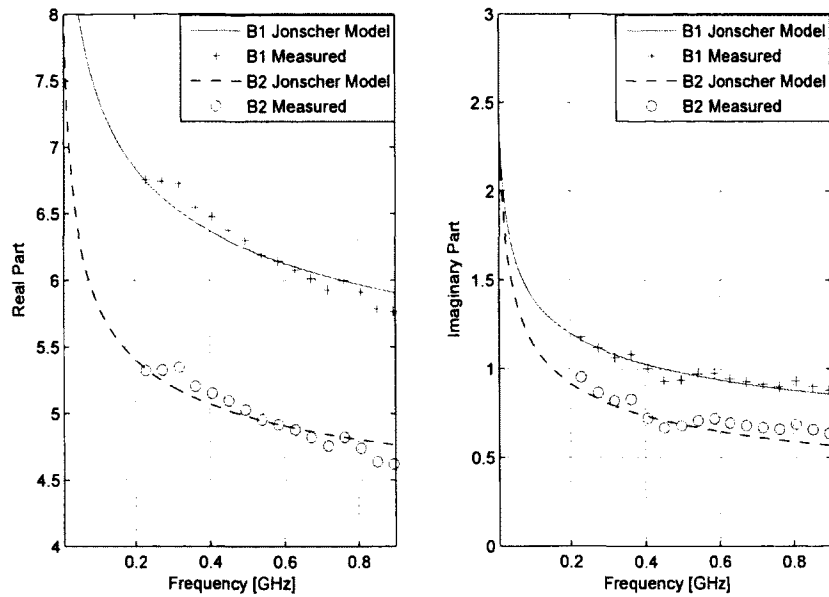


Figure 5.8 Comparison of the values of the relative dielectric permittivity ( $\epsilon_r'$  and  $\epsilon_r''$ ) given by the Jonscher model corresponding to the various B1 and B2 concretes and the measures given by the probe.

change in the relative dielectric permittivity ( $\epsilon_r'$  and  $\epsilon_r''$ ) as a function of frequency for both concrete B1 and B2 slabs.

Here again Jonscher model shows its effectiveness by giving results consistent with the measurements of permittivities on different concretes.

## 5.7 Conclusion

A Jonscher model adapted to the concrete has been developed. It gives the values of permittivity (real part) in very good agreement to those given by experimental measurements and this for different moisture contents, different heterogeneities and different porosities of concrete. Conductivity values (imaginary parts of effective permittivities) are also identical at low moisture contents. There are small differences for high moisture contents. However, curve shapes are similar. The model proposed here considers concrete as a homogeneous material and does not take into account the size of heterogeneities composing the concrete. This is assumed to be lower than the electromagnetic wavelength over the entire radar frequency band considered (100 MHz - 2 GHz). This assumption is acceptable for the ex-

perimental data used in this analysis, but it may not be true for all types of concretes, particularly those where the aggregate size is larger than the electric wavelength.

# CHAPITRE 6

## Comparaison et applications

Avant de mettre à profit les développements présentés au premier article dans le cadre de la modélisation de la permittivité diélectrique effective du béton, il convient maintenant de montrer que parmi les modèles présentés précédemment (Debye, Debye-étendu et Jonscher), seul le modèle de Jonscher à 3 paramètres permet de décrire parfaitement les variations en fonction de la fréquence de la permittivité effective du béton. Une approche analytique est validée, permettant de prédire le signal enregistré par un géoradar sur une dalle de béton caractérisée par une permittivité diélectrique effective donnée par modélisation ou par des mesures en laboratoire. Les implications de la dépendance fréquentielle de la permittivité diélectrique effective sur la déformation du signal radar pendant sa propagation sont mises en évidence (dispersion et atténuation). La compréhension de ces phénomènes est particulièrement importante dans le cadre de l'analyse de la forme des signaux radar réels.

### Avant-propos

#### Auteurs et affiliation:

T. Bourdi, étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie civil.

J. E. Rhazi, professeur associé, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie civil.

F. Boone, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie électrique et de génie informatique.

G. Ballivy, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie civil.

**Date d'acceptation:** 23 août 2012

**État de l'acceptation:** version finale publiée

**Revue:** Journal of Physics D : Applied Physics

**Référence:** [106]

**Titre français:** La modélisation de la constante diélectrique du béton : une aide pour déterminer l'effet de blindage et pour l'interprétation des résultats de la technique radar

**Contribution au document:**

La teneur en eau a un grand effet sur la permittivité diélectrique effective du béton. La compréhension de ce phénomène est particulièrement importante dans le cadre de l'analyse de la forme des signaux géoradar. Dans la référence [article 1], nous avons montré que le modèle de Jonscher à trois paramètres est capable de rendre en compte, avec efficacité, de l'aspect dispersif du béton. L'étude présentée ici est menée en confrontant les résultats de trois méthodes de modélisation : Jonscher à trois paramètres, Debye à trois paramètres et Debye-étendu à quatre paramètres. Une approche analytique est validée, permettant ainsi d'obtenir le signal réfléchi d'une antenne cornée placée à une distance d'une dalle de béton. Celle-ci est caractérisée par une permittivité diélectrique effective donnée par le modèle de Jonscher sur la bande de fréquence géoradar.

**Résumé en français:**

Plusieurs méthodes mathématiques efficaces et diversifiées ont été utilisées pour modéliser la propagation des ondes électromagnétiques. Chacune de ces méthodes possède un ensemble d'éléments clés qui facilite sa compréhension. Toutefois, la modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques dans le béton devient impossible sans modéliser les propriétés électriques de celui-ci. En plus des mesures expérimentales, les modèles théoriques et empiriques de ces propriétés peuvent être utiles pour décrire le comportement des propriétés électriques de béton par rapport à la fréquence, la teneur en eau (MC) ou d'autres facteurs. Ces modèles peuvent être utilisés dans différents domaines du génie civil, tels que (1) la compatibilité électromagnétique qui prédit l'efficacité du blindage (SE) d'une structure en béton contre les ondes électromagnétiques externes et, (2) dans les essais non destructifs, pour prédire l'onde radar réfléchie sur une dalle de béton. Cet article présente une comparaison entre le modèle de Jonscher et les modèles de Debye et Debye-étendu que certains chercheurs ont montré qu'ils sont appropriés pour représenter les propriétés diélectriques du béton. Le modèle Jonscher donne des valeurs de permittivité, de SE et d'onde radar réfléchie en très bon accord avec des mesures expérimentales et ce, pour différentes teneurs en eau. Cette étude montre que le modèle de Jonscher est le plus efficace et le plus approprié pour représenter les propriétés électriques du béton sur la bande de fréquence du géoradar (100 MHz-2 GHz).

**Note:** À la suite des corrections demandées par les membres du jury, le contenu de cet article peut différer de celui qui a été publié.

# **Modeling Dielectric-constant values of Concrete : An Aid to Shielding Effectiveness prediction and Ground-Penetrating Radar Wave Technique Interpretation**

## **abstract**

A number of efficient and diverse mathematical methods have been used to model electromagnetic wave propagation. Each of these methods possesses a set of key elements which eases its understanding. However, the modeling of the propagation in concrete becomes impossible without modeling its electrical properties. In addition to experimental measurements, material theoretical and empirical models can be useful to investigate the behavior of concretes electrical properties with respect to frequency, moisture content (MC) or other factors. These models can be used in different fields of civil engineering such as 1) Electromagnetic Compatibility (EMC) which predicts the Shielding Effectiveness (SE) of a concrete structure against external electromagnetic waves and 2) in non destructive testing (NDT) to predict the radar wave reflected on a concrete slab. This paper presents a comparison between the Jonscher model and the Debye models which is suitable to represent the dielectric properties of concrete, although dielectric and conduction losses are taken into consideration in these models. The Jonscher model gives values of permittivity, SE and radar wave reflected in a very good agreement with those given by experimental measurements and this for different MC. Compared to other models, Jonscher model is very effective and is the most appropriate to represent the electric properties of concrete.

## **6.1 Introduction**

The simulation techniques of electromagnetic waves propagation are diverse, some of these are : Ray tracing, Finite-Difference Time Domain (FDTD), finite-element (FE), etc. [107]. Because of their ability to adequately simulate the testing of concrete, FDTD method [108–111] and the (FE) method [112, 113] seem to be very interesting. Regardless of the type of the simulation method used, we still need a modeling of the permittivity of the concrete. For example a step in the FDTD technique is to assign to each cell in the computational domain

a value of the dielectric constant, thus simulating different interfaces, but also permittivity gradients [114]. The dielectric permittivity models are characterized by great diversity. [115, 116] which set up a comparative list of different models of the permittivity of the concrete. All of these proposed models in the literature fall within the following four categories [117, 118] :

- Effective medium or Composite spheres model : Computes dielectric permittivity properties by successive substitutions, as proposed by Bruggeman-Hanai-Sen (BHS)
- Empirical and Semi-empirical : Mathematical relationship (Logarithmic and Polynomial) between dielectric permittivity and other characteristics of a concrete, especially volumetric water content and texture information
- Volumetric : Relates bulk dielectric properties of a mixture to the dielectric properties of its constituents such as the Complex Refractive Index method (CRIM), Arithmetic average, Harmonic average, Lichtenecker-Rother and Time-Propagation (TP) methods
- Phenomenological : Relates frequency dependent behavior to characteristic relaxation times such as Cole-Cole ; Debye and Jonscher equations

The dielectric permittivity model that was found by the authors to be the most useful and the easiest to implement for concrete is the Jonscher model, a Phenomenological model. This model has its interest in two different and important applications : the first one is in the field of EMC and the second one is in the field of concrete structures evaluation by the ground penetrating radar (GPR) technique. In the literature, research on EMC for constructions are mainly focused on metal enclosures [119] or reinforced concrete buildings [100, 120–122], while deficiency may exist in pure concrete structure analysis of shielding performance. Some researchers considered that the concrete can be neglected in the analysis of shielding performance. The assumption is reasonable for reinforced concrete due to the favourable shielding performance of steel grids and to a particular reinforcement configuration [100, 123] but it is not followed that the concrete is of no shielding efficiency [124].

In addition, SE measurements in an anechoic chamber are often time consuming and expensive [125]. This work relates to the Shielding performance of non-reinforced concrete over the frequency range 30 MHz and 1 GHz. The objective is to show that the Jonscher model is better than other models to predict the SE of concrete against external electromagnetic waves. In civil engineering, GPR is an electromagnetic technique that is based on the propagation and reflection of high frequency (100 MHz - 6 GHz) electromagnetic waves. The electromagnetic waves behaviour is characterised by the dielectric permittivity properties of



the medium and conductivity. Modeling of these parameters can predict waves that can be captured by the GPR. Also, the modeling of the expected GPR signal is a powerful tool to better understand the measured signals. The aim is to show that the model of Jonscher is better than other models in predicting the radar wave measurement on a concrete slab. A dispersive material model for concrete was presented in [83]. The validation of the model was carried out through a series of tests on mortar and concrete at the laboratory.

In this paper, the validation of the model is larger in comparison to other models. The comparison of different electrical models of concrete for different MC in order to choose the model that is most approached the experimental measurements taken on various samples of concrete is described in Section 2. Results of the comparison between the shielding effectiveness of concrete obtained with analytical approach based on these different models are presented and commented. The shielding effectiveness of concrete was predicted for different MC. Section 3, mainly focused on the model of the radar wave measured on a concrete slab for different MC. In doing so, we examine the results given by the models presented in Section 2 by comparing them to wave radar based on experimental measurements in frequency domain, over the radar frequency band (100 MHz - 2 GHz) corresponding to the air-coupled antenna of 1 GHz center frequency.

## **6.2 Modeling of concrete**

As concrete is a porous and heterogeneous material, with pores filled with electrolytic solution, it can be expected that the relative permittivity is frequency dependent. We modeled this dispersion and used the experimental study to determine the best model describing the measured variations of relative permittivity in Frequency.

### **6.2.1 Debye model and Debye model extended**

The Debye model [74] is used to describe the frequency behavior of the permittivity of many types of materials, especially polar liquids such as water [126]. The model has been extended to include conductivity [127] and several different relaxation components [128], and has been used to describe the behavior of such diverse materials as glass [129], biological tissues [130], circuit boards [131], ceramics [132], soils [133] and concrete [82, 134]

In order to represent the behavior of the concrete complex permittivity through a dielectric dispersion model that can be used in the transmission line matrix (TLM) numerical

simulator, [82] showed the extended Debye model which gives the most appropriate representation.

Modelling concrete as a Debye material, its frequency dependent complex relative permittivity obeys to the following equation :

$$\widehat{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega) \quad (6.1)$$

$$= \epsilon_\infty + \frac{\Delta\epsilon}{1 + \omega^2\tau^2} - j \frac{\omega\tau\Delta\epsilon}{1 + \omega^2\tau^2}. \quad (6.2)$$

where  $\omega$  is the frequency ranging from zero to infinity.  $\Delta\epsilon = \epsilon_{static} - \epsilon_\infty$  is the difference between the values of the real part of the complex relative permittivity at low and high frequency, respectively, and  $\tau$  is the relaxation time.

$\epsilon_r'(\omega)$  is real part of the complex relative permittivity, which takes account of the ability of the medium to store electrical energy. It can be written as

$$\epsilon_r'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\Delta\epsilon}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (6.3)$$

$\epsilon_r''(\omega)$  is the imaginary part of the complex relative permittivity, which takes account of the energy losses due to dielectric relaxation. It can be written as

$$\epsilon_r''(\omega) = \frac{\omega\tau\Delta\epsilon}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (6.4)$$

To take explicit account of the energy loss due to concrete electrical conductivity, an additional term can be considered in (6.4) yielding [82]

$$\epsilon_{r,eff}''(\omega) = \frac{\omega\tau\Delta\epsilon}{1 + \omega^2\tau^2} + \frac{\sigma_{dc}}{\omega\epsilon_0} = \frac{\sigma_{eff}(\omega)}{\omega\epsilon_0} \quad (6.5)$$

where  $\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 8176 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$  (or  $\text{C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ) is the free-space permittivity and  $\sigma_{dc}$  is the dc electrical conductivity of concrete.

$\sigma_{eff}(\omega)$  is the so-called effective conductivity and the model represented by (6.3) and (6.5) is considered as an extension of the Debye model (extended Debye model).

However, the values of  $\epsilon_{static}$ ,  $\epsilon_\infty$  and  $\sigma_{dc}$ , which are essential for the construction of a Debye response, are not readily available from measurement data. These parameters can

be obtained by fitting (6.3) and (6.5) to experimental values. A nonlinear least-squares Marquardt-Levenberg algorithm was used for the fitting [82].

### 6.2.2 Jonscher model

[79] proposed to use the Jonscher formulation [77] to characterise the frequency dependence of permittivity of geological materials. Recently [83] applied the Jonscher model to show the dispersive aspect of concrete. This approach was tested on laboratory measurement carried out on various concrete samples. The Jonscher law requires only three real parameters :

$$\varepsilon_e(\omega) = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[ 1 - i \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \right] + \varepsilon_\infty \quad (6.6)$$

where

- $\omega_r$  is a reference frequency, arbitrarily chosen.
- $n$  is an empirical parameter without dimension that characterizes the change in amplitude of permittivity as a function of frequency, this parameter varies between 0 for materials with high dielectric loss and 1 for materials without dielectric losses ;
- and  $\chi_r$  is the real part of the susceptibility to the frequency reference ;

In order to link these parameters to physical properties of concrete, effective parameters were computed at two different frequencies  $f_1$  and  $f_2$  :

$$\varepsilon'_{e1} = \text{Re}(\varepsilon_e(\omega_1)), \quad (6.7)$$

$$\sigma_r(\omega_1) = \varepsilon_0 \omega_1 \text{Im}(\varepsilon_e(\omega_1)) \quad (6.8)$$

and

$$\varepsilon'_{e2} = \text{Re}(\varepsilon_e(\omega_2)), \quad (6.9)$$

$$\sigma_r(\omega_2) = \varepsilon_0 \omega_2 \text{Im}(\varepsilon_e(\omega_2)) \quad (6.10)$$

where  $\varepsilon'_{e1}$  and  $\varepsilon'_{e2}$  were the two effective permittivities corresponding respectively to  $f_1$  and  $f_2$ .

The three parameters  $n$ ,  $\chi_r$  and  $\varepsilon_\infty$  in the Jonscher model of concrete were obtained by the following expressions [83] :

$$n = \frac{\ln[\sigma_r(\omega_1)/\sigma_r(\omega_2)]}{\ln(\omega_1/\omega_2)} \quad (6.11)$$

$$\chi_r = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\epsilon'_{e2} - \epsilon'_{e1}}{\left(\frac{\omega_2}{\omega_r}\right)^{n-1} - 1} \quad (6.12)$$

and finally

$$\epsilon_\infty = \epsilon'_{e1} - \epsilon_0 \chi_r \quad (6.13)$$

We can now solve for the variation of the complex dielectric permittivity of the concrete as a function of frequency by simply using the values corresponding to the three parameters  $n$ ,  $\chi_r$  and  $\epsilon_\infty$  in the Jonscher model (6.6)[83]. These parameters can be obtained by fitting (6.11), (6.12) and (6.13) to experimental values without using a special algorithm for calculating.

### 6.2.3 Results and Discussions

Results from transmission line measurements indicate that this laboratory technique is capable of providing measurements (of permittivity) on different types of samples with a high degree of accuracy [82, 83]. In this section, the parameters for concrete are calculated from this experimental results published in [70] and [69] in the respective frequency ranges [10 MHz - 1 GHz] and [1 MHz -2 GHz], respectively.

In Table 6.1, the values for  $(\epsilon_{static}, \epsilon_\infty, \tau, \sigma_{dc})$  and  $(n, \chi_r, \epsilon_\infty)$  obtained for different moisture contents are summarized.

Figures 6.1 - 6.4 show the variation of  $\epsilon'_r(\omega)$  and  $\epsilon''_{r,eff}(\omega)$  as a function of frequency for different moisture contents (MC) selected from table 1. We represent in the same figures the results found by Debye's models and those given by the Jonscher's model to highlight

Tableau 6.1 Fitted parameters for concrete samples.

MC <sup>a</sup> (%)	Reference	Parameters for Debye's models [82]				Parameters for Jonscher's model [83]		
		$\epsilon_{static}$	$\epsilon_\infty$	$\tau(ns)$	$\sigma_{dc}(\Omega^{-1}m^{-1})$	$n$	$\chi_r$	$\epsilon_\infty/\epsilon_0$
12	[70]	12.84	7.42	0.611	$20.6 \times 10^{-3}$	0.62	7.49	4.39
9.3	[69]	11.19	7.20	0.73	$23 \times 10^{-3}$	0.54	4.77	5.75
6.2	[69]	9.14	5.93	0.80	$6.7 \times 10^{-3}$	0.60	2.99	4.94
5.5	[70]	8.63	6.023	1.00	$5.15 \times 10^{-3}$	0.74	3.87	3.75
2.8	[70]	6.75	5.503	2.28	$2.03 \times 10^{-3}$	0.74	1.49	4.45
0.2	[70]	4.814	4.507	0.82	$6.06 \times 10^{-4}$	0.80	0.60	4.11

<sup>a</sup> Moisture Content.

the most representative and most of the models approached the results of experimental measurements.

Figure 6.1 shows  $\epsilon'_r(\omega)$  and  $\epsilon''_{r,eff}(\omega)$  for moisture content of 0.2%. Analogously, figures 6.2 - 6.4 depict the same quantities, respectively, for moisture content of 5.5%, 6.2% and 12%.

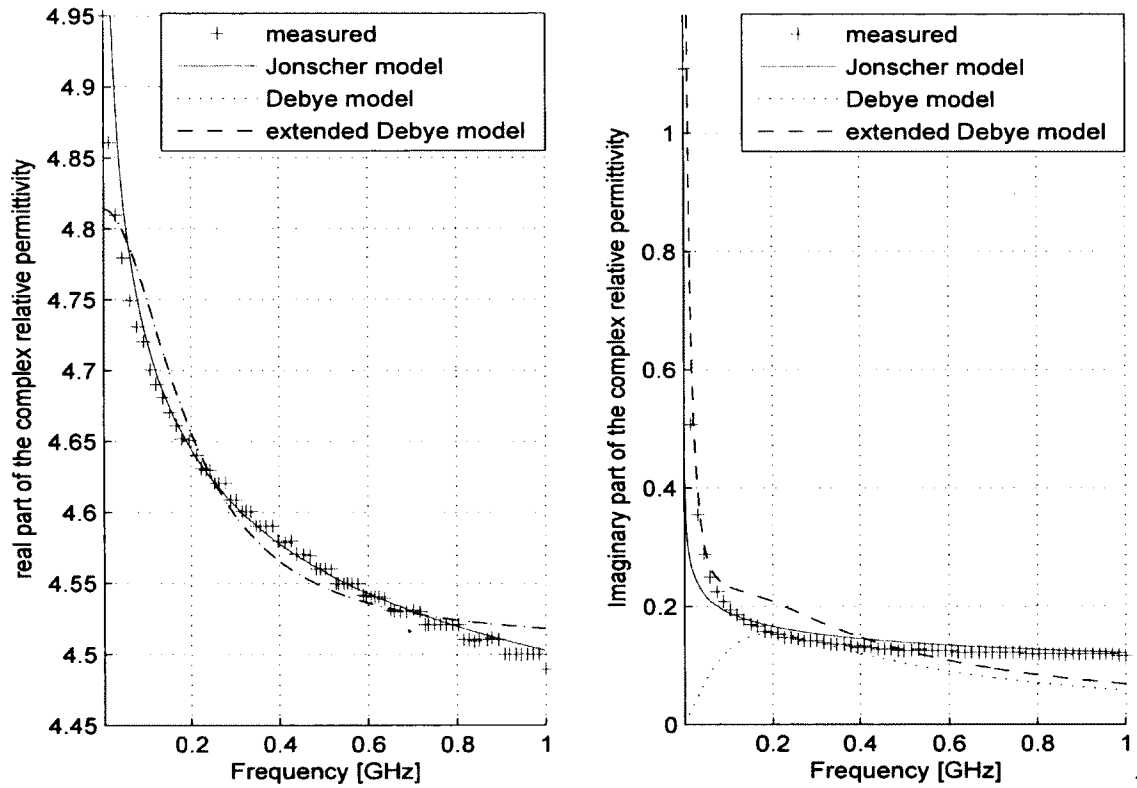


Figure 6.1 Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling for MC = 0.2%.

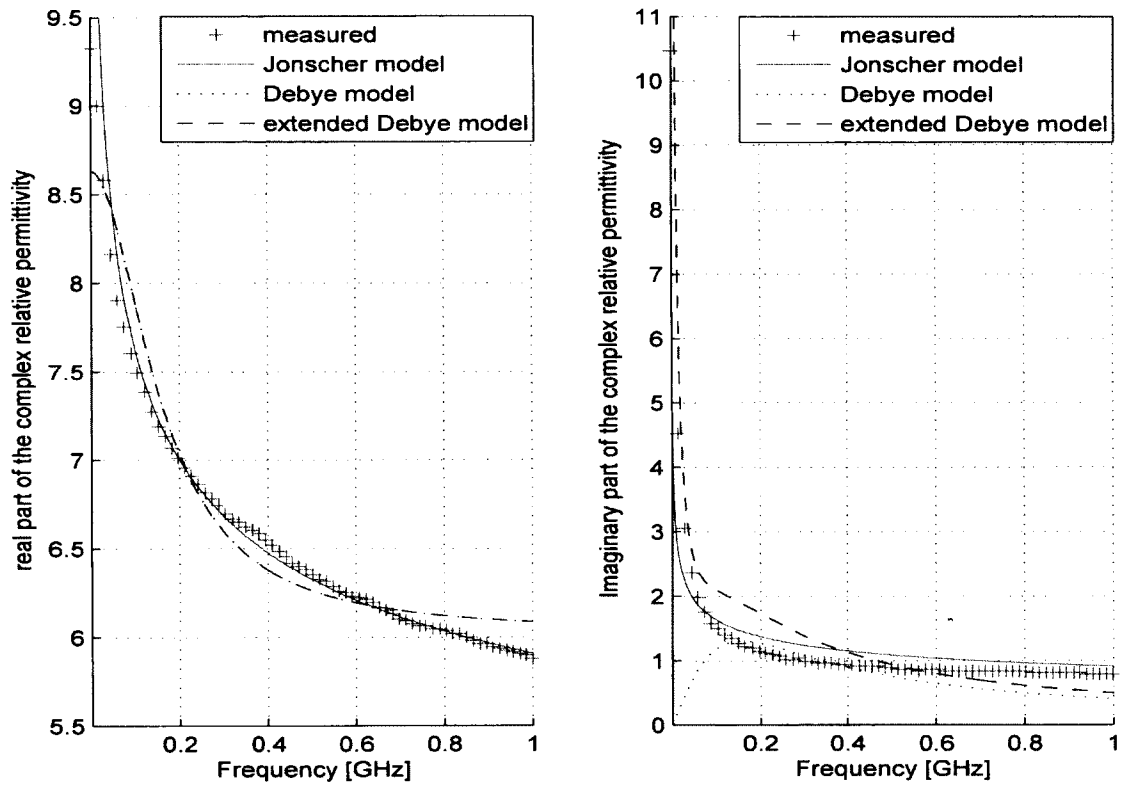


Figure 6.2 Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling for MC = 5.5%.

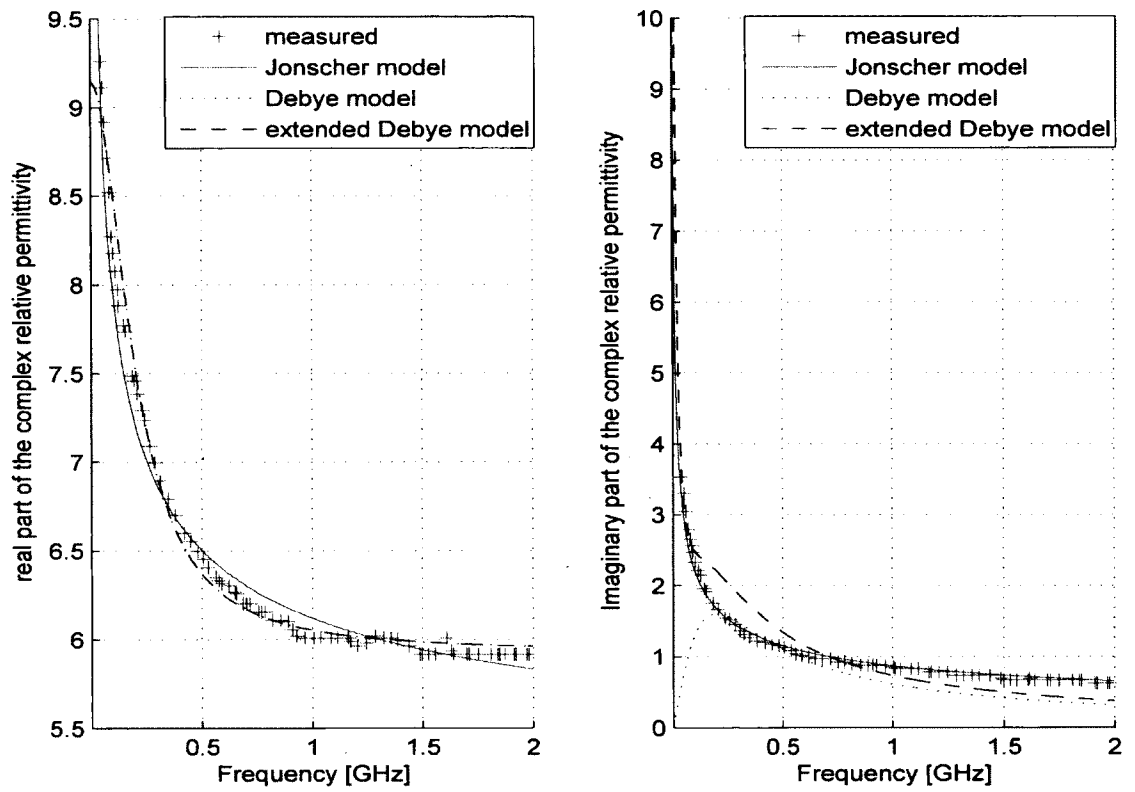


Figure 6.3 Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling for MC = 6.2%.

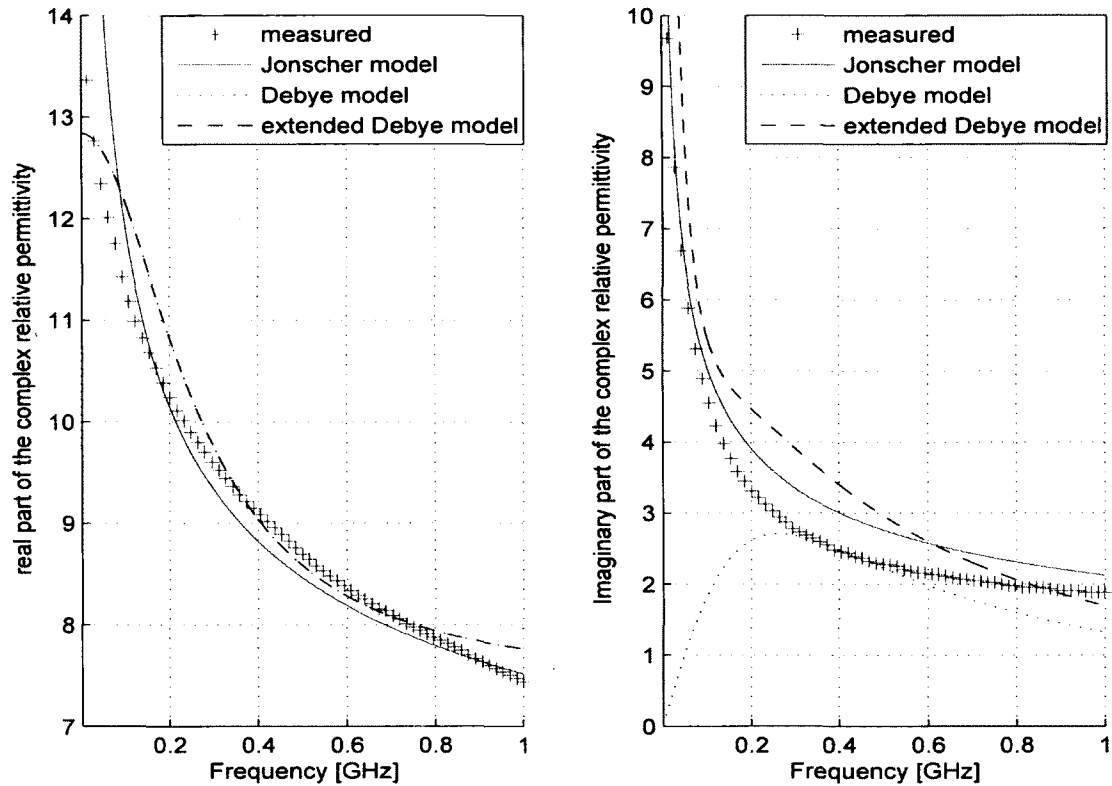


Figure 6.4 Comparison between the measured values of the relative dielectric permittivity and the values obtained by modelling for MC = 12.0%.

A number of immediate observations can be made from the figures presented in this section, namely :

- From these results it can be seen that the increase of moisture content (MC) contributes to an increase of both real and imaginary parts of complex permittivity particularly in the lower frequency range and these features are consistent with results from other published reports [83, 135].
- For both moisture contents the  $\epsilon_r'(\omega)$  curve Debye model and the extended Debye are confused because it is the same formula (6.3). The Debye models do not follow the trend of measurements at low frequencies, whereas the Jonscher model continues to give adequate results.
- Curve  $\epsilon_r''(\omega)$  shows that the Debye model with three parameters does not follow the trend of measurements at low frequencies. This is the reason for the extended Debye model with four parameters. In the only case where MC=12.0% and for a range of



frequencies very small [0.3 0.7 GHz] the Debye model with three parameters is the approach of the two other models with experimental measurements if all the other curves of the model remains Jonscher the best of the three models.

- Jonscher's model with only three parameters gives even more approximate measures that the extended Debye model and the agreement between experimental data and fitted curves is reasonably good.

## 6.2.4 Shielding effectiveness

[124] presented a simple analytical approach for determining the shielding effectiveness of concrete structures. The analysis was based on Schelkunoff theory, with simple and approximate expressions derived for the reflection, absorption and re-reflection losses. [82, 124, 134] argued that lossy dielectric properties can be specified in numerical simulators at the expense of setting up more complicated dispersion models. Of these, the most appropriate to represent the dielectric properties of concrete was Debye's. We present here a comparison between an analytical approach that relies on measurements, and modelling that make use of Debye and Jonscher models. The electrical parameters of concrete required for estimating the shielding effectiveness of a concrete structure were derived through formulas presented in [82, 124, 134] fitting from published experimental results in [70] and [69] in the frequency range [10MHz - 1 GHz] and [1 MHz - 2 GHz], respectively. In this analytical approach we also use the electrical parameters of concrete obtained by the different models studied in this section (3)-(6).

Figures 6.5 and 6.6 show the variation of shielding effectiveness as a function of frequency for a concrete wall of thickness 0.3 m and MC=0.2% and 12% respectively. It can be observed that the increase of MC increases obviously the SE of the wall and lowers the frequency in correspondence of which the maximum SE can be observed. It can be noticed that for the concrete wall with a MC of 0.2% the oscillating behaviour is more important than the wall with a MC of 12%.

As regards this figures, although discrepancies among the shielding effectiveness values predicted by the proposed analytical approach and the models are now more evident (Figure 6.6), the trend of the results is still in good agreement for the concrete wall with lower MC (Figure 6.5).

With respect to the shielding effectiveness, the Jonscher model gives approximate values with experimental data at different frequency ranges especially for MC = 0.2% . The extended Debye model tends to yield higher values than the experimental data at very low

and intermediate frequencies, and lower ones at the other frequencies. Whereas, the Debye model behaviour at high and low frequency is completely different from the experiments.

### 6.3 Ground-Penetrating Radar

In this work, we want to extend the basic knowledge about GPR when used as an assessment tool for concrete structures. This second application in civil engineering illustrates the modeling of the radar wave reflected on a concrete slab. In fact, we used Jonscher model and Debye models to obtain permittivity versus frequency, which was then used in the GPR frequency range to obtain the radar wave reflected from concrete slab.

The GPR technique involves the pulsing of radar waves into concrete and/or construction materials. The propagation of the signal is affected by the dielectric properties of the materials, so that its attenuation and reflected components vary accordingly. An examination of the reflected radar waveforms enables an interpretation of the concrete and/or structure under investigation. A model was developed to predict the radar signal over a concrete slabs, as shown in figure 6.7. Since the angle of incidence was found to have insignificant effects on the solution [136], the model was developed assuming normal incidence.

As the electromagnetic wave hits the concrete slabs surface, some energy will be reflected with a reflection coefficient of  $\rho_1$ , and some energy will be transmitted through the interface with a transmission coefficient equal to  $(1 + \rho_1)$ .  $\rho_1$  is given by :

$$\rho_1 = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad (6.14)$$

The wave will then propagate through the concrete until it reaches the point just before the concrete/air interface. At that point, the transmitted wave is multiplied by the propagation factor  $T$  given by :

$$T = e^{-j\frac{\omega}{c}d\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6.15)$$

where  $\omega$  angular frequency;  $d$ (m) concrete slabs thickness and  $c$  speed of light. At the concrete/air interface, some energy will be reflected with a reflection coefficient of  $\rho_2$ , and some energy will be transmitted through the interface with a transmission coefficient  $(1 + \rho_2)$ . The reflection coefficient  $\rho_2$  is given by (6.16)

$$\rho_2 = \frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \quad (6.16)$$

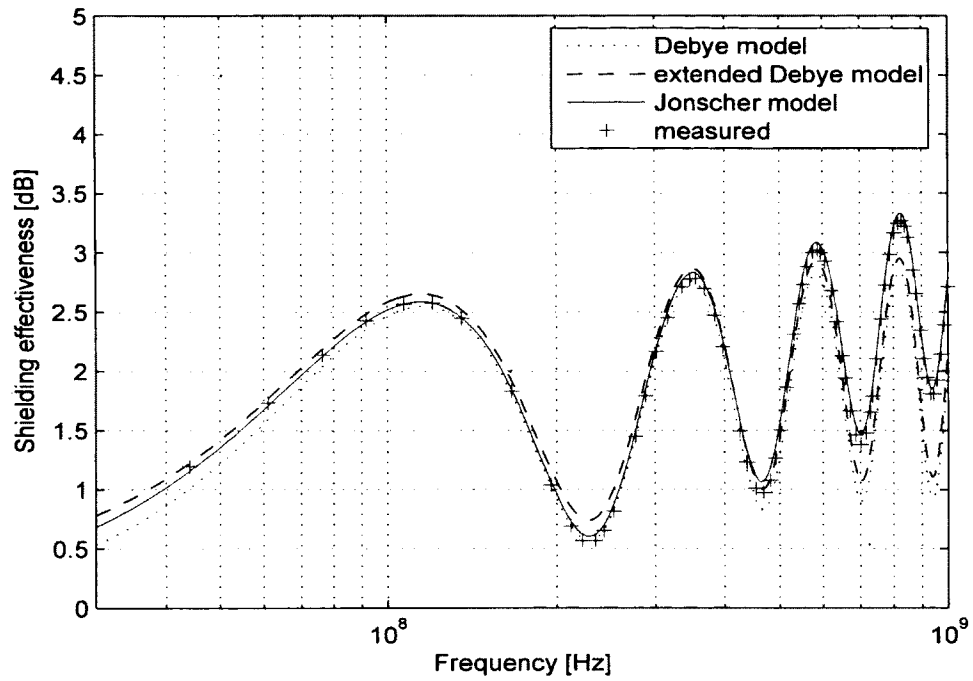


Figure 6.5 Comparison of shielding effectiveness for a concrete wall of thickness 0.3 m and MC = 0.2%.

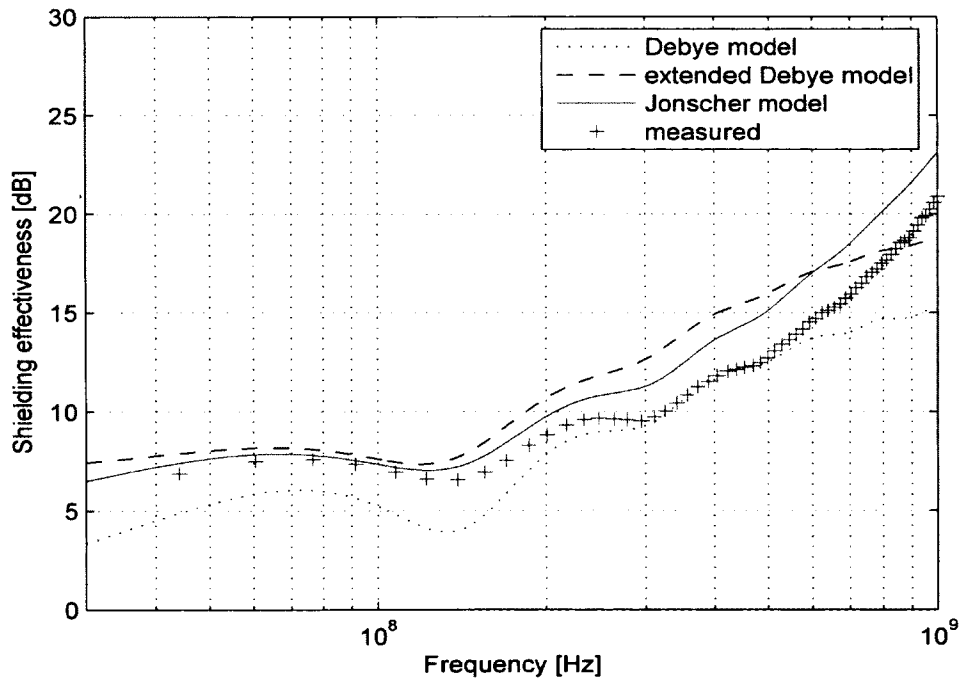


Figure 6.6 Comparison of shielding effectiveness for a concrete wall of thickness 0.3 m and MC = 12.0%.

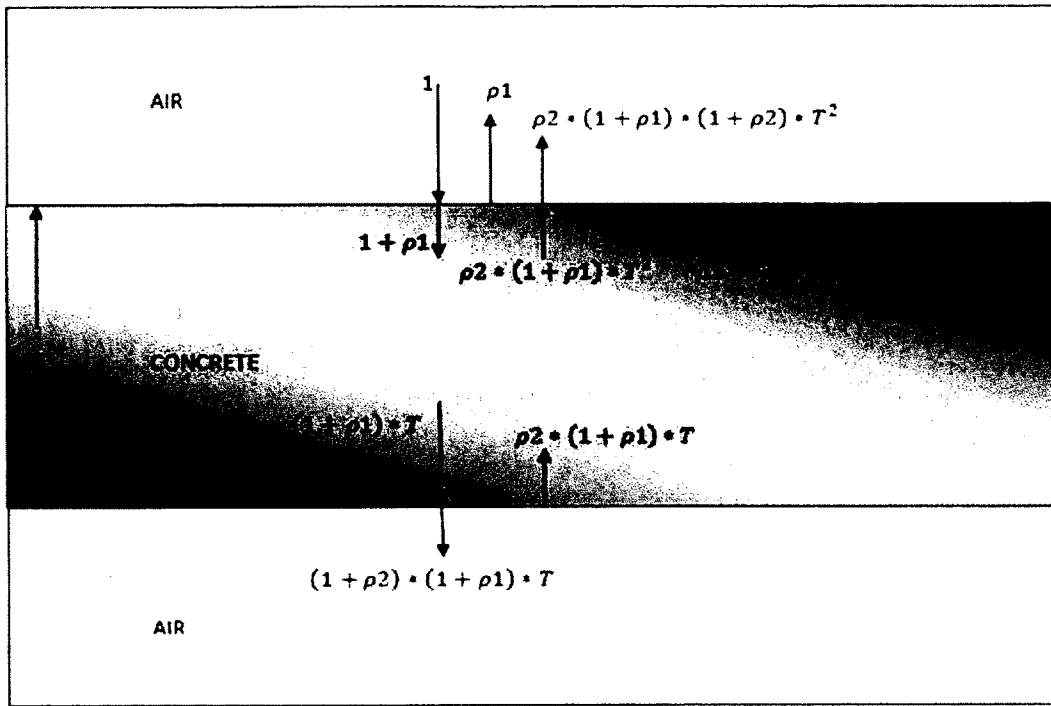


Figure 6.7 Overall reflection model for concrete slabs.

The reflected waveform will propagate back through the concrete until it reaches the point before the concrete/air interface. There the wave is multiplied by the propagation factor  $T$ . At the interface, energy will be reflected back inside the concrete with a reflection coefficient  $\rho_2$  and some energy will be transmitted with a transmission coefficient  $(1 + \rho_2)$ . The effect of the reflected energy back into the concrete was found not to affect the solution ; therefore, it was eliminated from the final proposed model.

The total reflection coefficient,  $\Gamma$ , is therefore the sum of all the coefficients reflected and transmitted at the concrete/air interface as presented in (6.17) :

$$\Gamma = \rho_1 + \rho_2 * (1 + \rho_1) * (1 + \rho_2) * T^2 \quad (6.17)$$

Or

$$\rho_2 = -\rho_1 \quad (6.18)$$

So

$$\Gamma = \rho_1 - \rho_1 * (1 - \rho_1^2) * T^2 \quad (6.19)$$

The predicted frequency spectrum  $F_r$  is obtained by using

$$F_r = \Gamma * F_i \quad (6.20)$$

where  $F_i$  is the input frequency spectrum

One equation will thus be obtained with only one unknown,  $\epsilon_r$ , as shown in equation (6.21)

$$F_r = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} - \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} * \left( 1 - \left( \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right)^2 \right) * \left( e^{-j \frac{\omega}{c} d \sqrt{\epsilon_r}} \right)^2 * F_i \quad (6.21)$$

### 6.3.1 The incident frequency spectrum of GPR

The GPR system used in [137] is composed of a control unit, a transceiver box, and a pair of horn antennas. The antennas are TEM horns with a manufacturer reported center frequency of 1 GHz. Because the air-coupled antennas were usually placed at a distance of 475 mm from the surface, polystyrene plastic pieces with a total thickness of 475 mm were placed on top of the slab surface. The antennas were then placed on top of the polystyrene plastic pieces. The incident frequency spectrum is calculated from the data collected over a copper plate placed on the pavement surface. A fast Fourier transform (FFT) algorithm is used on the time-domain signal to achieve the input frequency spectrum  $F_i$  [137]. The incident frequency spectrum is shown in figure 6.8. Using the 3 dB criteria, a bandwidth of 0.5 GHz is found (from 0.5 GHz to 1 GHz). The centre frequency of the nominal 1 GHz antenna has dropped to 666 MHz.

### 6.3.2 Frequency spectrum of reflected wave

In this study, the reflected frequency spectrum is therefore synthesized using a complex permittivity  $\epsilon_r$  reported in section 2. We use as reference the synthesized waveforms gives by the experimental measurements of a complex permittivity  $\epsilon_r$  used in previous sections.

The synthesis of air-coupled GPR waveforms for concrete slabs with different moisture content was performed for MC= 0.2%, 6.2% and 12%. Figures 6.9 - 6.11 shows respectively these different waveforms.

As it can be noticed, for different moisture contents, the agreement between the Jonscher models and references curves is very good. For what concerns Debye models, the major

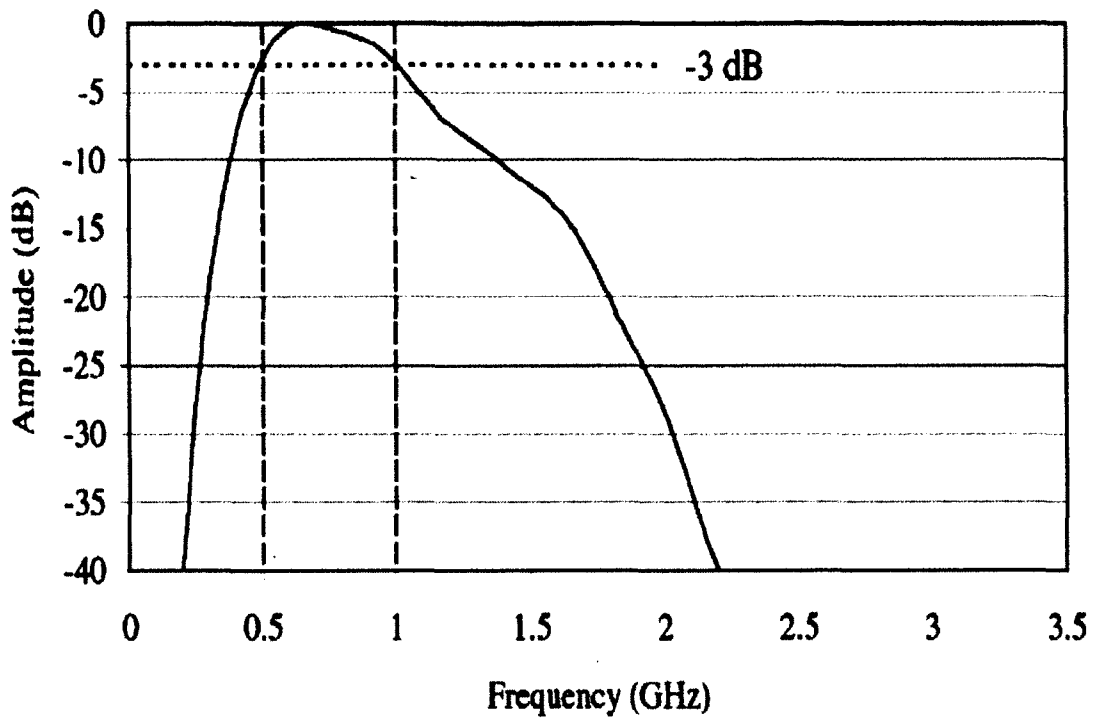


Figure 6.8 Incident frequency spectrum [136, 137].

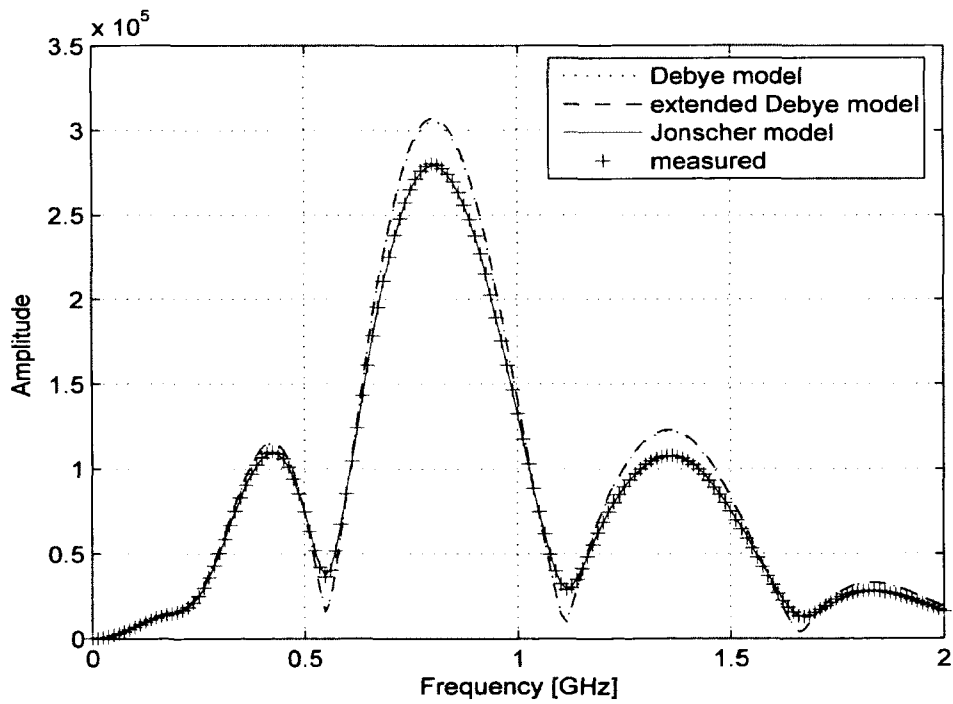


Figure 6.9 Modeled and measured frequency spectrums for MC=0.2%

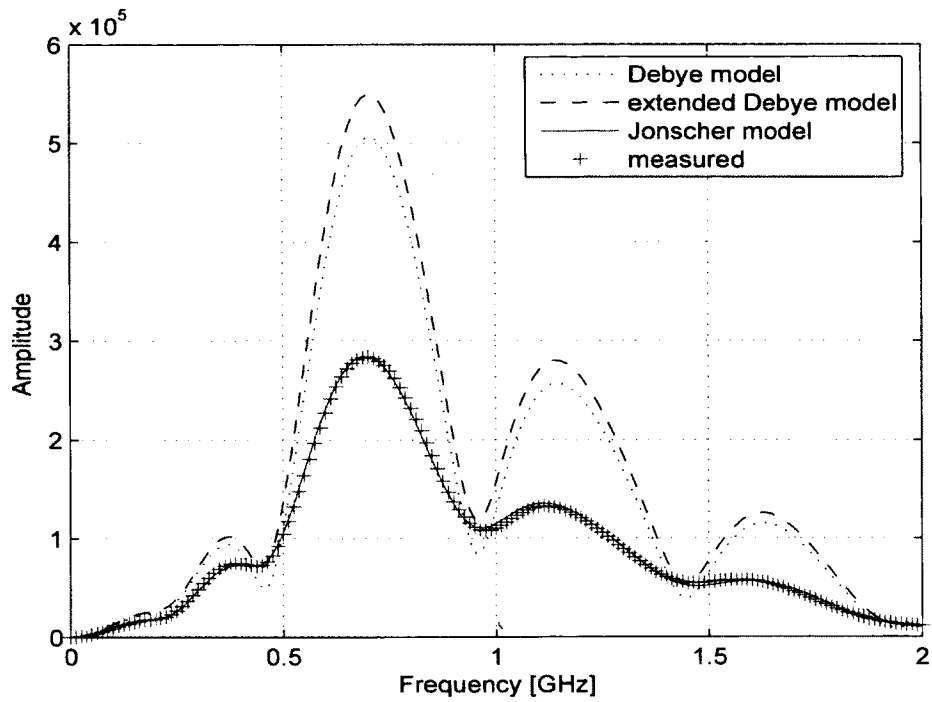


Figure 6.10 Modeled and measured frequency spectrums for MC=6.2%

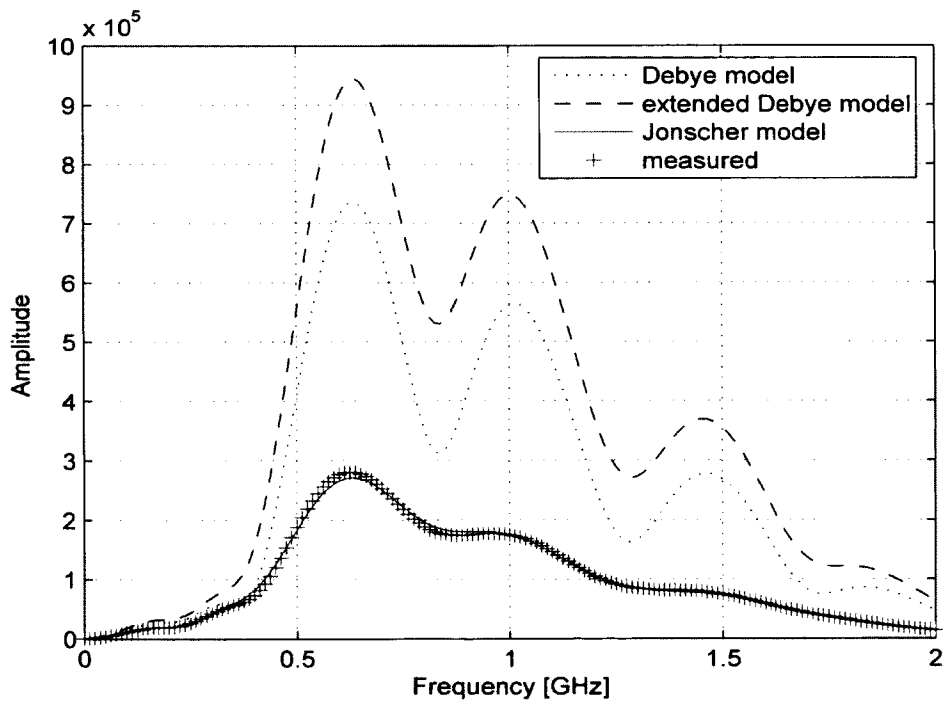


Figure 6.11 Modeled and measured frequency spectrums for MC=12.0%

discrepancy is at the peaks (highest amplitude value) and troughs (lowest amplitude value). This difference is more significant for concrete with higher moisture content.

Figures 6.9 - 6.11 shows the relation between the spectral content of the signal reflected on the slabs and the MC of the concrete. It can be observed that the reflected signal has a periodicity depending on the frequency. Minima and maxima correspond respectively to the destructive and constructive interference between the first reflection and secondary reflections. Minima and maxima of the amplitude of the reflected signal is very pronounced for concrete slabs with low dielectric loss as MC = 0.2% (the minimum tend to zero). However, these extremes are faintly visible for concrete slabs at high dielectric losses as MC = 12%.

On the other hand, the centre frequency lies approximately between 0.62 GHz (MC=12.0%, saturated concrete) and 0.8 GHz (MC=0.2%, dry concrete). This behavior can be explained by the electromagnetic attenuation of concrete due to the presence of MC. In concrete, high frequencies are generally more attenuated than low frequencies and the importance of this phenomenon is amplified by the presence of water. This dispersion related to the MC has been observed by some authors who carried out permittivity measurements on concrete samples using coaxial transmission lines [70, 71] or an open-ended coaxial probe [138].

## 6.4 Summary and outlook

Real part ( $\epsilon'_r$ ) and imaginary part ( $\epsilon''_r$ ) of the complex relative permittivity versus frequency for different moisture contents are presented. The experimental data were fitted to the Jonscher model only. In fact, results obtained with the Debye models were unsatisfactory. Mainly, the Debye model did not take in account the energy loss due to concrete electrical conductivity; therefore it is not appropriate for concrete. Compared to the latter the Debye model extended gives better results. The Jonscher model is easy to use in the frequency domain and the variation of the complex dielectric permittivity of the concrete can be described by three parameters only. Two different case in civil engineering field were studied, electromagnetic compatibility and non destructive testing, where a Jonscher model was compared to Debye models to describe the permittivity of concrete, this leads to the conclusion that the Jonscher model is an efficacy feasible tool to use for modeling the concrete. The two cases discussed illustrate the use of modeling to assist in the understanding and interpretation of physical phenomena. In the first case we see that the shielding effectiveness of concrete walls is dependent on their MC. In the second case we used models to obtain permittivity versus frequency, which was then used in the GPR frequency range to obtain the radar wave reflected from concrete slab. Jonscher model has been used with



much success compared to the Debye models. Based on the results, the frequency analysis of the reflected signal of a radar wave on a concrete slab shows that it varies according to frequency and value of MC. Increase of MC shifts the amplitude spectrum to lower frequencies. Although the reason of the frequency shift is not well defined, the result presented here leads to the conclusion that the analysis of the variations in the shape of radar signals should provide interesting information for the characterization of concrete. So, this modeling of the expected air-coupled GPR could be utilized to advance the capability of data analysis and provide better quantitative results. In this study we considered concrete as a homogeneous material and does not take into account the size of heterogeneities composing the concrete. But this assumption may not be true for all types of concretes, particularly those where the aggregate size is larger than the electric wavelength. Moreover, the Jonscher model could be extended to include more layers and could be used to model the reflected signal by the defects in concrete (honeycombing for example). A wider margin of frequency from 100MHz to 6GHz may also be considered. A number of common problems can be added to the model of subsurface ; concrete roadway overlying a sand/aggregate substrate ; an air-filled void ; a void filled with muddy water ; a laterally extensive zone of fractured and a region where the thickness of the concrete roadway has been reduced to model the effect of poor or negligent construction. But it must be validated for such cases. The model could be also implemented into a numerical simulator and compared with the classical transmission-line approach in electromagnetic compatibility (for shielding effectiveness calculations) and non destructive testing (for to model transmission and reception in a vertical radar profile configuration).

# CHAPITRE 7

## Mesure d'épaisseur des dalles de béton

L'étude présentée ici est menée en confrontant la réponse fréquentielle analytique du géoradar sur une dalle de béton basée sur une permittivité diélectrique effective donnée par le modèle de Jonscher et la réponse fréquentielle synthétique basée sur une permittivité diélectrique effective mesurée en laboratoire. Cette étude prend en considération différents teneurs en eau et différentes épaisseurs de la dalle de béton. Les résultats sont concluants. Ensuite, nous mettons à profit les développements présentés ici et aux deux articles précédents dans le cadre de la prédiction de l'onde radar enregistrée sur une dalle de béton pour décrire une application particulière qui est la mesure de l'épaisseur de dalles de béton. Inspirée de la technique, cette méthode donne des résultats très satisfaisants dans le domaine fréquentiel.

### Avant-propos

#### Auteurs et affiliation:

T. Bourdi, étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie civil.

F. Boone, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie électrique et de génie informatique.

J. E. Rhazi, professeur associé, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie civil.

G. Ballivy, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie civil.

**Date d'acceptation:** 4 janvier 2013

**État de l'acceptation:** version finale publiée

**Revue:** Progress In Electromagnetics Research M (PIERM)

**Référence:** [139]

**Titre français:** Utilisation du modèle de Jonscher pour la détermination de l'épaisseur de plaques de béton en utilisant un radar.

**Contribution au document:**

Dans notre précédente contribution, nous avons montré qu'il était possible de prédire l'onde géoradar réfléchi sur une dalle de béton en utilisant le modèle de Jonscher à trois paramètres. Cet article explique comment nous pouvons utiliser ces résultats pour estimer l'épaisseur d'une dalle de béton. L'étude est basée sur le principe la méthode Impact-écho dans le domaine fréquentiel.

**Résumé en français:**

La mesure des épaisseurs des dalles de béton est l'une des applications commerciales les plus importantes de la technique de géoradar. Cet article décrit une procédure d'estimation de l'épaisseur d'une dalle de béton sur la bande de fréquence du géoradar (100 MHz-2 GHz). Elle est inspirée de la méthode Impact-écho. L'étude est basée sur la prévision du spectre de fréquence du signal réfléchi par une dalle de béton en utilisant le modèle de Jonscher. La procédure est développée et des exemples de résultats sont présentés.

**Note:** À la suite des corrections demandées par les membres du jury, le contenu de cet article peut différer de celui qui a été publié.

## **Use of Jonscher Model for Estimating the Thickness of a Concrete Slab by Technical GPR**

### **Abstract**

The measuring thickness of concrete is one of important commercial applications of ground-penetrating radar (GPR) technique. This paper describes a procedure for estimating the thickness of concrete slab for different moisture contents (MCs) in frequency domain, as in Impulse-Response (IR) Method, over the radar frequency band (100 MHz-2 GHz). The method is based on predicting the reflected frequency spectrum through a concrete slab using Jonscher model. The procedure is explained and examples of results are presented.

### **7.1 Introduction**

In civil engineering, pavement layer thickness is an important factor determining the quality and durability of pavements, since deficiencies in thickness reduce the life of the pavement. It is then necessary to have an accurate and reliable method for making the thickness mea-

surement. Cores extracted from pavements determine pavement thickness accurately, but they are time consuming, they damage the pavement and they represent a very limited sample of the actual pavement. Therefore, GPR is a thickness measuring method which is quick, non destructive and which can generate a representative population of pavement thickness data points. GPR is based on the propagation and reflection of high frequency (100 MHz-2GHz) electromagnetic waves. The electromagnetic waves behaviour is characterised by the dielectric permittivity properties of the medium and conductivity. Modeling of these parameters can predict waves that can be captured by the GPR [83]. Also, the modeling of the expected GPR signal is a powerful tool to better understand the measured signals.

In this paper we want to extend the basic knowledge about GPR when used as an assessment tool for concrete structures. This application in civil engineering illustrates the modeling of the radar wave reflected on a concrete slab for different MCs and its use for measuring the thickness of concrete slabs.

## **7.2 GPR**

### **7.2.1 The incident frequency spectrum of GPR**

In practice, for real radar measurements the initial pulse from GPR antenna is either not fully known or is very susceptible to the medium-antenna coupling conditions.

For this study, because the incident pulse is necessary information for any modelling, a GPR system, with an air-coupled antenna, was chosen [137]. The system is composed of a control unit, a transceiver box, and a pair of air-coupled antennas. The antennas are TEM horns with a manufacturer reported centre frequency of 1 GHz. Because the air-coupled antennas were usually placed at a distance of 475mm from the surface, polystyrene plastic pieces with a total thickness of 475mm were placed on top of the slab surface. The antennas were then placed on top of the polystyrene plastic pieces as shown in figure 7.1.

The incident frequency spectrum is calculated from the data collected over a copper plate placed on the pavement surface. A fast Fourier transform (FFT) algorithm is used on the time-domain signal to achieve the input frequency spectrum  $F_i$  [137]. The incident frequency spectrum is shown in figure 7.2. Using the 3 dB criteria, a bandwidth of 0.5 GHz is found (from 0.5 to 1 GHz). The centre frequency of the nominal 1 GHz antenna has dropped to 666 MHz.

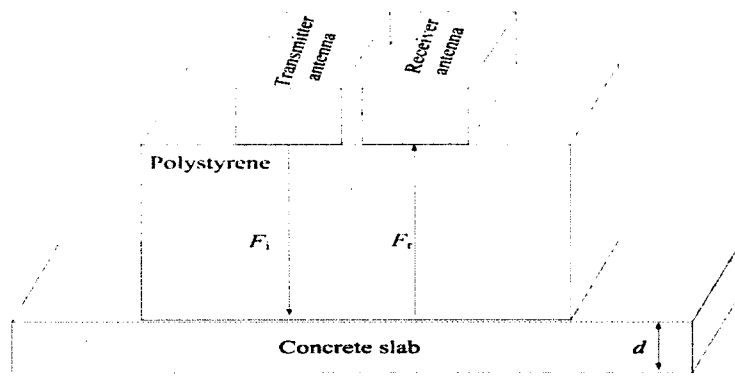
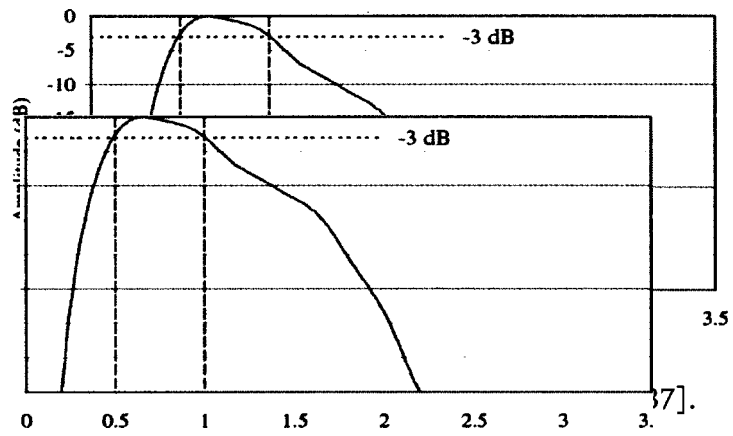


Figure 7.1 Air-coupled data collection from concrete slabs.



### 7.2.2 Frequency spectrum of reflected wave

The theory of propagation of electromagnetic waves is complicated. The following presentation is simplified based on assumptions suitable for civil engineering applications. More detailed treatments are available [115, 140]. A model was developed by [83] to predict the radar signal over a concrete slab. The predicted frequency spectrum  $F_r$  was obtained by using an equation (7.1) with only one unknown,  $\varepsilon_r$ .

$$F_r = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_r}}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} - \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_r}}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \left( 1 - \left( \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_r}}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \right)^2 \right) \left( e^{-j \frac{\omega}{c} d \sqrt{\varepsilon_r}} \right)^2 F_i \quad (7.1)$$

where  $\varepsilon_r$  real part of the complex relative permittivity of concrete ;  $\omega$  angular frequency ;  $d$ (m) concrete slabs thickness ; and  $c$  speed of light.

## 7.3 Modeling of the effective dielectric constant of the concrete

The effective permittivity  $\varepsilon_e(\omega)$  of concrete slab was modeled using the Jonscher model [106], which is a simple formulation law equation (7.2) :

$$\varepsilon_e(\omega) = \varepsilon_0 \chi_r \left( \frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[ 1 - i \cot \left( \frac{n\pi}{2} \right) \right] + \varepsilon_\infty \quad (7.2)$$

where  $\varepsilon_0 = 8.854 \ 187 \ 8176 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$  (or  $\text{C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ) is the free-space permittivity.  $\omega_r$  is a reference frequency, arbitrarily chosen.  $n$  is an empirical parameter without dimension that characterizes the change in amplitude of permittivity as a function of frequency, this parameter varies between 0 for materials with high dielectric loss and 1 for materials without dielectric losses ; and  $\chi_r$  is the real part of the susceptibility to the frequency reference.

The three parameters  $n$ ,  $\chi_r$  and  $\varepsilon_\infty$  in the Jonscher model of concrete were obtained by simple expressions without using a special algorithm for calculating [106]. In this section, these parameters are calculated from the experimental results published in [70] and [69] in the respective frequency ranges 10 MHz-1 GHz and 1 MHz-2 GHz, respectively. The input data ( $n$ ,  $\chi_r$ ,  $\varepsilon_\infty$ ) relative to the modeling for different MCs are given in the table (1).

Tableau 7.1 Fitted parameters for concrete samples.

MC (%)	Reference	Parameters for Jonscher's model [106]		
		$n$	$\chi_r$	$\epsilon_\infty/\epsilon_0$
12	[70]	0.62	7.49	4.39
9.3	[69]	0.54	4.77	5.75
6.2	[69]	0.60	2.99	4.94
5.5	[70]	0.74	3.87	3.75
2.8	[70]	0.74	1.49	4.45
0.2	[70]	0.80	0.60	4.11

## 7.4 Impulse-Response method principle

A blow on the shaft head by a small sledgehammer equipped with a load cell generates a stress wave with a wide frequency content, which can vary from 0 to 1000 Hz for soft rubber-tipped hammers to 0 to 3000 Hz for metal-tipped hammers. The load cell measures the force input, and the vertical response of the shaft head is monitored by a geophone. The force and velocity time-base signals are recorded by a digital acquisition device, and then processed by computer using the FFT algorithm to convert the data to the frequency domain. Velocity is then divided by force to provide the unit response, or transfer function, which is displayed as a graph of shaft mobility versus frequency [141, 142]. An example of a mobility plot for a pile shaft is given in Figure 3.

When a perfect, laterally unrestrained (free) pile of length  $L$  resting on the surface of an elastic foundation is excited by a continuous sinusoidal axial force with peak value  $F_0$ , the pile head achieves a maximum velocity  $V_0$ . As the frequency of the applied force is varied, the

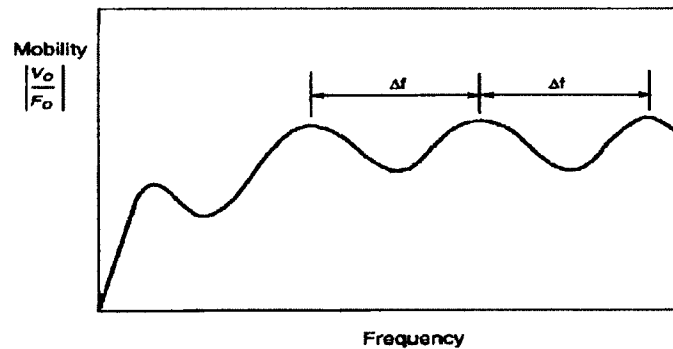


Figure 7.3 Theoretical mobility plot for impulse-response test of perfect pile in homogeneous soil.

amplitude of the pile head velocity has peak values at equally spaced frequencies (resonant frequencies). The frequency interval,  $\Delta f$ , between the peaks is given by equation (7.3).

$$\Delta f = \frac{C_b}{2L} \quad (7.3)$$

where  $C_b$  is the speed of stress-wave propagation along the pile axis. This method gives very good results as regards, for example, the thickness measurement of concrete elements (such as a slab resting on the ground). However, its ability to detect discontinuities in thin layers of pavement were not unanimously accepted. In fact, the test is relatively simple and requires access to only one side of the structure. However, the frequencies generated in practice hardly exceed 3 kHz, which leads to a low resolution. Moreover, the applications of this method to large structures are not economically viable because the tests are occasional and sometimes laborious.

## 7.5 Estimated thickness of concrete

Before exploring the measurement of the thickness of the concrete slab in the frequency domain, we study the effect of the change in MC and thickness of the slabs on the frequency spectrum of the reflected signal on a concrete slab.

### 7.5.1 Effect of the change in MC and thickness

The synthesis of air-coupled GPR waveforms for concrete slabs with different MCs was performed for MC =0.2% and 12%. figure 7.4 show these different waveforms for different thicknesses of the slab concrete (5 cm to 30 cm).

For small thicknesses of slabs (eg 5cm at MC =0.2%), the amplitude of the reflected signal varies linearly on frequency intervals ([0.3-0.7] GHz with a positive slope and [0.7-1.4] GHz with a negative slope). For larger thicknesses of slabs, the reflected signal has a periodicity depending on the frequency. Minima and maxima correspond respectively to the destructive and constructive interference between the first reflection and secondary reflections. Minima and maxima of the amplitude of the reflected signal is very pronounced for concrete slabs with low dielectric loss as MC=0.2% (the minimum tend to zero). However, these extremes are faintly visible for concrete slabs at high dielectric losses as MC=12%.



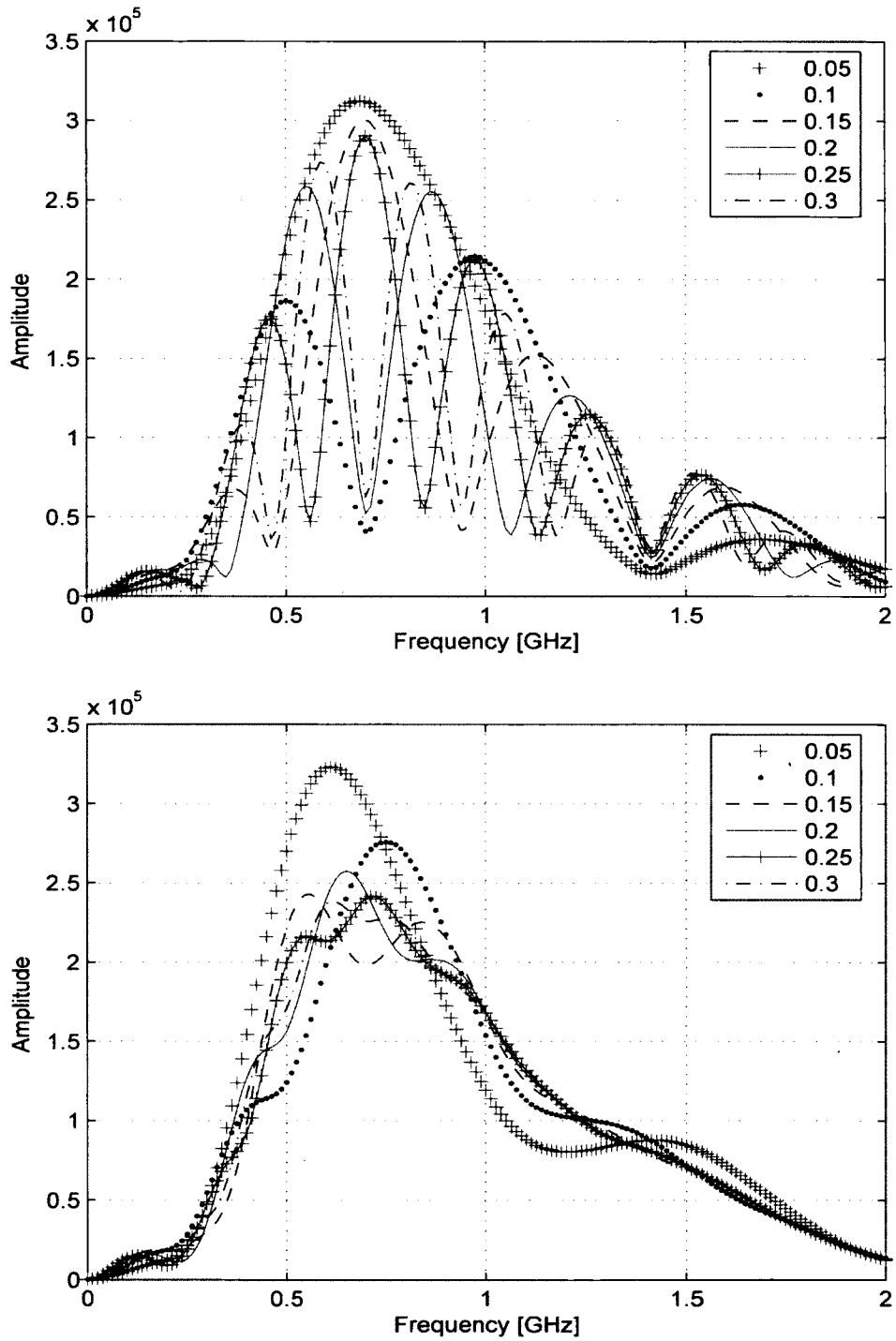


Figure 7.4 Frequency spectra of the reflected signal on a concrete slab for MC=0.2% (up) and MC=12% (down).

## 7.5.2 Measuring of the thickness of a slab of concrete

The variation of permittivity with frequency in concrete implies that there will be some variation in the velocity of propagation with frequency. By cons, in most practical trial situations the relative permittivity will be unknown. The velocity of propagation must be measured in situ, estimated by means of direct measurement of the depth to a physical interface or target (i.e. by trial holing), or by calculation by means of multiple measurements. In our case, Jonscher model provides the variation of epsilon throughout the range of radar frequencies. However, for calculating the velocity of propagation of the electromagnetic wave in the concrete, an average complex value of permittivity provided accurate predictions of the air-coupled GPR system [137].

Using concrete slab with MC=0.2%, the average dielectric constant for concrete, over the frequency band of the radar system, would be 4.58, with a maximum of 4.95 and a minimum of 4.49. The wave velocity can be calculated from equation (7.4).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (7.4)$$

$v$  is therefore equal to : 0.14 m/ns, which is a reasonable value for dry concrete. On the other hand, when the surveyed slab concrete is composed of relatively thick layer, the GPR reflected pulses would have more possibility to give the best results. This condition makes detecting the layer interface reflection easier than in the case of thin layers. A pavement layer could be considered as thin or thick depending on whether its thickness is smaller or larger than the GPR depth resolution  $\Delta d$ , which is given in the following equation (7.5) [143]

$$\Delta d = \frac{cT}{2\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (7.5)$$

where  $T$  is the incident pulse width and  $\epsilon_r'$  is the dielectric constant of the considered layer. In our case, the incident pulse width is approximately 1 ns.

In table 7.2, the values for velocity of propagation and resolution obtained for different MCs are summarized.

The thickness,  $d$ , of the concrete can be derived as in IR method equation (7.3), from the following equation equation (7.6) :

Tableau 7.2 Velocity of propagation and resolution for concrete samples.

MC(%)	Average dielectric constant	Velocity (m/ns)	Resolution (m)
0.2	4.5838	0.1401227	0.07006134
5.5	6.5973	0.1167987	0.05839937
6.2	6.5805	0.1169477	0.05847387
12	9.0847	0.0995327	0.04976637

$$d = \frac{v}{2f} \quad (7.6)$$

where  $v$  is the wave velocity in concrete and  $f$ , is equal to the fundamental frequency of the reflected signal spectrum .

To illustrate how the method works, reflected signal spectra obtained from concrete is shown in figure 7.5. At frequency values corresponding to resonant frequencies of the wave in structure of concrete, amplitude values are maximums. The series of peaks corresponds to the fundamental ; the difference between any two adjacent,  $\Delta f$ , is equal to the fundamental frequency.

The fundamental frequency of 234.375MHz was calculated by determining the average frequency difference between four successive peaks :

$$\Delta f = \frac{937.5}{4} \text{ MHz} = 234.375 \text{ MHz} \quad (7.7)$$

The thickness,  $d$ , of the concrete can be calculated using equation (7.6) and equation (7.7) :  $d = 0.2992m$ . The thickness of concrete was calculated to be 29.92cm. The known thickness of concrete was 30cm (as seen in Table 7.3).

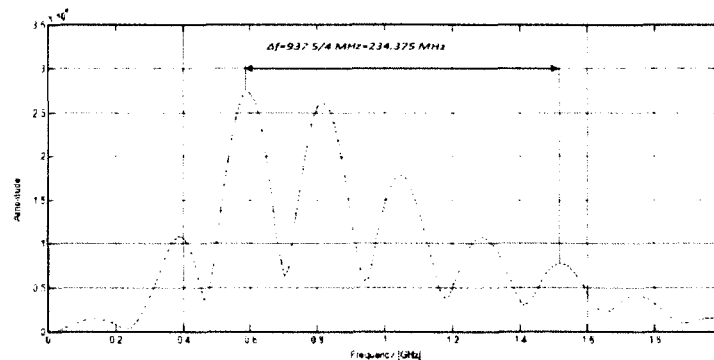


Figure 7.5 Amplitude plot for  $d=0.3$  m and 0.2%.

Note the minima and maxima which correspond to destructive interferences (where  $f = v/2d = 230, 460, 690$ ) and constructive interferences (where  $f = v/4d = 115, 345, 575, 805$ ).

This method gives very good results for thin layers concrete slab [0.1m – 0.3m], especially when MC is low [0.2%-6.2%]. But, this experiment shows that it is sensibly influenced by the high MC [12%] and very thin layer slab of concrete [0.05m].

The root-mean squared error (RMSE) is then computed for all slabs, and the calculation of the RMSE between the real and estimated thickness are summarized in table 7.4.

Tableau 7.4 RMSE between the real and estimated thickness for different MCs.

	MC=0.2%	MC=5.5%	MC=6.2%	MC=12%
RMSE	0.0155	0.0064	0.0085	0.0314

The maximum RMSE between the real and estimated thickness for different MCs obtained with the modeling procedure was 0.0314. For all slabs, the estimated thicknesses were very close to the real thicknesses.

## 7.6 Conclusion

The proposed method aims to show the interest of the GPR method to measure the thickness of a concrete slab based on processing signal frequency similar to that used in IR method. In particular, it was shown that when the concrete slab is composed of thick layer (relative to the incident GPR pulse width), this technique yields best thickness results. This was possible by using the Jonscher model to reproduce the dispersion of the dielectric permittivity of concrete, which was then used in the GPR frequency range to obtain the radar wave

Tableau 7.3 Estimated thickness for concrete samples with different MCs.

Know thickness (m)	MC=0.2%	MC=5.5%	MC=6.2%	MC=12%
	Estimated thickness (m)			
0.05	0.0700	0.0649	0.0668	0.0622
0.1	0.1231	0.0954	0.0995	0.1327
0.15	0.1716	0.1483	0.1508	0.1731
0.2	0.2050	0.2001	0.2034	0.1990
0.25	0.2548	0.2503	0.2487	0.3063
0.3	0.2989	0.3014	0.3119	0.3318

reflected from concrete slab. These results indicate that the frequency-domain approach, which is the less common approach used with GPR method, is a reliable means of estimating the slab layer thickness of concrete. The method could be extended to include more layers, but it must be validated for such cases.

# CHAPITRE 8

## Conclusion

### 8.1 Sommaire

L'interprétation quantitative des données Géoradar s'appuie en grande partie sur la connaissance précise des propriétés électriques des matériaux investigués. Les « ondes Géoradar » étant de larges bandes, il est important de connaître les variations éventuelles de ces propriétés avec la fréquence. Dans le cas des matériaux composites tel que le béton, ceci s'avère difficile car les constituants du béton, leurs proportions et propriétés doivent également être pris en considération.

Trois principaux modèles empiriques décrivant les variations de la permittivité en fonction de la fréquence sont décrits dans la littérature : les modèles de Debye, de Cole-Cole et de Davidson-Cole. Toutefois, ces différents modèles ne s'appliquent correctement qu'aux matériaux où la polarisation de type dipolaire est dominante. C'est notamment pour s'affranchir de cette limitation que le modèle de Jonscher a été développé et qu'il s'est avéré plus approprié pour la modélisation des propriétés des sols et des roches. Le travail présenté dans cette thèse vise à étendre l'utilisation de ce modèle au cas du béton.

Notre étude s'est articulée autour de trois volets. Dans un premier temps, nous avons adapté le modèle de Jonscher au béton et nous l'avons appliqué avec succès à des résultats expérimentaux relatifs à des bétons de différentes propriétés et teneurs en eau. Ensuite, nous avons démontré que sa précision, en ce qui concerne la variation de la permittivité en fonction de la fréquence, est supérieure à celle de Debye et Debye-étendu. Enfin, nous avons appliqué le modèle de Jonscher à une problématique particulière qui est la mesure de l'épaisseur de dalles de béton.

### 8.2 Contributions

Notre objectif était de développer et de valider un modèle permettant de montrer l'aspect dispersif du béton et ceci pour différents types de béton sur la bande de fréquence géoradar (100 MHz–2 GHz). Nos développements se sont d'abord portés sur la compréhension du comportement électromagnétique du béton dans la bande des fréquences radars. L'analyse

de nombreuses données, issues de mesures en laboratoire de la permittivité diélectrique effective du béton, a permis de mettre en évidence la dispersion des signaux radars. Un modèle, n'utilisant qu'un nombre réduit de paramètres, est proposé pour décrire ce comportement (article 1). Il aurait été intéressant d'utiliser des modèles permettant d'accéder à des valeurs en rapport avec des phénomènes physiques identifiés (fréquences de relaxation, conductivité à basse fréquence, etc.), et ce, malgré un nombre supérieur de paramètres. En fait, dans la bande des fréquences radars, ces modèles ne présentent ni la robustesse, ni l'unicité nécessaires à ce type de détermination (§ 4.3). Un modèle dérivé de la « réponse diélectrique universelle de Jonscher » a été proposé. Il permet de rendre compte avec exactitude du comportement de la permittivité diélectrique effective du béton avec un nombre réduit de paramètres et de manière robuste que les autres modèles couramment utilisés dans la littérature (Debye et Debye-étendu). L'emploi d'un tel modèle a été justifié. L'étude présentée dans ce mémoire n'est qu'une première étape dans la compréhension des phénomènes de réflexion électromagnétique et dans l'exploitation de la forme des signaux réfléchis. Elle a néanmoins permis de valider l'approche théorique, menée en posant les approximations d'onde plane et d'interface plane. On notera que dans l'hypothèse onde plane, la nature et la position de l'émetteur et du récepteur n'ont pas été prises en compte. L'hypothèse d'interface plane implique qu'on n'a pas tenu compte de phénomènes causés par les irrégularités des réflecteurs (diffraction, diffusion). Cette hypothèse peut être raisonnablement admise pour les données présentées dans ce mémoire. L'étude de la déformation des signaux électromagnétiques engendrée par les phénomènes de réflexion a été abordée avec le support de données radars synthétiques, enregistrées sur des dalles de béton. Celles-ci représentent la réflexion des ondes générées par un GPR d'antenne non couplée de 1 GHz de fréquence centrale (article 2). Le calcul a été basé sur la modélisation fréquentielle de la permittivité du béton par le modèle de Jonscher choisi (article 1). Il a été possible de valider les modélisations et de mettre en évidence les modifications du contenu fréquentiel des signaux réfléchis en fonction des caractéristiques électromagnétiques du béton (article 2). Sur les données synthétiques, nous avons aussi mis en évidence que la forme des signaux réfléchis était effectivement dépendante des épaisseurs des dalles de béton correspondantes (article 3). Ces données sont qualitativement en accord avec la modélisation. Enfin, nous avons présenté une procédure de traitement des signaux radars inspirée de la méthode acoustique impact-écho permettant de mesurer des épaisseurs des dalles de béton en fonction de la fréquence (article 3).

En résumé, le présent projet de recherche qui consiste à développer et valider un modèle permettant de montrer l'aspect dispersif du béton sur la bande de fréquence géoradar, est original sur plusieurs aspects. D'abord, c'est la première fois, à notre connaissance, que le

modèle de Jonscher a été utilisé en génie civil pour montrer la variation de la permittivité diélectrique effective du béton en fonction de la fréquence (article 1). Il est efficace et demande la détermination facile de trois paramètres, contrairement aux modèles déjà utilisés dans ce domaine (Debye et Debye-étendu) qui sont moins robustes et qui nécessitent plus de paramètres à déterminer par des méthodes de calculs numériques spécifiques. L'utilisation de ce modèle, a permis d'avoir une bonne aide à la prédiction de l'efficacité de blindage du béton et à l'interprétation des ondes de la technique GPR appliquée aux dalles de béton (article 2). Par ailleurs, ce modèle nous a permis de présenter l'équivalent électromagnétique de la technique acoustique impact-écho et a permis la mesure des épaisseurs des dalles de béton dans le domaine fréquentiel (article 3).

L'apport scientifique de ces travaux au domaine génie civil est notable. Ils ont d'ailleurs fait l'objet de trois publications dans des revues avec comité de lecture, et sont cités en exemple par d'autres chercheurs.

### **8.3 Travaux futurs**

Bien que les applications du modèle de Jonscher en génie civil menées ici sur les données géoradars soient encore préliminaires, les possibilités d'une telle méthode sont intéressantes et méritent d'être développées. Elle peut être un sujet d'étude pour permettre la connaissance a priori par simulation de la réponse d'une discontinuité (fracture ou autre) située à une profondeur quelconque au sein d'une dalle de béton. Cette étude pourra être s'attacher à caractériser la signature géoradar de chaque objet en termes de géométrie et nature en termes de vitesse, atténuation et dispersion des ondes électromagnétiques. Il pourrait être envisagé d'analyser la forme des ondes réfléchies (phase et amplitude du contenu fréquentiel) afin d'obtenir plus d'informations sur les réflecteurs et ainsi aider à la caractérisation des discontinuités du milieu (et non plus seulement leur localisation). L'analyse des caractéristiques des ondes réfléchies a déjà été abordée en sismique, notamment par le biais des analyses AVO (Amplitude Versus Offset) [145]. [146] ont proposé une méthodologie complète pour inverser les ondes réfléchies afin de détecter la présence d'hydrocarbures dans des couches sédimentaires, en utilisant notamment les variations de l'amplitude et le déphasage du contenu fréquentiel entre le signal incident et le signal réfléchi. Comme en géophysique, le modèle de Jonscher peut jouer un rôle très important dans un processus d'inversion des signaux géoradars réfléchis sur des dalles de béton.

Ces aspects constituent la prochaine étape à développer pour continuer d'améliorer l'interprétation des données radars. En effet, l'interprétation combinée des signaux radars obser-



vés et de leur simulation sous forme synthétique peut mettre en évidence chaque signature radar qu'elle soit de type réflexion ou diffraction. La suite des développements devrait être orientée sur la validation de ces méthodes sur des données réelles, issues de campagnes de caractérisation de dalles de béton.

# LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Mallinson, P. (1997). Surface penetrating radar as an ndt tool. *In Proceedings 36th Annual British Conference on NDT*, Cheltenham, UK, p. 874-877.
- [2] Saarenketo, T. et Scullion, T. (2000). Road Evaluation with Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics*, volume 43, p. 119-138.
- [3] Rhazi, J., Laurens, S., J.-P. Balayssac, J.-P. et Ballivy, G. (2003). Non destructive health evaluation of concrete bridge decks by GPR and half potential techniques. *Proceedings of International Symposium on Non-destructive testing in civil engineering*, Berlin, Germany, Septembre 16-19.
- [4] Maser, K.R. et Roddis, W.M.K. (1990). Principles of thermography and radar for bridge deck assessment. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, volume 116, numéro 5, p. 583-601.
- [5] Huston, D., Hu, J.Q., Maser, K., Weedon, W., et Adam, C. (2000). GIMA ground penetrating radar system for monitoring concrete bridge decks. *Journal of Applied Geophysics*, volume 43, numéro 2, p. 139-146.
- [6] Park, S. K. et Uomoto, T. (1997). Radar image Processing for Detection of Shape of Voids and Location of Reinforcing Bars on or under reinforced concrete. *International Conference Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE '97) Proc*, volume 1 et 2, Liverpool, UK.
- [7] Cantor, T. R. (1984). Review of penetrating radar as applied to non-destructive evaluation of concrete. Dans Malhotra, V.M. *In situ/Nondestructive testing of concrete*, volume 82, édition ACI Special Publication. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, p. 581-601
- [8] Ministère des Transports du Québec, Conférence Bernard Pilon, International Concrete Repair Institute, *Spring Convention*, QC, Canada.
- [9] Desgagné, G. (2004). Les défis qui se posent aux propriétaires d'ouvrages en matière de durabilité des structures. Ministère des Transports du Québec, Direction des infrastructures. *Recueil d'articles du Colloque CRIB 2004*, QC, Canada. p. 1-49.
- [10] Richardson, B. (2002). *Defects and Deterioration in Buildings : A Practical Guide to the Science and Technology of Material Failure*, 2e édition. Spon press, NY, USA, 224 p.
- [11] Büyüköztürk, O. (1998). Imaging of concrete structures, *NDT and E International*, volume 31, numéro 4, p. 233-243.
- [12] Raharinaivo, A. , Arliguie, G. , Chaussadent, T., Grimaldi, G., Pollet, V. et Tache, G. (1998). *La corrosion et la protection des aciers dans le béton*, 1ère édition, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Paris, France, 168 p.

- [13] Laurens, S. (2001). *Aptitude de la technique radar à la caractérisation du béton d'enrobage - Aide au diagnostic de la corrosion des armatures*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 422 p.
- [14] Ballivy, G. Reinhardt, H., and Breysse, D., (1997). Chapter 8 - Measured Transport in Cracked Concrete. Dans Reinhardt, H.E., *RILEM REPORT 16, Penetration and Permeability of Concrete : Barriers to organic and contaminating liquids*, Taylor and Francis, London, UK, p. 265-324
- [15] Lataste, J.F., Breysse, D., Sirieix, C., Frappa, M., et Bournazel, J.P. (2003). Fissuration des ouvrages en béton armé : auscultation par mesure de résistivité électrique. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées (spécial END)*, volume 239, p. 79–91.
- [16] Bursanescu, L. Évaluation par géoradar et thermographie infrarouge d'un viaduc. Étude de cas. *Séminaire CERCA-CERIU*.
- [17] Rivard, P. (2002) *Contribution à l'étude de l'expansion résiduelle des bétons atteints de réactivité alcalis-silice*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 249 p.
- [18] Bérubé, M. A., Smaoui, N., Bissonnette, B. et Fournier B. (2005). Outil d'évaluation et de gestion des ouvrages d'art affectés de réactions alcalis-silice (RAS). it ministère des Transports du Québec. Québec, Canada, 162 p.
- [19] Berard, J. et Roux, R. (1986). La viabilité des bétons du Québec : le rôle des granulats. *Revue canadienne de génie civil*, volume 13, numéro 1, p.12-24.
- [20] Olafsson, H. (1987). The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars, *Concrete Alkali-Aggregate Reaction*, Noyes Publications. Dans Proc. 7th Int. Conf. on AAR in Concrete, Ottawa, Canada, p. 461-465.
- [21] Rogers, C. et Worton, S. (1988). *Alkali Aggregate Reactions in Canada. A Bibliography*. Report EM-73. Ministry of Transportation. Engineering Materials office. Ontario, Canada, p. 26.
- [22] Ballivy, G., Khayat, K., Gravel, C. et Houle, D. (2000). Influence of reinforcement steel on the expansion of concrete affected by alkali-aggregate reaction *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Québec, Canada, p. 919-928.
- [23] Bérubé M. A., Durand, B., Vézina, D. et Fournier, B. (2000). Alkali-aggregate reactivity in Québec (Canada). *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 27, numéro 2 p.226–245.
- [24] Houle, D. (1998) *Rôle des armatures dans le développement de la réaction alcalis-granulats dans le béton*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 324 p.
- [25] Rivard, P. (1998) *Quantification de l'endommagement du béton atteint de réactions alcalis-silice par analyse d'images*. Maîtrise es science appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 158 p.

- [26] Gravel, C. (2001). *Contribution à l'étude des mécanismes des réactions alcalis-granulats*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 337 p.
- [27] Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Suède. CBI Research Report no. 4.82.
- [28] Marchand, J., Pigeon, M. (1996) *Résistance du béton à l'écaillage dû au gel en présence de sels fondants - Une revue des récents développements dans le domaine*, Conférence RILEM : Béton - Du matériau à la structure, Arles, France, p. 179-210.
- [29] Neville, A. (2000). *Propriétés des bétons*, traduit par les chercheurs du Centre de Recherche Inter-universitaire sur le Béton (CRIB). Eyrolles, Paris.
- [30] Mailvaganam, N.P et Litvan, G.G. (1997). Six règles pour construire des ouvrages en béton durables. *Solution constructive numéro 8*, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Canada
- [31] Mailvaganam, N.P et Mitchell, L. (2003). Réparations pour la remise en service des ouvrages en béton. *Solution constructive numéro 59*, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Canada
- [32] CNRC. (2000). Sur la couverture. Une solution simple et novatrice au problème du soulèvement des chaussées en hiver. *Innovation en construction*. Institut de recherche en construction. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Canada, volume 5, numéro 2.
- [33] Reymond, A. (1990). *Construire dans les régions froides : la durabilité des structures en béton*. ENPC, Paris, France.
- [34] Gagnon, F. (2004). *Enrobage de l'armature dans le béton projeté : Évaluation et effets*. Maîtrise és science appliquées, Université Laval, Québec, Canada, 178 p.
- [35] Binda, L. et Maierhofer, C. (2005). *Strategies for the assessment of historic masonry structures*. RILEM Paper, p.103-124
- [36] da Porto F, Valluzzi M.R., Modena C. (2003). *Use of sonic tomography for the diagnosis and the control of intervention in historic masonry buildings*. International Symposium Non-destructive testing in Civil Engineering NDT-CE, Berlin, Germany. (CD-ROM)
- [37] McCann, D. M. and Forde, M. C. (2001). Review of NDT Methods in the Assessment of Concrete and Masonry Structures. *NDT and E International*, volume 34, numéro 2, p. 233-243.
- [38] Valluzzi, M.R. (2007). *On the vulnerability of historical masonry structures : analysis and mitigation*. Materials and Structures, volume 40, p.723-743.
- [39] Sansalone, M.J. et Streett, W.B. (1998). The impact-echo method. *NDTnet*, volume 3, numéro 2
- [40] Meola, C. (2007). Infrared thermography of masonry structures. *Infrared Physics and Technology*, volume 49, numéro 3, p.228-233.

- [41] Astm (2007). *Standard test method for detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography*. Designation D4788-2003, American Society for Testing Material (ASTM) International, West Conshohocken, PA.
- [42] Carlomagno, G. M. et Meola, C. (2002). *Comparison between Thermographic Techniques for Frescoes NDT*. NDT and E International, volume 35, numéro 8, p.559–565.
- [43] Ballivy G., Rhazi J. (1993). Introduction œ Auscultation : problématique et devenir. *3e colloque sur la réfection des infrastructures de béton œ Auscultation et instrumentation des ouvrages en service*. Sherbrooke, Québec, Canada, p.3-30.
- [44] Mellett, J. S. (1995). Ground Penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology. *Journal of Applied Geophysics*, volume 33, p.157-166
- [45] Clemena, G. C. (1995). Short-Pulse Radar Methods , volume 28, chapter 13. Dans Malhotra, V. H. et Carino Ed, N. J. (2004). *Handbook of Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press, Boca Raton, Fla, USA, 2004. 384 p.
- [46] Carino 1995 Carino, N.J. (1992). Recent Developments in Nondestructive of Concrete. Dans V.M. Malhotra (1995). *Advances in Concrete Technology*. Ed., Energy, Mines and Resources, Ottawa, MSL volume 92, numéro 6(R), p. 281-328.
- [47] Côte, Ph., Abraham, O. et Dérobert, X. (1997). Contrôle non destructif appliqué aux monuments historiques. *In Cofrend congress on non destructive testing*, Nantes, France, p.1-6.
- [48] Maierhofer, Ch.(2001). Radar investigation of masonry structures. *NDT and E International*, volume 34, numéro 9, p. 139-147.
- [49] Flint, R. C., Jackson, P. D., et McCann, D. M. (1999). Geophysical imaging inside masonry structures. *NDT and E International*, volume 32, numéro 8, p.469–479.
- [50] Gallagher, G.P., Leiper,Q., Williamson, R., Clark, M.R. and Forde, M.C. (1999). The application of time domain ground penetrating radar to evaluate railway track ballast. *NDT and E International*, volume 32, numéro 8, p.463–468.
- [51] Rhim, H.C. (2001).Condition monitoring of deteriorating concrete dams using radar. *Cement and Concrete Research*, volume 31, numéro 3, p.363–373.
- [52] Fauchard, C. (2001). *Utilisation de radars très hautes fréquences : application à l'auscultation non destructive des chaussées*.Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 201p.
- [53] Bungey, J.H. (2004). Sub-surface radar testing of concrete : A review. *Construction and Building Materials*, volume 18, numéro 1, p.1–8.
- [54] Spagnolini, U. (1997). Permittivity measurements of multilayered media with monostatic pulse radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, volume 35, numéro 2, p. 454-463.

- [55] Liu, F. (2007). *Modélisation et expérimentation radar impulsionnel et à sauts de fréquence pour l'auscultation de milieux stratifiés du génie civil*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 178 p.
- [56] Lambot, S. (2004). Modeling of ground-penetrating radar for accurate characterization of subsurface electric properties. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, volume 42, numéro 11, p.2555- 2568.
- [57] Olhoeft, G. R. (1998). *Georadar : Acquisition, processing, modeling, and display of ground penetrating radar data*. GPR98, 7th International Conference On Ground Penetrating Radar. The University of Kansas, Lawrence,KS, USA. (CD-ROM)
- [58] Cheng, D. K. (1992). *Fundamentals of engineering electromagnetics*. Addison-Wesley, Reading, MA, 488p.
- [59] Kraus, J. et Carver, K.(1973). *Electromagnetics*. McGraw-Hill, NY,USA, 828p.
- [60] Hippel, A.R.V (1995). *Dielectrics and waves*. Artech House, Boston, USA. 284p.
- [61] Saintenoy, A. C. et Tarantola, A. (2001). Ground-penetrating radar : Analysis of point diffractors for modeling and inversion. *Geophysics*, volume 66, numéro 2, p.540–550.
- [62] Chelkowski, A.(1993). *Fizyka dielektrykow*. Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa, Pologne, 395 p.
- [63] Hilczer, B. (1992). *Elektrety i piezopolimery*. Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa, Pologne, 429 p.
- [64] Gueguen Y and Palciauskas V. (1994). *Introduction to the Physics of Rocks*. Princeton University Press. Princeton, New Jersey, USA, 294 p.
- [65] Hollender,F. (1999). *Interprétation des signaux géoradar propagés et réfléchis – développement d'une tomographie par bandes de fréquence*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 197 p.
- [66] Bano, M. (2004). Modelling of gpr waves for lossy media obeying a complex power law of frequency for dielectric permittivity. *Geophysical Prospecting*. volume 52, numéro 1, p.11–26.
- [67] B Giroux, Chouteau, M. et Laverdure, L. (2001). évaluation du facteur de qualité sismique au barrage de carillon (Québec). *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 28, numéro 3, p.496–508.
- [68] Kjartansson, E. (1979).Constant q-wave propagation and attenuation. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, volume 84(B9), p.4737–4748,
- [69] Shaari, A., Millard,S.G. et Bungey, J.H. (2004). Modelling the propagation of a radar signal through concrete as a low-pass filter. *NDT and E International*, volume 37, numéro 3, p.237–242.

- [70] Soutsos, M. N. Bungey, J. H. Millard, S. G. Shaw, M. R. et Patterson, A. (2001). *Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing*. NDT and E International, volume 34, numéro 6, p.419-425.
- [71] Robert, A.(1998). Dielectric permittivity of concrete between 50 mhz and 1 ghz and gpr measurements for building materials evaluation. *Journal of Applied Geophysics*, volume 40, numéro 1, p.89–94.
- [72] Adous, M. Quéffélec, P. et Laguerre, L. (2006). *Coaxial/cylindrical transition line for broadband permittivity measurement of civil engineering materials*. Measurement Science and Technology, volume 17, numéro 8, p.2241-2246.
- [73] Padaratz, I.J. (1996). *A numerical and experimental investigation of radar coupling and propagation through concrete*. Université de Edinbourg, écosse, Royaume-Uni, 219 p.
- [74] Debye, P.(1929). Polar molecules. *Journal of the Society of Chemical Industry*, volume 48, numéro 43, p.1036-1037.
- [75] Cole, K.S. et Cole, R.H. (1941). Dispersion and absorption in dielectrics i. alternating current characteristics. *The Journal of chemical physics*, volume 9, numéro 4, p.341–351.
- [76] Davidson, D.W. et Cole, R.H. (1951). Dielectric relaxation in glycerol, propylene glycol, and n-propanol. *The Journal of chemical physics*. volume 19, numéro 12, p.1484–1490.
- [77] Jonscher, A. K. (1977). *The 'universal' dielectric response*. Nature, volume 267, p.673-679.
- [78] Jonscher, A. K. (1983). *Dielectric relaxation in solids*. Chelsea Dielectrics Press, London, UK, 380p.
- [79] Hollender F and Tillard S. (1998). *Modelling ground-penetrating radar wave propagation and reflection with the Jonscher parametrization*. Geophysics, volume 63, numéro 6, p.1933-1942.
- [80] Jeannin, M. (2005). *étude des processus d'instabilités des versants rocheux par prospection géophysique - apport du radar géologique*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 241 p.
- [81] Gregoire, C., and F. Hollender, (2004). Discontinuity characterization by the inversion of the spectral content of ground-penetrating radar (GPR) reflections- Application of the Jonscher model. *Geophysics*, volume 69, p.1141-1424.
- [82] Sandrolini, L. Reggiani, U. et Ogunsola, A.(2007). Modelling the electrical properties of concrete for shielding effectiveness prediction. *Journal of Physics D : Applied Physics*, volume 40, numéro 17, p.5366–5372.
- [83] Bourdi, T., Rhazi, J.E., Boone, F. et Ballivy, G.(2008). Application of jonscher model for the characterization of the dielectric permittivity of concrete. *Journal of Physics D : Applied Physics*, volume 4, numéro 20, p. x-y.

- [84] Tabbagh A. (1985). *The response of a three dimensional magnetic and conductive body in shallow depth electromagnetic prospecting*. The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, volume 81, p.215-230.
- [85] Xiong, Z. et Tripp, A. C. (1997). *Ground penetrating radar responses of dispersive models*. Geophysics, volume 62, p.1127-1131.
- [86] Bitri, A. et Grandjean, G. (1998). *Frequency-wavenumber modelling and migration of 2D GPR data in moderately heterogeneous dispersive media*. Geophysical prospecting, volume 46, numéro 3, p.287-301.
- [87] Cai, J. et McMechan, G. A. (1995). *Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles*. Geophysics, volume 60, numéro 1, p.87-96.
- [88] Carcione, J. M. (1996). *Ground-penetrating radar : Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media*. Geophysics, volume 61, numéro 6, p.1664-1677.
- [89] Carcione, J. M., Lenzi, G. et Valle, S. (1999). *GPR modelling by the Fourier method, improvement of the algorithm*. Geophysical Prospecting, volume 47, numéro 6, p.1015-1029.
- [90] Liu, Q. H. and Fan, G. X. (1999). *Simulations of GPR in dispersive media using a frequency dependant PSTD algorithm*. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 37, numéro 5, p.2317-2324.
- [91] Zeng, X. McMechan, G. A., Cai, J. et Chen, H. W. (1995). *Comparison of ray and Fourier methods for modelling monostatic ground penetrating radar profiles*. Geophysics, volume 60, p.1727-1734.
- [92] Bergmann, T. Robertsson, J.O.A. et Hollinger, K. (1998). *Finite-difference modelling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media*. Geophysics, volume 63, numéro 3, p.856-867.
- [93] Bourgeois, J. M. et Smith, G. S. (1996). *A fully three-dimensional simulation of a ground penetrating radar : FDTD theory compared with experiment*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 34, numéro 1, p.36-44.
- [94] Chen, H. W. et Huang, T. M. (1998). *Finite-difference time-domain simulation of GPR data*. Journal of Applied Geophysics, volume 40, numéro 1, p.139-163.
- [95] Gandhi, O. P., Ben-Qing, G. et Jin-Yuan, C. (1993). *A frequency dependent finite difference time domain formulation for general dispersive media*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, volume 41, numéro 4, p.658-664.
- [96] Gürel, L. et Uguz, O. (2000). *Three-Dimensional FDTD Modelling of a Ground-Penetrating Radar*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 38, p.1513-1521.
- [97] Roberts, R. L. et Daniels, J. J. (1997). *Modelling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method*. Geophysics, volume 62, numéro 4, p.1114-1126.



- [98] Teixeira, F. L., Chew, W. C., Straka, M., Oristaglio, M. L. et Wang, T. (1998). *Finite difference time domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous and conductive soils*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 36, numéro 6, p.1928-1937.
- [99] Wang, T. et Tripp, A. C. (1996). *FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media*. Geophysics, volume 61, numéro 1, p.1097-1106.
- [100] Dalke, R. A., Holloway, C. L., McKenna, P., Johansson, M. et Ali, A. S. (2000). *Effects of reinforced concrete structures on RF communications*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, volume 42, numéro 4, p.486-496.
- [101] Peña, D., Feick, R., Hristov, H. D. et Grote, W. (2003). *Measurement and Modelling of Propagation Losses in Brick and Concrete Walls for the 900-MHz Band*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, volume 51, numéro 1, p.31-39.
- [102] Savov, S.V. et Herben, M.H.A.J (2003). *Modal Transmission-Line Modelling of Propagation of Plane Radiowaves Through Multilayer Periodic Building Structures*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, volume 51, numéro 9, p.2244-2251.
- [103] Laurens, S., Balayssac, J., Rhazi, J.E., Klysz, G. et Arliguie, G. (2005). *Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR : Experimental study and direct modelling*. Materials Structures / Materiaux et constructions, volume 38, numéro 9, p.827-832.
- [104] Coutanceau, N. (1989). *Propriétés diélectriques de roches non argileuses dans la bande 20-1000 MHz*. Thèse de doctorat, Université de Paris VII, Paris, France, 189 p.
- [105] Filali, B., Boone, F., Rhazi, J.E. et Ballivy, G. (2008). Design and calibration of a large openended coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, volume 56, numéro 10, p.2322-2328.
- [106] Bourdi, T., Rhazi, J.E., Boone, F. et Ballivy, G. (2012). Modelling dielectric-constant values of concrete : An aid to shielding effectiveness prediction and ground-penetrating radar wave technique interpretation. *Journal of Physics D : Applied Physics*, volume 45, numéro 40, p x-y.
- [107] Millard, S.G., Shaw, M.R., Giannopoulos, A. et Soutsos, M.N. (1998). Modeling of subsurface pulsed radar for nondestructive testing of structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 10, numéro 3, p.188-196.
- [108] Klysz, G., Ferrieres, X., Balayssac, J.P. et Laurens, S. (2006). Simulation of direct wave propagation by numerical FDTD for a GPR coupled antenna. *NDT and E International*, volume 39, numéro 4, p.338-347.
- [109] Klysz, G., Balayssac, J.P. et Ferrières, X. (2008). Evaluation of dielectric properties of concrete by a numerical FDTD model of a GPR coupled antenna-parametric study. *NDT and E International*, volume 41, numéro 8, p.621-631.
- [110] Shaari, A., Millard, S.G., et Bungey, J.H. (2003). GPR Antenna-Medium Coupling Effects : Experimental and 2D FDTD Modelling Results. Int. Symp. on Non-Destructive

Testing in Civil Engineering (NDT-CE), ed. Wiggenhauser, DGZIP/BAM, Berlin, Allemagne.

- [111] Solla, M., Lorenzo, H., Rial, F.I. et Novo, A. (2011). GPR evaluation of the roman masonry arch bridge of lugo (spain). *NDT and E International*, volume 44, numéro 1, p.8-12.
- [112] Wang, T. et Hsu, T.T.C. (2001). Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models. *Computers and Structures*, volume 79, numéro 32, p.2781–2791.
- [113] Zeng, Y. (2007). Modeling of chloride diffusion in hetero-structured concretes by finite element method. *Cement and Concrete Composites*, volume 29, numéro 7, p.559-565.
- [114] Cassidy, N.J. (2007). A review of practical numerical modelling methods for the advanced interpretation of ground-penetrating radar in near-surface environments. *Near Surface Geophysics*, volume 5, numéro 1, p.5–21.
- [115] Halabe, U.B., Sotoodehnia, A., Maser, K.R. et Kausel, E.A.. Modeling the electromagnetic properties of concrete. *ACI Materials Journal*, volume 90, numéro 6, p.552–563.
- [116] Tsui, F. and Matthews, S.L. (1997). Analytical modelling of the dielectric properties of concrete for subsurface radar applications. *Construction and Building Materials*, volume 11, numéro 3, p.149-161.
- [117] Knoll, M.D.(1996). *A petrophysical basis for ground penetrating radar and very early time electromagnetics–Electrical properties of sand-clay mixtures*. Thèse de doctorat, Université de la Colombie-Britannique, Département des Sciences de la Terre et de la mer, Vancouver, BC, Canada, 318p.
- [118] Van Dam, R.L., Borchers, B. et Hendrickx, J.M.H. (2005). Methods for prediction of soil dielectric properties : a review. *Proceedings of the Society of Photographic Instrumentation Engineers (SPIE)*, volume 5794, p.188-197.
- [119] Zhao, Z.B., Cui, X., Li, L. et Zhang, B. (2005). Analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosure of metal structures with apertures above ground plane. *IEEE Transactions on Magnetics*, volume 41, numéro 5, p1892-1895.
- [120] Richalot, E., Bonilla, M., Wong, M.F, Fouad-Hanna, V, Baudrand, H. et Wiart, J. (2000). Electromagnetic propagation into reinforced-concrete walls. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, volume 48, numéro 3, p.357-366.
- [121] Casey, K. F. (1988). Electromagnetic shielding behavior of wire-mesh screens. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, volume 30, numéro 3, p.298–306.
- [122] Bihua, Z., Cheng, G., Bin, C. et Ziming, C. (2000). Experimental investigation of EMP shielding effectiveness of reinforced-concrete cell model. *Asia-Pacific conference on environmental electromagnetics*, volume 8, p.296-300.

- [123] Saverio, C. et Orlandi, A. (1995). Equivalent transmission line model for electromagnetic penetration through reinforced concrete walls. *IEICE Transactions on Communications*, volume 78, numéro 2, p.218-229.
- [124] Ogunsola, A., Reggiani, U. et Sandrolini, L.(2005). Shielding effectiveness of concrete buildings. *IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology* , volumes 21-24, p.65-68.
- [125] Cromarty, B.J. et Paknys, R. (2001). Shielding effectiveness diagnostics using a network analyzer. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, volume 2, p.719-722.
- [126] Daniel, V. (1968). *Dielectric Relaxation*. Academic Press, New York, USA, 281p.
- [127] Kosmas, P., Rappaport, C.M., et Bishop, E.(2004). Modeling with the fdtd method for microwave breast cancer detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, volume 52, numéro (8 II), p.1890-1897.
- [128] Oswald, B., Erni, D., Benedickter, H.R., Bächtold, W., et Flü, H.(1998). Dielectric properties of natural materials. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, volume 4, numéro 4, p.2002-2005.
- [129] Makosz, J.J., Urbanowicz, P., et Paluch, M.(2008). The extended debye model analysis of poley absorption in glass-forming toluene. *Journal of Non-Crystalline Solids*, volume 354, numéro (10-11), p.1044–1047.
- [130] Ong, K.G., Dreschel, W.R., et Grimes, C.A. (2003). Detection of human respiration using square-wave modulated electromagnetic impulses. *Microwave and Optical Technology Letters*, volume 36, numéro 5, p.339–343.
- [131] Zhang, J., Koledintseva, M., Antonini, G., Drewniak, J., Rozanov, K., et Oriandi, A.(2003). Reconstruction of the parameters of debye and lorentzian dispersive media using a genetic algorithm. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, volume 2, p.898-903.
- [132] Guerra, J. et Eiras, J.(2004). High frequency dielectric relaxation in lanthanum modified pbtio3 ferroelectric ceramics. *Materials Research*, volume 7, numéro 2, p.325-328.
- [133] Huisman, J.A., Hubbard, S.S., Redman, J.D., et Annan, A.P.(2003). Measuring soil water content with ground penetrating radar : A review. *Vadose Zone Journal*, volume 2, numéro 4, p.476–491.
- [134] Ogunsola, A., Reggiani, U., et Sandrolini, L.(2006). Modelling shielding properties of concrete. *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Suisse, p.34–37.
- [135] Shaw, M.R., Millard, S.G., Houlden, M.A., Austin, B.A., et Bungey, J.H. (1993). Large diameter transmission line for the measurement of the relative permittivity of construction materials. *British Journal of Non-Destructive Testing*, volume 35, numéro 12, p.696-704.

- [136] Loulizi, A.(2001). *Development of ground penetrating radar signal modeling and implementation for transportation infrastructure assessment* .Thèse de doctorat, Institut polytechnique et Université d'état de Virginie, Blacksburg, Virginie, USA, 263p.
- [137] Loulizi, A., Al-Qadi, I.L., et Lahouar, S.(2002). Ground-penetrating radar signal modeling to assess concrete structures. *ACI Materials Journal*, volume 99, numéro 3, p.282-291.
- [138] Rhim, H.C. et Büyüköztürk, O.(1998). Electromagnetic properties of concrete at microwave frequency range. *ACI Materials Journal*, volume 95, numéro 3, p.262-271.
- [139] Bourdi,T, Boone, F, Rhazi, J.E. et Ballivy, G.(2013). Use of jonscher model for estimating the thickness of a concrete slab by technical gpr. *Progress In Electromagnetics Research M*, volume 28, p.89-99.
- [140] Daniels, D.J., Gunton, D.J., et Scott, H.F.(1988). Introduction to subsurface radar. *IEE Proceedings, Part F : Communications, Radar and Signal Processing*, volume 135, numéro F(4), p.278-320.
- [141] Olson, L.D. et Wright, C.C.(1990). Nondestructive testing for repair and rehabilitation. *Concrete International*, volume 12, numéro 3, p.58–64.
- [142] Stain, R.T. (1982). Integrity testing. *Part 1, Civil engineering*, UK, p.53-59.
- [143] Skolnik, M.I. (1980). *Introduction to Radar Systems*. 2nd edition, McGraw-Hill book company, New York, USA, 590.p.
- [144] Dufrenoy-Delabriere, A.M. (1996). *Conception, réalisation et comparaison de deux radars de géophysique de type impulsionnel et à impulsions synthétiques*. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, Lille, France, 198 p.
- [145] Juhlin, C. et Young, R. (1993). Implications of thin layers for amplitude variation with offset (AVO) studies. *Geophysics*, volume 58, numéro 8, p.1200–1204.
- [146] Lange, H. A. Almoghrabi, J. N. (1988). *Lithology discrimination for thin layers using wavelet signal parameters*. *Geophysics*, volume 53, numéro 12, p.1512–1519.